

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Engenharia Mecatrônica

**Estudo sobre desempenho e consumo energético de
amplificadores de áudio automotivos**

Leonardo Fornero Gomes Ferreira

Divinópolis - 2013

LEONARDO FORNERO GOMES FERREIRA

ESTUDO SOBRE DESEMPENHO E CONSUMO ENERGÉTICO DE
AMPLIFICADORES DE ÁUDIO AUTOMOTIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado de Graduação
em Engenharia Mecatrônica como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do título
de Engenheiro Mecatrônico.

Divinópolis/MG, 2013.



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEFET-MG / Campus Divinópolis
Curso de Engenharia Mecatrônica

Monografia intitulada “*Estudo sobre desempenho e consumo energético de amplificadores de áudio automotivos*”, de autoria do graduando Leonardo Fornero Gomes Ferreira, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. M.Sc. Christian Gonçalves Herrera - CEFET-MG / Campus Divinópolis/Orientador

Prof. Dr. João Carlos Oliveira - CEFET-MG / Campus Divinópolis

Prof. M.Sc. Josias Gomes Ribeiro Filho - CEFET-MG / Campus Divinópolis

Prof. Dr. Valter Junior de Souza Leite
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica
CEFET-MG / Campus Divinópolis

Divinópolis - Abril de 2013

*“Dedico este trabalho primeiramente à
minha família que sempre esteve comigo me
apoiando em minhas decisões e desafios, aos meu
amigos, que mesmo distantes me dão suporte
para enfrentar todos meus desafios, e à todos que
contribuíram de alguma maneira para a
execução deste trabalho.”*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que me ajudaram na elaboração deste trabalho, em especial, meu Orientador Christian Gonçalves Herrera, que sempre me apoiou e esteve presente para execução do projeto.

RESUMO

Um dos fatores importantes em um sistema de energia elétrica automotiva é o consumo energético de seus componentes elétricos, tais como os alarmes, travamento elétrico das portas e os auto-rádios. Este trabalho aborda o consumo energético dos auto-rádios levando em consideração os amplificadores de áudio utilizados nos mesmos.

Sabe-se que nos dias atuais os amplificadores mais utilizados neste setor são os que possuem o arranjo de classe AB, derivado de arranjos classe A e B e que atualmente muito se fala nos novos amplificadores classe D, cuja característica marcante é o seu baixo consumo de energia e seu alto valor de rendimento.

Portanto, sendo a classe AB a mais utilizada nos setores automotivos e a classe D definida teoricamente como a mais eficiente, o trabalho apresenta uma bancada de testes onde se possa analisar o desempenho destas diferentes arquiteturas perante à um mesmo procedimento experimental, levando em consideração suas principais figuras de méritos. Em um ambiente de testes controlado, seguindo a norma IEC-60268-3, definições e técnicas de procedimento para medição em áudio apresentadas na NBR60268-3:2010, o trabalho buscou comparar as diferentes classes citadas, evidenciando suas principais características e investigando o real consumo energético e eficiência das mesmas.

Tal desenvolvimento contribui positivamente na área de pesquisas e projetos de componentes eletrônicos automotivos, pois trata de um assunto importante que é a conservação de energia da bateria de um veículo com referência ao consumo energético dos auto-rádios.

Palavras-chave: Amplificadores de Áudio, Consumo energético de Amplificadores, Classe AB, Classe D.

ABSTRACT

One of the important factors in a power system is the automotive energy consumption of its electrical components, such as alarms, locking electric doors and car radios. This study addresses the energy consumption of car radios considering the audio amplifiers used in them.

It is known that nowadays most amplifiers used in this industry are the ones with the arrangement of class AB, derivative arrangements class A and B and that currently, much have been talked about the recent class D amplifiers, whose outstanding feature is its low consumption energy.

So, being the class AB the most widely used in the automotive and class D-fined as the theoretically more efficient and higher throughput, the proposed work aims to create a test bench where it is possible to analyze the performance of these different architectures before the same experimental procedure, taking into consideration its main merit figures. In a controlled test environment, according to IEC 60268-3, and definitions and procedural techniques for measuring audio presented in NBR60268-3: 2010, the work aims to compare the different classes cited before, showing its main characteristics and investigating their real consumption and energy efficiency.

This development contributes positively in the area of research and projects with automotive electronic components, because this is an important issue which is the conservation of battery power from a vehicle when it says energy consumption of auto-radios.

Keywords: Audio Amplifiers, Power consumption of amplifiers, Class AB, Class D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelo simples de um Sistema de Potência Automotivo..	18
Figura 2.2: Auto-rádio Motorola 5T71, lançado em 1930,.....	20
Figura 2.3: Exemplo de placa mãe de um auto-rádio.	21
Figura 2.4: Exemplo de Conector ISO utilizado em rádios automotivos,	22
Figura 2.5: Esquema elétrico do áudion..	24
Figura 2.6: Encapsulamento de Amplificador Automotivo TDA 7385.....	25
Figura 2.7: Fluxo do Sinal de áudio em um rádio.....	25
Figura 2.8: Amplificador utilizando 3 estágios.....	27
Figura 2.9: Amplificador utilizando 2 estágios.....	28
Figura 2.10: Circuito Classe A, configuração seguidor de emissor.....	31
Figura 2.11: Amplificador Classe B, configuração push-pull.....	32
Figura 2.12: Distorção de Crossover.	33
Figura 2.13: Esquema de Amplificador Classe AB.	34
Figura 2.14: Rendimento Amplificador Classe AB.	34
Figura 2.15: Circuito típico de um arranjo classe D..	35
Figura 2.16: Comparação de Sinais para PWM.....	36
Figura 2.17: Rendimento Amplificador Classe D.	37
Figura 2.18: Distorção Harmônica Total.	40

Figura 2.19: Exemplo de Distorção por Intermodulação entre 60Hz e 7KHZ. ...	41
Figura 3.1: Esquema de Um Transdutor eletroacústico.....	46
Figura 3.2: Esquema Funcionamento de um transdutor eletromecânico.....	47
Figura 3.3: Circuito elétrico equivalente para um transdutor eletroacústico.....	48
Figura 3.4: Alto Falante ASK, de 6 polegadas. Imagem Real do transdutor. ...	50
Figura 3.5: Circuito exemplo do estágio de saída do tipo Classe B.	53
Figura 3.6: Comportamento apresentado na Saída Amplificador Classe B.	54
Figura 3.7: Distorção de Crossover.	55
Figura 3.8: Circuito exemplo da Classe AB.	56
Figura 3.9: Saída Amplificada circuito classe AB	56
Figura 3.10: Detalhe, Correção da Distorção de crossover Circuito AB.	57
Figura 3.11: Circuito de um amplificador Classe D meia-ponte	57
Figura 3.12: Sinal de Entrada. Fonte: Resultado da Simulação.	58
Figura 3.13: Sinal de Referência para comparação - Classe D.	59
Figura 3.14: Circuito comparador dos sinais de entrada e sinal de referência.	59
Figura 3.15: Pulsos Resultante da comparação	60
Figura 3.16: Sinal de Saída Amplificada do Circuito Classe D	61
Figura 4.1: Painel de Testes para rádios automotivos.	63
Figura 4.2: Diagrama do Circuito de medição do experimento.	63
Figura 4.3: Detalhe da ligação dos resistores de 4,7 ohms, utilizados como carga nominal no experimento.	64
Figura 4.4: Bornes de acesso as saídas amplificadas do rádio.	65
Figura 4.5: Detalhe Conector Padrão ISO utilizados em Auto-rádios.	65
Figura 4.6: Imagem Real da Bancada de testes Utilizada.	66
Figura 4.7: Amostra 1 - Clarion FB275. Fonte: Imagem Real do Auto-rádio...	70
Figura 4.8: Amostra 2 Blaupunkt F312. Fonte: Imagem Real da amostra.	71
Figura 4.9: Amplificador Classe D utilizado no experimento.	72

Figura 4.10: Diagrama de funcionamento do Amplificador TSA5182	72
Figura 5.1: Gráfico Eficiência VS Potência - Clarion FB275.	75
Figura 5.2: Gráfico Eficiência VS Potência - Blaupunkt F312	75
Figura 5.3: Gráfico Eficiência VS Potência - TAS5182	76
Figura 5.4: Comparação Curvas de Eficiência das amostras com amplificadores Classe AB e Classe D.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do Modelo do alto-falante	52
Tabela 2 - Amostra 1 - Clarion FB275	73
Tabela 3 - Amostra 2 - Blaupunkt F312	74
Tabela 4 - Amostra 3 - TSA5182	74

SUMÁRIO

1. Introdução.....	14
1.1 <i>Contextualização e Motivação</i>	14
1.2 <i>Objetivo Geral.....</i>	15
1.2.1 <i>Objetivos específicos.....</i>	15
1.3 <i>Organização do trabalho.....</i>	16
1.4 <i>Infraestrutura</i>	17
2. Fundamentação teórica	18
2.1 <i>Sistema Elétrico de Potência Automotiva.....</i>	18
2.3 <i>Auto-rádios</i>	20
2.4 <i>Histórico sobre os amplificadores de áudio.....</i>	23
2.5 <i>Estágios ou andares de amplificação.....</i>	26
2.5.1 <i>Estágios de saída de amplificadores de áudio.....</i>	29
2.6 <i>Classes de estágio de saída</i>	30
2.6.1 <i>Classes A.....</i>	30
2.6.2 <i>Classes B</i>	31
2.6.3 <i>Classes AB</i>	33
2.6.4 <i>Classes D</i>	35
2.7 <i>Figuras de Mérito.....</i>	37
2.7.1 <i>Impedância</i>	38
2.7.2 <i>Distorção Harmônica Total</i>	39
2.7.3 <i>Distorção por Intermodulação</i>	41
2.7.4 <i>Potência RMS.....</i>	42
2.7.5 <i>Resposta em frequência.....</i>	43
2.7.6 <i>Relação sinal/ruído.....</i>	43
3. Modelagem e Simulação.....	45
3.1 <i>Alto-falante.....</i>	45
3.1.1 <i>Funcionamento de um alto-falante.....</i>	46
3.2 <i>Modelo.....</i>	47
3.3 <i>Simulação.....</i>	53
4. Experimento.....	62
4.1 <i>Planejamento do Experimento</i>	62
4.1.1 <i>Bancada</i>	62
4.2 <i>Procedimento.....</i>	66
4.2.1 <i>Cálculo da eficiência.....</i>	67
4.3 <i>Amostras</i>	69
5. Resultados.....	73

5.1 <i>Dados</i>	73
6. Considerações Finais	78

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Motivação

A motivação desse estudo é o interesse e a busca pelo uso conscientizado de energia, focado na redução de consumo energético, ou seja, o uso racional de energia em um veículo.

Com o aparecimento de novas tecnologias, assim como a discussão de projetos inovadores no setor automotivo como o carro elétrico, se torna obrigatório neste setor, novos estudos que busquem redução de consumos de eletroeletrônicos embarcados no veículo, através de novas abordagens e uso de novas arquiteturas.

Um dos fatores importantes em um sistema de energia elétrica automotiva é o consumo energético de seus componentes elétricos, tais como, alarmes, travamento elétrico das portas, os auto-rádios, dentre outros.

Quando fala-se em áudio automotivo, são raras as pesquisas e literatura científica que buscam melhorar a eficiência energética desse sistema. Não obstante a este fato, atualmente, ocorrem por parte de montadoras de veículos, lançamentos de sistemas de som cada vez mais complexos, possuindo um número elevado de alto-falantes e um consumo de potência superior aos demais.

Apesar de alguns métodos de diminuição de consumo de amplificadores de áudio já serem conhecidos, como o uso de amplificador classe D, que possui menor consumo devido a sua arquitetura. Este conceito não vem sendo utilizado em aplicações de áudio automotivo. Assim, existe uma percepção de que é possível obter a redução do consumo e de perdas existentes hoje nos amplificadores de potência desses rádios.

Existem diversas implementações, ou arquiteturas, de amplificadores de potência em aplicações automotivas. Destas, neste estudo são tratados os amplificadores classe AB e classe D. As duas principais figuras de mérito utilizadas para classificar esses diferentes circuitos eletrônicos são:

1. Qualidade do áudio
2. Consumo energético

Muitas das diferenças entre as classes são perceptíveis ao usuário. Por exemplo, a distorção harmônica a partir de certos níveis degrada o programa de áudio executado, alterando a percepção de timbre do ouvinte com relação a esse programa. Outro exemplo é o calor gerado especialmente pelos amplificadores classe AB em ponte, que sobreaquece o autorrádio e outros componentes vizinhos, (BALLOU, 1996).

Assim, ao especificar e projetar novos sistemas de sonorização automotivos é importante conhecer as diferentes classes de amplificadores de potência existentes e entender as características de desempenho energético e eficiência de cada uma delas.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é construir um ambiente de testes para analisar o consumo energético e eficiência de amplificadores de áudio presentes em autorrádios, comparando diferentes parâmetros nas principais classes de amplificadores de áudio destacando-se as classes AB e Classe D. Nos testes será levado em consideração as figuras de méritos tratadas em sinais de áudio

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

1. Estudar as principais classes de amplificação existentes (A, B, AB e D) analisando suas características principais como a qualidade de áudio e eficiência.

2. Obter modelo eletromecânico do transdutor eletroacústico (alto-falante), para fim de estudo de seu comportamento e possibilidade de implementação em projetos futuros.
3. Realizar Simulação das tipologias dos estágio de saída referente às diferentes classes de amplificadores de áudio evidenciando seus diferentes comportamentos.
4. Planejar e desenvolver um procedimento para execução de testes de eficiência em amostras selecionadas, utilizando produtos OEM e aftermarket.
5. Executar ensaios e testes nas amostras.
6. Analisar os resultados obtidos evidenciando a eficiência de cada arquitetura testada.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho está dividido em seis capítulos.

No presente capítulo, são apresentados os objetivos do trabalho proposto, bem como a motivação para desenvolvê-lo. São apresentados ainda o escopo e organização da estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é apresentado uma revisão da fundamentação teórica dos assuntos relevantes para o estudo, como as classes de amplificadores a serem estudadas, alto-falante e as figuras de mérito que irão compor os testes realizados em amostras de auto-rádios.

No capítulo 3 é tratado o levantamento do modelo de um alto-falante e o desenvolvimento das simulações das diferentes classes estudadas.

No Capítulo 4 é feito todo o planejamento do experimento que será realizado através de uma bancada construída para este propósito.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com o experimento.

O Capítulo 6 trata das considerações finais e perspectivas de trabalho futuro após as análises dos resultados obtidos.

1.4 Infraestrutura

A execução do estudo sobre os amplificadores demandará recursos laboratoriais específicos e amostras de componentes. O laboratório de eletroacústica do Campus V do CEFET-MG em Divinópolis conta com alguns itens que serão utilizados durante tal projeto, sendo eles:

- a) computador pessoal tipo desktop;
- b) ponta de prova de corrente elétrica (BW 50 MHz, resolução 5mA);
- c) fonte de alimentação CC (30 V, 6 A);
- d) multímetro digital portátil (3 ½ dígitos);
- e) multímetro USB4065 DMM
- f) placa de aquisição de sinais NI PCI-6221 (16 bits, 1x16 ADC 250 kS/s e 2 DACs 833 kS/s);

Esses recursos viabilizam a execução das atividades de medição em bancada e em veículo. Em conjunto com eles, diferentes amostras de rádios serão testadas para compor o experimento.

Para o experimento, serão testados, modelos de auto-rádios de diferentes categorias para que sejam identificadas as tendências de projeto e o estado da arte. Serão testados tanto produtos OEM¹ assim como produtos aftermarket²

¹ Original Equipment Manufacturer, ou OEM, é uma modalidade diferenciada de distribuição de produtos originais, na qual eles não são comercializados aos consumidores finais. Ou seja, são vendidos a outras empresas (chamadas de VAR, ou Value-Added Reseller) que montam os produtos finais, e os vendem ao consumidor final.

² After-market é um mercado onde os clientes compram um determinado produto ou serviço, fora da fábrica, vulgarmente conhecido como mercado paralelo. Por exemplo, os compradores de automóveis constituirão um aftermarket natural para peças e serviços. O conceito vale para produtos e serviços, comercializados após a fabricação, ou seja, não possui proveniência direta da fabricação mas têm a mesma função ou utilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será estudada as diferentes classes de Amplificadores de áudio, suas principais características e as figuras de méritos diretamente ligadas ao sistema de amplificação.

Por se tratar de uma investigação de eficiência energética, será abordado neste capítulo, um estudo prévio sobre o SEP-A, Sistema Elétrico de Potência Automotiva, que fornece a alimentação para todo o sistema de áudio e demais equipamentos do veículo.

2.1 Sistema Elétrico de Potência Automotiva

O sistema elétrico de potência automotiva, ou SEP-A, é responsável por toda alimentação de equipamentos de um veículo. A Figura 2.1 apresenta um modelo simplificado do SEP-A.

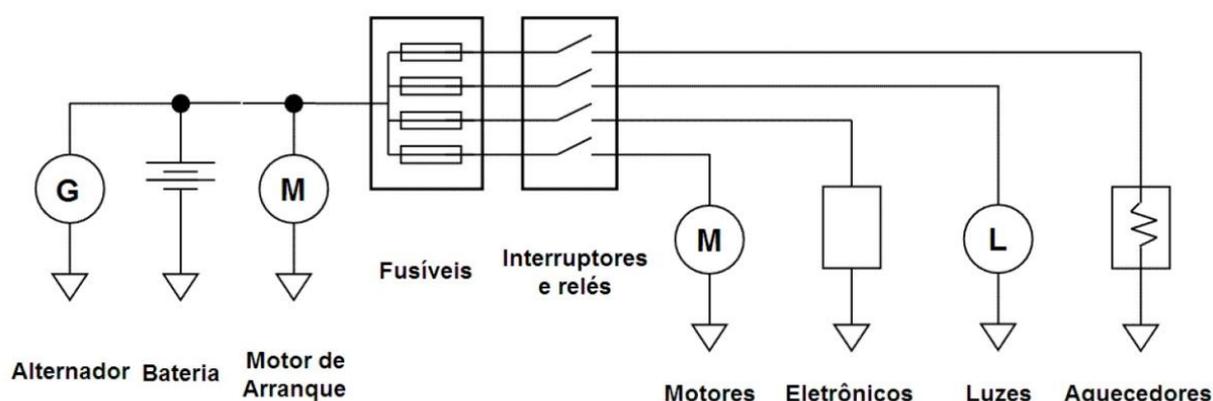


Figura 2.1: Modelo simples de um Sistema de Potência Automotivo. Figura adaptada de "Automotive Electrical Systems circa 2005", IEEE Spectrum, 22–27 , Aug. 1996.

O sistema é composto por dois componentes ativos, a bateria e o alternador. Quando o motor do veículo se encontra em funcionamento, a bateria torna-se um componente passivo e consome energia do alternador, com intuito de recarregar-se. Caso contrário, com o motor do veículo desligado, a bateria é responsável por toda alimentação do sistema.

Segundo o blog Sistemas Automotivos (2009), um dado muito importante para o sistema de áudio automotivo alimentado pela SEP-A, é o fato de que o rádio deve trabalhar com diferentes tensões já que, a tensão nominal da bateria é de 12 Volts e do alternador pode variar entre 13,5 à 14,8 Volts e como dito anteriormente dependendo da situação o rádio será alimentado por uma ou pela outra.

Em sequência aos componentes que fornecem alimentação para o sistema, na Figura 2.1 têm-se um bloco de proteção elétrica, caracterizado pela caixa de fusíveis, e em seguida os acionamentos representados pelos interruptores e relés.

Representado no lado direito do diagrama, estão as demais cargas típicas de um SEP-A, como motores, aquecedores, componentes eletrônicos, luzes, dentre outros, onde cada componente é protegido pelos interruptores e relés também apresentados.

O auto rádio é um desses componentes alimentados pela SPE-A, e seu consumo energético pode ser dividido em duas partes: a primeira, caracterizada pelo consumo quiescente dos amplificadores, circuitos, leitores de mídias e a própria iluminação de painel e displays do rádio. A segunda parte é caracterizada pela potência entregue aos alto-falantes, o principal foco de estudo deste trabalho, que varia de acordo com a intensidade sonora desejada pelo usuário do sistema de sonorização do veículo. Em casos extremos de intensidade, a parcela de consumo destinada a potência, pode ser até dez vezes maior que o consumo quiescente do rádio.

2.3 Auto-rádios

Antes de tratar do assunto de classes de amplificadores de áudio é necessário entender os princípios de funcionamento dos rádios em sua evolução cronológica e caracterizar a necessidade do uso de amplificadores de áudio na reprodução do som em um veículo.

Segundo o site Jalopnik (2013), após a invenção do rádio pelo russo Aleksandr Popov (1859-1905)³, este aparelho passou a fazer parte da vida de todas as pessoas, se difundindo por todo o mundo. Com o advento dos processos de modulação, a exemplo da modulação AM e FM, as distâncias e alcances de transmissão foram crescendo e hoje pode-se enviar e receber transmissões de rádio até fora do nosso planeta.

O primeiro rádio projetado especificadamente para o uso em automóveis foi fabricado em 1930 pela empresa Motorola, apresentado pela Figura 2.2. Tratava-se de um simples rádio AM valvulado, com um pequeno dial para ser preso à coluna de direção e um alto-falante com caixa de madeira. O auto-rádio era considerado um acessório à parte, e só veio fazer parte de itens de série, no ano de 1948, sendo vendidos somente em carros de primeira linha. (JALOPNIK, 2012)



Figura 2.2: Auto-rádio Motorola 5T71, lançado em 1930,

Fonte: <http://www.jalopnik.com.br/jalopnik-explica-a-historia-do-som-automotivo/>.

³ Foi o inventor da antena e, através dela, transmitiu ondas electromagnéticas à distância. Em 1890 continuou com as experiências iniciadas pelos pioneiros da rádio, como Hertz e em 1894 construiu o primeiro receptor de rádio e apresentou-o à Sociedade Russa de Física e Química em 7 de Maio de 1895. Em Março de 1896 efetuou uma transmissão de rádio entre 2 edifícios e em 1898 transmitiu sinais entre terra e um barco que se encontrava a 5 quilômetros da costa.

Com a substituição do uso de válvulas por transistores em rádios comuns em 1953, a partir de 1960 começaram a aparecer os primeiros toca fitas automotivos transistorizados, que utilizavam mídias externas. Neste caso, um cartucho de fita magnética com oito pistas enrolada em uma única bobina, o que permitia a reprodução contínua da fita, seguida pela comercialização de rádios que reproduziam áudio a partir das fitas cassetes, onde qualquer pessoa poderia gravar sua fita a seu critério e seleção de músicas. (JALOPNIK, 2012)

Foi no final da década de 60 que o efeito estereofônico, divisão do áudio em dois canais, já utilizado em rádios normais chegou aos automóveis, em 1969, quando foi lançado o Becker Europa, o primeiro rádio com dois canais amplificados para automóveis. Já o CD foi desenvolvido em conjunto pela Philips e Sony e teve sua introdução comercial no ano de 1982 e já em 1984 a Pioneer comercializava o seu primeiro CD player para automóvel. (JALOPNIK, 2012)

A partir deste último conceito, os auto-rádios apesar de terem sofrido modificações em suas interfaces, fontes de sinais, como o CD, mídias, cartões de memória, funções, equalizações, dentre outros. Porém, de maneira geral, o sinal de áudio que chega aos alto-falantes, segue um fluxo padrão de funcionamento, onde partindo de um sinal base de áudio, este é amplificado para ser entregue aos alto-falantes.

A Figura 2.3 apresenta um exemplo de placa mãe que compõe um típico auto-rádio atual, normalmente utilizado na maioria dos veículos.

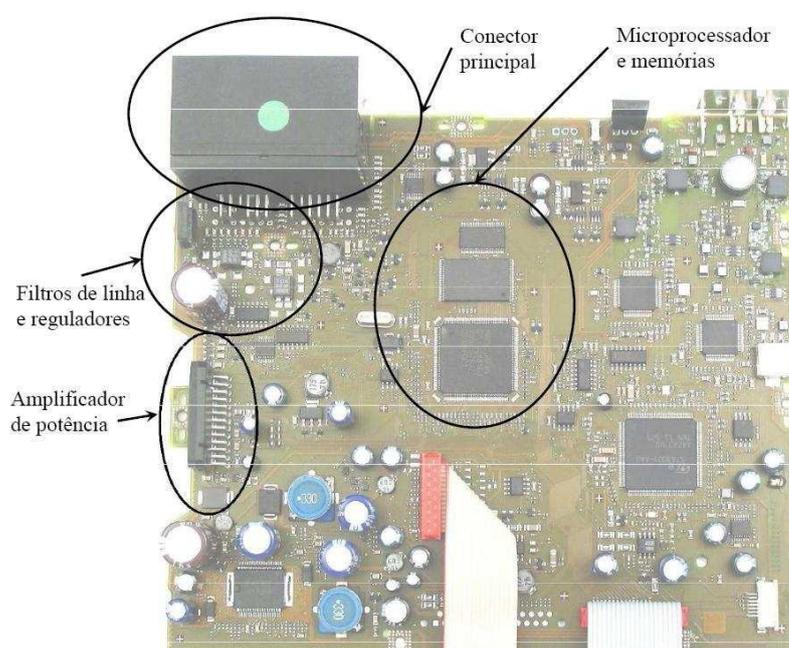


Figura 2.3: Exemplo de placa mãe de um auto-rádio.

Destacados na Figura 2.3, estão os principais componentes de um rádio: os microprocessadores, juntamente com seus chips de memória; o amplificador de potência; a entrada para o conector principal; e os filtros e reguladores de tensão.

Os microprocessadores são responsáveis por tratar o sinal a ser amplificado, oriundos das diferentes fontes.

Com o intuito de evitar possíveis ruídos e interferências referentes a outros equipamentos elétricos de um carro, como por exemplo, a ventoinha do sistema de refrigeração do motor, limpador de para-brisas, e outros, a placa de um auto-rádio possui após sua conexão principal, filtros, que atuam sobre a entrada da tensão de alimentação, evitando a contaminação no sinal de rádio a ser amplificado.

O chip contendo o amplificador é responsável pelo ganho de potência do sinal, e embora não seja mostrado nesta figura, os amplificadores do tipo Classe AB, possui fixado no chip de amplificador, um radiador de calor por todo o comprimento deste na placa, já que estes modelos são famosos por dissiparem muito calor, o que se faz necessário este acoplamento.

O conector principal, conhecido como conector ISO, identificado na Figura 2.4, de acordo com o site PIONEER (2013) tem a função básica de fornecer alimentação à todo o sistema do rádio, e também de enviar os sinais de áudio amplificados para alto-falantes do veículo, assim como conexão com a antena externa do veículo para funcionamento da recepção de sinais de rádio frequência AM e FM.



Figura 2.4: Exemplo de Conector ISO utilizado em rádios automotivos,

Fonte: www.codi-tek.com.

2.4 Histórico sobre os amplificadores de áudio

Um amplificador de áudio é um dispositivo utilizado para amplificar sinais de áudio de baixa amplitude. Partindo de pequenos sinais, o amplificador de áudio deve ser capaz de gerar sinais de maior intensidade proporcionais à sua entrada. Portanto deve ser capaz de fornecer energia suficiente a cargas que exigem valores altos de corrente, como por exemplo, os alto-falantes.

De acordo com o que Francisco José Amorim Pires descreve em sua dissertação "Amplificadores de áudio classe D" em 2010, o primeiro amplificador de áudio, ou melhor, a primeira implementação de dispositivo que se comportasse de maneira a amplificar um sinal foi descoberto em 1906 por Lee De Forest⁴. Utilizando um dispositivo baseado na Válvula de Fleming⁵, constituído por 3 terminais, "ânodo, cátodo e grelha", Lee De Forest percebeu que variando a tensão aplicada à grelha era possível controlar a corrente que passava do cátodo para o ânodo.

Desta forma, ao se aplicar um sinal de pequena amplitude em um terminal, poderia se controlar a passagem de uma grande quantidade de energia nos terminais restantes. Forest deu o nome a este dispositivo de Áudion, que posteriormente, seria chamada de triodo. A seguir na Figura 2.5 é apresentado o esquema elétrico de funcionamento do Áudion. Com os avanços pós-segunda guerra mundial, os dispositivos amplificadores que utilizavam tubos de vácuo, "válvulas" se tornaram comum no mercado mundial. (PIRES, 2010).

⁴ Lee De Forest foi um físico que pesquisou componentes e aparelhos dedicados para a gravação e reprodução de sons, assim como instrumentos de aplicação nos campos da eletromedicina e da telefonia. Em 1907 De Forest patenteou a válvula triodo.

⁵ Válvula de Fleming consiste em um dispositivo onde, em um bulbo de vidro com vácuo parcial, um filamento de uma lâmpada elétrica é envolvido à uma pequena distância por uma placa cilíndrica. Quando percorrido por uma corrente elétrica, o filamento emite elétrons que se dirigem ao disco. A este conjunto denomina-se válvula, uma vez que se pode controlar o fluxo da corrente semelhante a um registro num circuito hidráulico.

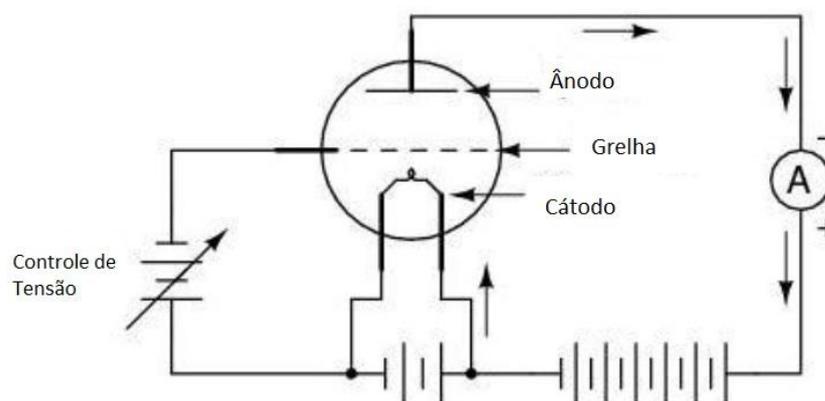


Figura 2.5: Esquema elétrico do áudion. Figura adaptada Dissertação "Amplificador Classe D" de Francisco José Amorim Pires, 2010.

Fonte: http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_13/2.html.

Em 1947 foi criado um novo dispositivo eletrônico que tomaria lugar das válvulas nos amplificadores, os transistores. Desenvolvidos por investigadores da Companhia Bell Telephone⁶ os transistores compostos de semicondutores foram considerados a evolução das válvulas, e possuíam como vantagens seu tamanho reduzido, maior robustez e eficiência. (PIRES, 2010).

Hoje em dia a maioria dos amplificadores utilizam transistores de estado sólido, a exemplo os Transistores de Junção Bipolar (*TBJ- bipolar junction transistor*), e os Transistores de Efeito de Campo (*MOSFET- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). (SEDRA E SMITH, 2007)

⁶ O transistor foi inventado nos Laboratórios da Bell Telephone em dezembro de 1947 (e não em 1948 como é frequentemente dito) por Bardeen e Brattain. Descoberto acidentalmente durante os estudos de superfícies em torno de um diodo de ponto de contato por assim dizer, visto que eles estavam procurando um dispositivo de estado sólido equivalente à válvula eletrônica. Os Laboratórios Bell mantiveram essa descoberta em segredo até junho de 1948 (daí a confusão com as datas de descobrimento)



Figura 2.6: Encapsulamento de Amplificador Automotivo TDA 7385.

Fonte: www.datasheetcatalog.net/pt/datasheets_pdf/T/D/A/7/TDA7385.shtml.

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de encapsulamento de um amplificador utilizado em rádios automotivos. Neste caso, o TDA7385, é o amplificador utilizado em uma das amostras que fará parte dos experimentos propostos neste trabalho.

Um amplificador funciona basicamente aumentando a potência de sinais de áudio oriundos de diversas fontes. Os sinais de áudio, ou a própria música, provém de fontes de informação que podem ser provenientes de alguma mídia de armazenamento, ou a mais comum, a demodulação dos sinais de rádio oriundos da recepção da antena do rádio. (PIRES, 2010).

Todos estes itens citados anteriormente, através de leitores, ou processamento de dados, acabam gerando um sinal de áudio de baixa amplitude, que dará início ao fluxo percorrido pelo sinal de áudio no sistema de áudio automotivo, descrito pela Figura 2.7.



Figura 2.7: Fluxo do Sinal de áudio em um rádio.

Mesmo existindo diferentes maneiras de se obter um sinal de áudio, esse sinal quando reproduzido, possui uma amplitude muito baixa de tensão, normalmente na casa dos milivolts. Desta maneira torna-se inviável reproduzir tal sinal em alto-falantes medianos, como no caso dos automóveis, que geralmente, não como regra, são alto-falantes de seis polegadas de diâmetro que trabalham com potências até 35 Watts RMS. Devido a essa baixa amplitude de sinal, falta potência para que haja excursão dos cones dos alto-falantes, portanto se vê necessário a amplificação do sinal de áudio para que este possa ser escutado pelo ouvinte. Logo, um sinal oriundo de uma fonte externa, leitor ou dados de memória é processado e enviado a etapa de amplificação, para que possa ser transmitido aos alto-falantes espalhados no interior do veículo.

2.5 Estágios ou andares de amplificação

Como dito anteriormente, os sinais resultantes da captação de ondas sonoras de microfones, leitores, ou qualquer tipo de transdutor elétrico, apresenta valores muito baixos de tensão. Glen Ballou, em seu livro "Handbook for Sound Engineers", , afirma existir dois níveis de tensão a ser tratados em pequenos sinais de áudio. O primeiro é o nível de instrumento, como dito anteriormente, na casa de dezenas de milivolts, geralmente obtidos na saídas dos microfones, e transdutores elétricos. O segundo, é o nível de linha, com uma tensão de valor normalizado de 0,775 Volts eficazes correspondente a uma potência de 1 mW aplicada em uma carga resistiva de 600Ω . Desta maneira, têm-se inicialmente diferentes etapas de amplificação.

O amplificador responsável por elevar o sinal de um nível de instrumento para o nível de linha e efetuar seu condicionamento, é denominado pré-amplificador, constituindo assim um primeiro estágio de amplificação. O segundo é responsável por elevar a tensão e nível de linha, a uma potência suficiente exigida para que possa ser ligado em alto-falantes e dispositivos do gênero. (PIRES, 2010).

A maioria dos amplificadores utilizados para áudio, utilizam uma arquitetura formada por três estágios de amplificação, conforme esquema de divisão da Figura 2.8. (SELF,1996)

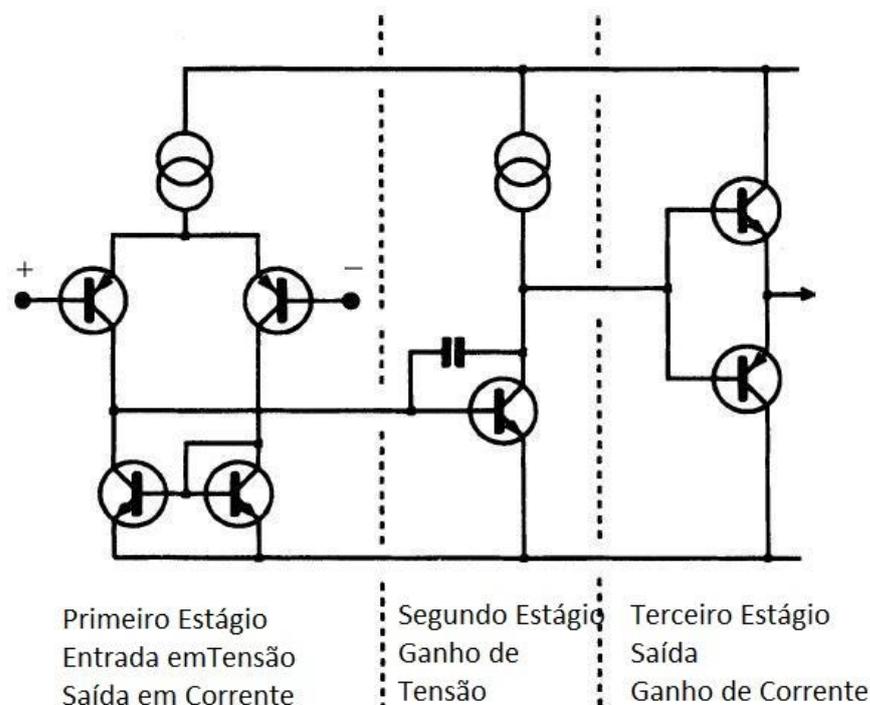


Figura 2.8: Amplificador utilizando 3 estágios. Figura adaptada e traduzida de: Self, Douglas, "Áudio Power Amplifier Design Handbook", 3^o Edição, pág 31.

O primeiro estágio se baseia em um amplificador de transcondutância, ou seja, possui uma entrada em tensão e saída em corrente, e é constituído geralmente por um arranjo de par diferencial. Uma das principais vantagens da utilização do par diferencial é a de se verificar uma grande rejeição do modo comum, ou seja, apenas é amplificado os sinais diferenciais que lhe são aplicados. O segundo estágio se baseia no andar da transimpedância, possuindo uma entrada em corrente e saída em tensão. Geralmente é constituído por um arranjo de emissor comum. Já o terceiro corresponde a um estágio de ganho unitário em tensão, apresentando ganho apenas em corrente. Geralmente é constituído de um arranjo do tipo push-pull⁷, baseado em dois seguidores de emissor complementares. (PIRES, 2010).

Existem outros tipos de arquitetura utilizados como, por exemplo, a de dois estágios, Figura 2.9. Nesta arquitetura ocorre a fusão entre o estágio intermediário e o estágio de saída. (SELF, 1996)

⁷ Circuito Push-pull é o nome dado ao arranjo de amplificação utiliza um par de transistores complementares, exemplo, um *nnp* e um *npn* com intuito de cada transistor seja responsável por amplificar um semi-ciclo do sinal de entrada.

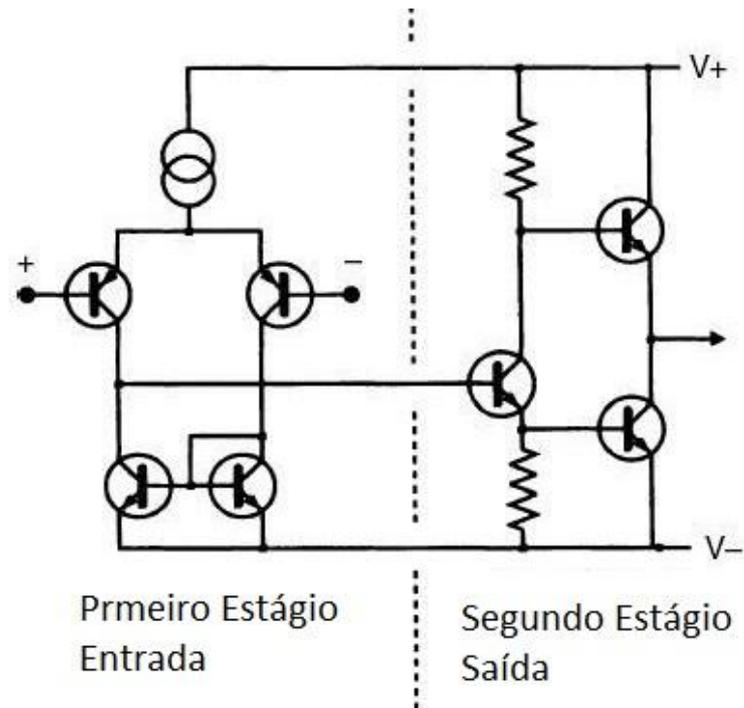


Figura 2.9: Amplificador utilizando 2 estágios. Figura adaptada e traduzida de: Self, Douglas. "Áudio Power Amplifier Design Handbook", 3^o Edição, pág.33.

Quanto à tipologia de amplificadores, é o último andar que define o tipo de classe de funcionamento do amplificador. É esperado que este estágio possua as seguintes características:

- baixa impedância de saída, para que a tensão aplicada à impedância da carga seja maximizada;
- alta impedância de entrada;
- ser capaz de fornecer a corrente necessária para alimentar a carga com a potência pretendida;
- não introduzir ruído no sinal amplificado.

2.5.1 Estágios de saída de amplificadores de áudio

Como o próprio nome o caracteriza, o estágio de saída de um amplificador de potência é o último andar de amplificação que o sinal de áudio irá percorrer. Sua função mais importante é fazer o acoplamento com uma resistência de saída baixa, de modo que o conjunto de estágios do amplificador possa fornecer em sua saída um sinal para a carga sem queda de ganho. Se tratando do último estágio, nessa etapa os sinais já possuem amplitudes relativamente altas, o que evidencia o não uso das aproximações e modelos para pequenos sinais.

A qualidade de projeto deste estágio, baseando-se na importância da linearidade de resposta, se dá em função da distorção harmônica total (SEDRA e SMITH, 2007).

A distorção harmônica total, THD (*Total Harmonic Distortion*) é o valor eficaz dos componentes harmônicos do sinal de saída, excluído do fundamental, expresso como uma porcentagem eficaz do valor deste. (SEDRA e SMITH, 2007).

Um amplificador de potência com alta fidelidade, apresenta uma DHT da ordem da fração de 1%, ou seja deve possuir no máximo este valor. A maior exigência no projeto de um estágio de saída é que ele forneça uma quantidade de potência exigida pela carga de modo eficiente, ou seja, a potência dissipada nos transistores deste estágio deve ser a menor possível. Existem duas razões para que se busque essa exigência. A primeira ocorre pelo fato que ao dissipar muita potência, o transistor aumenta sua temperatura da junção, e pode ser destruído caso ultrapasse sua temperatura máxima de funcionamento (faixa de 150 à 200 °C em dispositivos de silício). A segunda, fruto de estudo de tal trabalho, é o prolongamento da vida das baterias que alimentam tal circuito, permitindo o uso de baterias menores e fontes de alimentação de baixo custo evitando blocos de dissipação de calor. (SEDRA e SMITH, 2007)

Um amplificador de potência é, portanto, um amplificador com estágio de saída de alta potência, e sua classificação é dada de acordo com a configuração utilizada em seu último estágio, podendo ser classificado de diferentes maneiras, à exemplo das classes A, B, AB, C, D, dentre várias outras.

Como neste trabalho aborda e investiga o desempenho das classes AB e D, é previamente estudado as classe que antecedem estas a fim de entender melhor seu funcionamento, assim como suas vantagens e desvantagens.

2.6 Classes de estágio de saída

Segundo Bortoni (2007), um amplificador de potência é classificado de acordo com o modo como os transistores do seu estágio de saída operam, na tentativa de obter maior linearidade, menor distorção e maior rendimento. Esta classificação, evidencia a evolução do estado da arte dos amplificadores.

Se tratando de amplificadores que utilizam transistores, a primeira classe a surgir foi a classe A, em seguida a classe B, dentre outros arranjos, inclusive uma classe denominada classe D, que utiliza chaveamento para realizar amplificação de sinais. A seguir será abordado o arranjo estrutural, funcionamento e rendimento teórico de algumas das principais classes de amplificadores.

2.6.1 Classes A

Dentre as classes tratadas é a mais antiga, surgiu em meados de 1917. Esta classe apresenta a melhor característica de linearidade entre todas, apresentando baixa distorção, mas também possui o menor rendimento que, idealmente, não passa de 50%, quando se utiliza a configuração push-pull. (BORTONI, 2007)

O baixo rendimento ocorre devido ao fato de que os transistores de saída estão sempre em condução, pois existe uma corrente de polarização constante, com valor no mínimo igual a metade da máxima corrente de carga. Esta polarização está presente mesmo quando o sinal de entrada é nulo, ou seja, mesmo quando não solicitado potência na saída do amplificador, este consome um valor bastante significativo de energia do sistema. (BORTONI, 2007)

Devido essa baixa eficiência energética, o uso de amplificadores classe A é inviável na parte de potência de equipamentos alimentados por baterias. Geralmente é utilizado em etapas intermediárias, onde a potência dissipada é pequena, por exemplo, em pré-amplificadores.

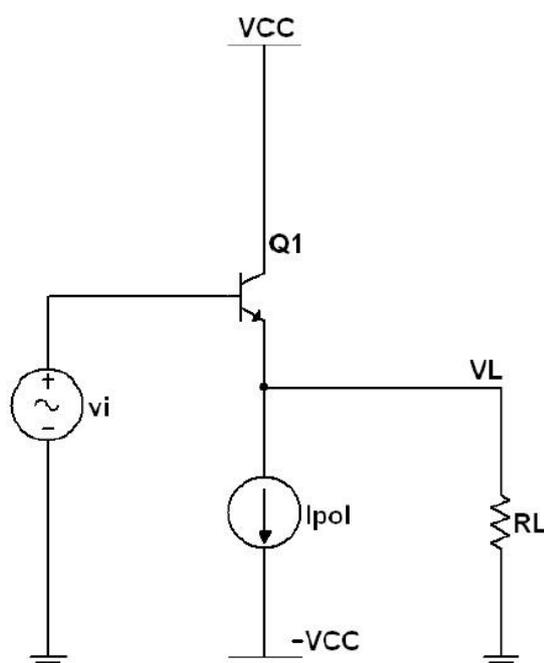


Figura 2.10: Circuito Classe A, configuração seguidor de emissor.

Fonte: PIRES (2010).

A Figura 2.10 apresenta um modelo do circuito que utiliza a configuração seguidora de emissor, muito utilizada em amplificadores classe A. O circuito, assim como os circuitos das outras classes que serão apresentados, possui uma fonte de alimentação do sistema, representado pela fonte V_{CC} e uma fonte de sinal de entrada V_i , que neste caso representa a saída do estágio antecessor, já que estamos falando de estágio de saída de amplificadores. A carga (alto-falante) é representada no circuito pela carga R_L , e a fonte de corrente I_{pol} , se faz necessária para manter o transistor polarizado durante a operação para que possa ser realizada a amplificação do sinal de entrada.

2.6.2 Classes B

Na classe B, conforme Bortoni (2007), o período em que os transistores estão conduzindo é menor que na classe A. Os transistores conduzem somente quando há presença de sinal na entrada. Porém, por esse motivo é necessário o uso de um par de transistores, já que cada um fica destinado a conduzir somente em um dos semi-ciclos do sinal de entrada.

Devido a essa configuração, a classe B apresenta um ótimo rendimento, podendo chegar na ordem de 78.5. Porém, esse aumento de rendimento tem o seu preço. Durante a transição da operação de um transistor para outro há uma interrupção do sinal de saída, pois o nível do sinal de entrada não é suficientemente grande para por os transistores em condução. Ocorre nesse intervalo, uma distorção de cruzamento, chamada de distorção de crossover, que prejudica a linearidade do sinal de saída em função do sinal de entrada. (BORTONI, 2007)

Resumindo, esta classe apresenta um ótimo rendimento, porém, ao mesmo tempo, uma distorção de crossover em sua saída.

A Figura 2.11 apresenta o circuito comum utilizado na classe B em configuração pushpull utilizando um par de transistores complementares, que se revezam na condução durante os semiciclos referentes ao sinal de entrada.

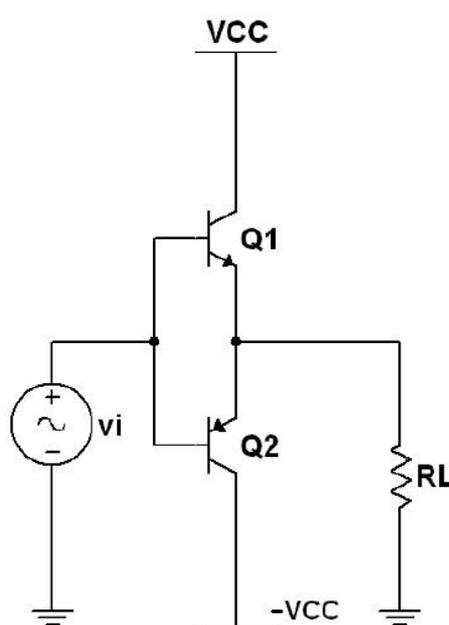


Figura 2.11: Amplificador Classe B, configuração push-pull.

Fonte: Francisco José Amorim Pires (2010).

O circuito da Figura 2.11 contém uma fonte de alimentação V_{CC} , uma fonte de sinal de entrada V_i , a carga R_L , e o par de transistores complementares que realizam a amplificação do sinal de entrada, Q_1 e Q_2 .

Segundo Bortoni (2007), a distorção causada pela comutação de condução entre os dois transistores não é desejada, pois danifica o sinal de saída do amplificador,

modificando o comportamento do mesmo. Esta distorção de crossover resultante na saída deste circuito é representada em acordo com o gráfico da Figura 2.12.

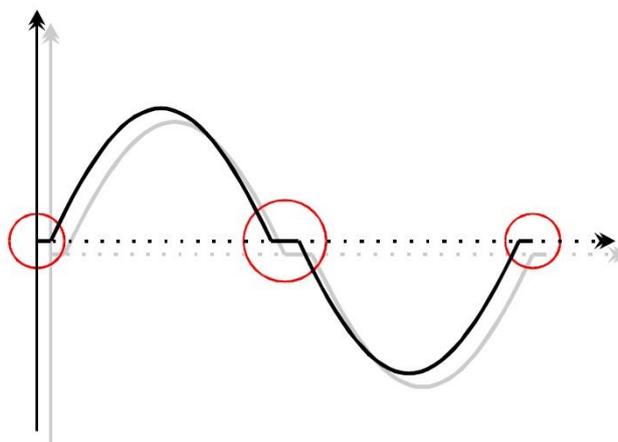


Figura 2.12: Distorção de Crossover.

Fonte: BORTONI (2007).

2.6.3 Classes AB

O estágio de saída do tipo classe AB, Figura 2.13, como o próprio nome sugere, utiliza princípios das duas classes anteriores, classe A e B.

Basicamente, é utilizado o princípio de funcionamento da Classe A, de amplificar o sinal sem introduzir distorção e o princípio utilizado na classe B, que utiliza dois dispositivos que se revezam na condução do ciclo do sinal de entrada. (BORTONI, 2007)

Na classe AB, os dois transistores se encontram ligados (em condução) ao mesmo tempo por um curto período, como uma tentativa de se evitar a distorção de crossover, fazendo com que o sinal amplificado continue a ser linear durante a passagem por zero no sinal de entrada. (PIRES, 2010)

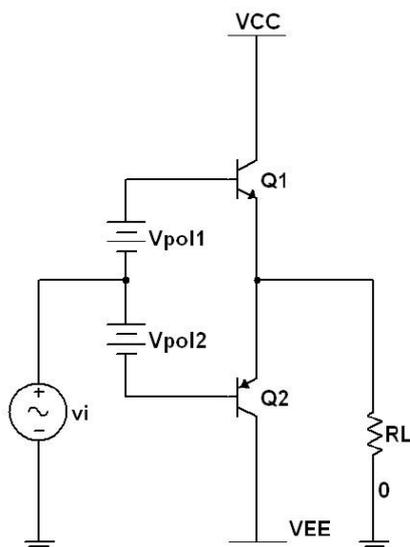


Figura 2.13: Esquema de Amplificador Classe AB.

Fonte: (PIRES, 2010).

Observe pela figura 2.13, que entre os transistores aparece duas fontes utilizadas para a polarização dos mesmos, V_{pol1} e V_{pol2} , que garante a condução no intervalo onde anteriormente, na classe B, os transistores entrariam em corte, evitando assim a distorção de crossover.

O rendimento apresentado pela classe AB, apresenta valores entre rendimentos da Classe A e B, evidenciando assim o que se deseja em cada projeto, dependendo da escolha do comportamento desejado para tal classe. A Figura 2.14 apresenta um gráfico do rendimento teórico de um amplificador classe AB.

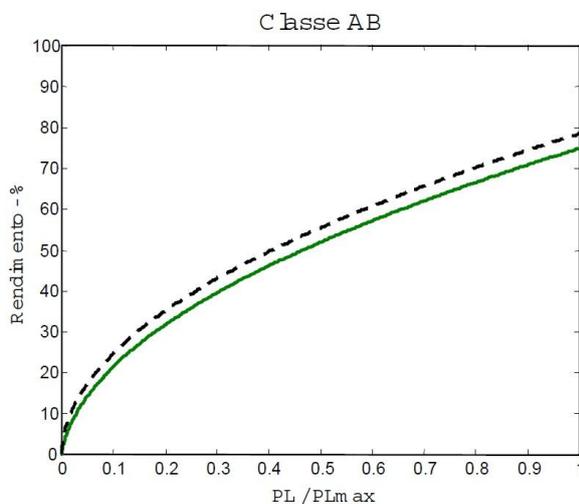


Figura 2.14: Rendimento Amplificador Classe AB.

Fonte: BORTONI (2007).

2.6.4 Classes D

Com o intuito de aperfeiçoar o desempenho energético dos amplificadores, foi criada uma nova classe, a classe D, que tem se tornado muito popular nos últimos anos.

Os amplificadores classe D, ou também chamados, amplificadores chaveados, utilizam interruptores de potência controlados, acionados por uma modulação baseada em largura de pulso, PWM (*Pulse Width Modulation*), resultante da comparação de um sinal de entrada (sinal a ser amplificado) com uma onda triangular de frequência no mínimo dez vezes maior que a frequência máxima do sinal de entrada. (PIRES, 2010)

Conforme Bortoni (2007), o valor teórico para a frequência da onda triangular da etapa de comparação, é de 20 KHz.

A Figura 2.15 apresenta um exemplo desta comparação de sinais e o valor resultante da mesma.

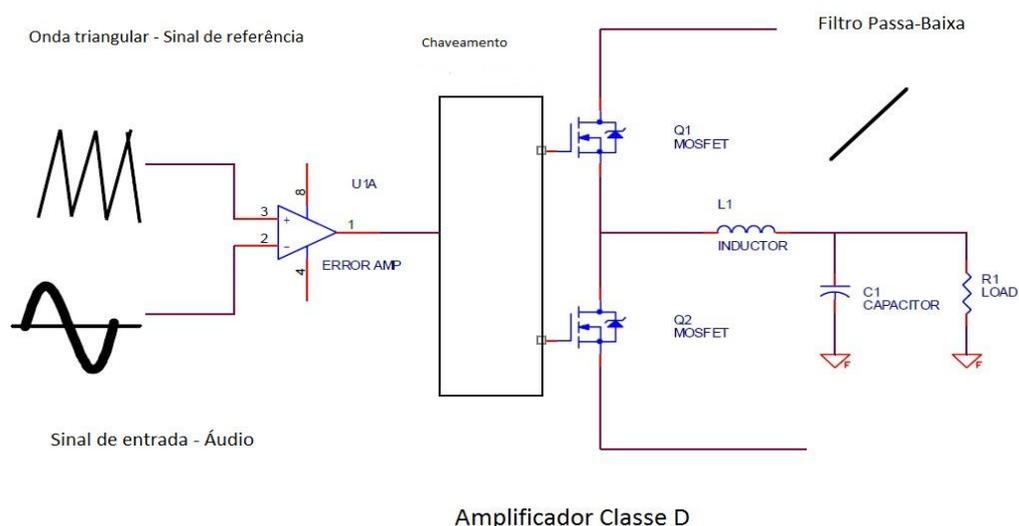


Figura 2.15: Circuito típico de um arranjo classe D. Figura traduzida e adaptada da dissertação "Amplificador Classe D" de Francisco José Amorim Pires, 2010.

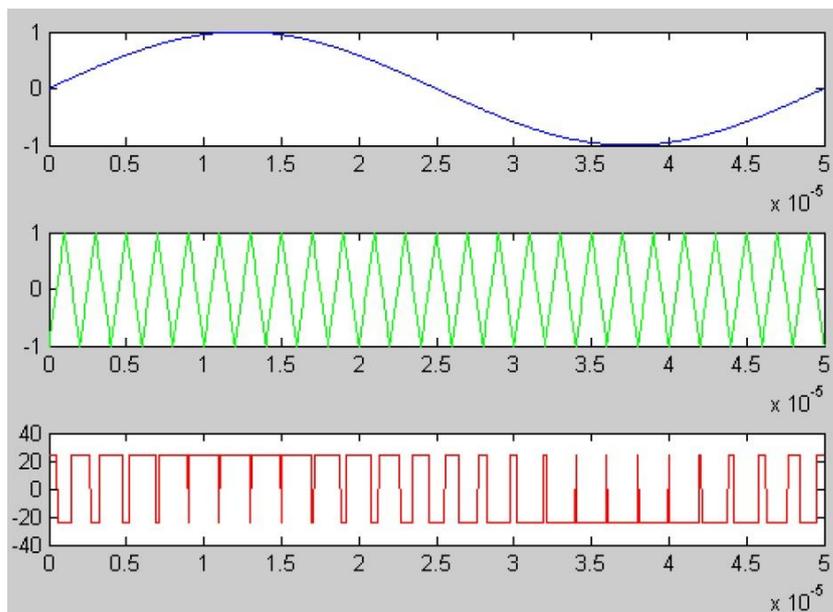


Figura 2.16: Comparação de Sinais para PWM. Figura adaptada da dissertação "Amplificador Classe D" de Francisco José Amorim Pires, 2010.

O resultado dessa comparação é um sinal em forma de onda quadrada, gráfico em vermelho na Figura 2.16, cuja largura do pulso varia proporcionalmente à amplitude do sinal de entrada, ou seja, o áudio. Esse sinal (onda quadrada) é aplicado ao estágio de potência (transistores como "chaves"), que por sua vez o envia à carga através de um filtro passa-baixas, que irá recuperar o formato de onda original do sinal. A esse princípio dá-se o nome de "Modulação por Largura de Pulso" - PWM (Pulse Width Modulation). (PIRES, 2010)

A classe D apresenta um rendimento muito alto, próximo à 90%, conforme Figura 2.17, porém não possui a qualidade de baixa distorção, relativa, que um amplificador contínuo classe A e AB possui, variando de acordo com projetos. (BORTONI, 2007)

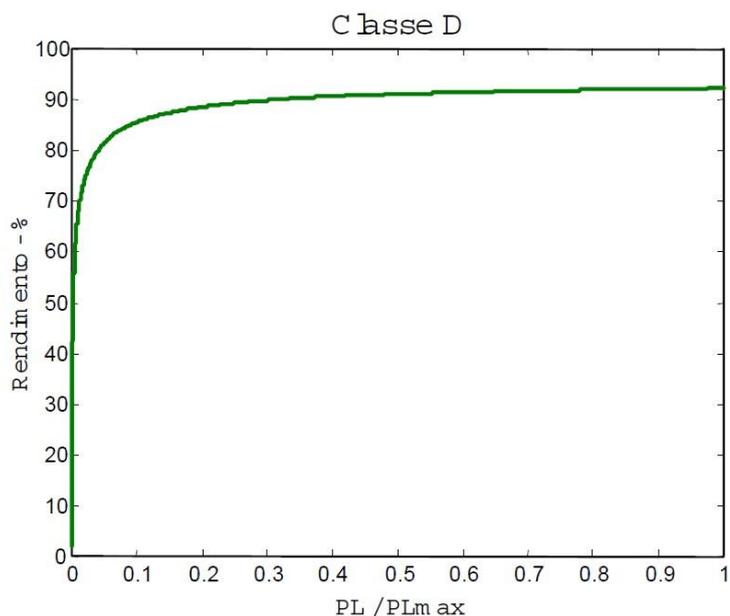


Figura 2.17: Rendimento Amplificador Classe D.

Fonte: BORTONI (2007).

2.7 Figuras de Mérito

Devido as diferentes topologias existentes nos amplificadores de áudio, ocorre uma relação interessante entre rendimento do amplificador e qualidade do som amplificado. Normalmente, sistemas que possuem alto rendimento, acabam por apresentarem maiores distorções, da mesma maneira que sistemas que possuem menores distorções possuem um maior valor de rendimento. (PIRES, 2010)

O uso de topologias híbridas, que misturam características de mais de uma classe, como por exemplo, a Classe AB aparece como uma possível solução.

Porém, o parâmetro distorção não é o único que deve ser considerado na avaliação de um amplificador de áudio. Há outros parâmetros técnicos relevantes como a impedância, resposta em frequência, relação entre sinal e ruído, dentre outros, que serão tratados a seguir. (IEC-60268-3, 2000)

Conforme mencionado acima, as figuras de mérito e os métodos de medição aceitos pela comunidade científica e pela indústria são reunidos em normas internacionais, como por exemplo, a IEC 60268-3.

Esta norma trata exclusivamente da qualidade exigida de amplificadores de potência para sinais de áudio, e apresenta características a serem especificadas e seus métodos de medição.

2.7.1 Impedância

Um amplificador de áudio possui uma ou mais entradas de sinal como dito anteriormente. Cada uma dessas entradas é caracterizada pelo seu valor de impedância de entrada e sua sensibilidade. Esta sensibilidade se trata de um valor de tensão que deve ser aplicado ao amplificador para que o sinal de entrada seja de fato amplificado. Geralmente, os valores da impedância, devem ser estipulados para que sejam obedecidos os seguintes conceitos: (MARKUS, 2002)

- O valor da impedância de saída da fonte de sinal deve ser menor ou igual ao valor da impedância de entrada do amplificador;
- O valor de tensão mínima produzida pela fonte de sinal, deve ser maior ou igual a sensibilidade do amplificador;

O valor da impedância de um amplificador deve ser um dado fornecido pelo seu fabricante com o intuito de sempre se usar alto-falantes corretos para determinado amplificador. É esperado que a impedância equivalente ideal dos alto-falantes seja igual ou superior à de saída do amplificador, o que garante a condição de máxima transferência de potência do alto-falante. (MARKUS, 2002)

No entanto, a impedância equivalente dos alto-falantes deve ser maior que a impedância de saída do amplificador, para que aumente a transferência de tensão e garanta um elevado fator de amortecimento (FA). O fator de amortecimento (*damping factor*), é uma relação entre a impedância equivalente dos alto-falantes e a impedância de saída do amplificador. Esse valor é correlacionado diretamente ao controle do amplificador sobre o movimento dos alto-falantes. Não é aconselhável o uso de um ou mais alto-falantes associados, em que a impedância equivalente possa ser menor a impedância de saída do amplificado. Esta situação pode causar sobrecarga na etapa de saída, o que a deixa sob-risco. (MARKUS, 2002)

2.7.2 Distorção Harmônica Total

Quando se realiza a amplificação de um sinal de áudio, o produto final além da amplificação em si, é o bom aproveitamento energético do sistema utilizado, ou seja, é visado que grande parte da energia utilizada na operação seja destinada diretamente à carga, ao mesmo tempo buscando a menor distorção possível na onda de saída, buscando uma alta linearidade do amplificador. (MARKUS, 2002)

Se falando de qualidade de áudio, quanto menor a distorção de um amplificador, melhor será sua qualidade. Entende-se de maneira geral, que a distorção é qualquer alteração introduzida no sinal que não seja apenas e só na amplitude da onda, ou seja, diferenças presentes entre sinal de entrada e saída excluindo a diferença de amplitude do sinal. (BORTONI, 2007)

Uma das maneiras de se medir a distorção presente em um sinal de áudio, é o cálculo da distorção harmônica total, a THD. (BORTONI, 2007)

A THD é caracterizada pelo valor eficaz dos componentes harmônicos do sinal de saída, excluindo o fundamental, expresso com uma porcentagem eficaz do fundamental. Um amplificador de potência de alta fidelidade deve apresentar um THD da ordem de uma fração de 1%. (SEDRA E SMITH, 2007)

$$DHT = \frac{e_H}{e_F} \quad [w] \quad (1)$$

sendo:

DHT – Distorção Harmônica Total

e_H - valor eficaz total dos harmônicos

e_F - valor eficaz da fundamental.

A distorção harmônica total é normalmente expressa em % ou dB:

$$DHT \% = DHT \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Ou

$$DHT_{dB} = 20 \log DHT \quad [dB] \quad (3)$$

A análise dos sinais de entrada e saída quanto à resposta de frequência é uma boa maneira de se visualizar a presença de distorção. Se no sinal de saída, for adicionado frequências diferentes das que inicialmente compunham o sinal original a razão entre estas frequências adicionais e as originais indicará uma distorção do sinal. (PIRES, 2010)

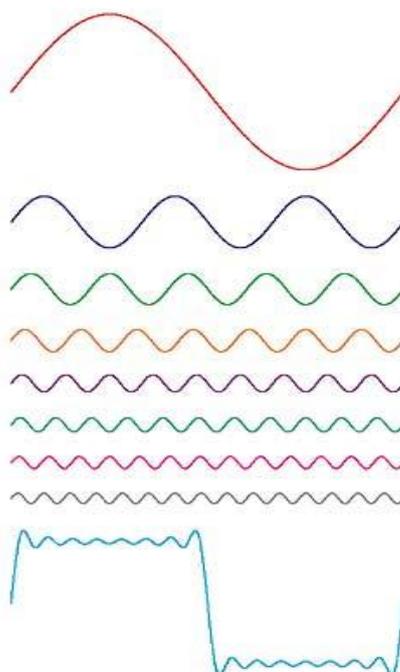


Figura 2.18: Distorção Harmônica Total.

Fonte: <http://www.musitec.com.br/blogs/classicos/?c=76>

A Figura 2.18 apresenta um exemplo de como uma frequência fundamental, em vermelho, e seus harmônicos somados ao sinal de entrada, formam uma onda quadrada na saída, em azul. Neste exemplo, a forma de onda apresentada possui apenas harmônicos ímpares e a amplitude de cada harmônico é inversamente proporcional à sua ordem.

2.7.3 Distorção por Intermodulação

Outra forma de distorção ocorrente na amplificação de áudio é a distorção por intermodulação. Novamente, devido a não linearidade do amplificador, muitos sinais interagindo entre si dão origem a outro sinal diferente dos demais. Isso acaba gerando componentes espectrais que não se encontravam no sinal de entrada. (PIRES, 2010)

Esses harmônicos têm frequências correspondentes à soma e à subtração das frequências dos sinais de entrada. (BORTONI, 2007)

Os testes para avaliar este tipo de distorção normalmente usam um sinal de baixa frequência e grande amplitude com um sinal de alta frequência e baixa amplitude, por exemplo, verificando-se depois, o quanto a amplitude do sinal de alta frequência é modulado pelo da baixa frequência.

Um método bastante utilizado é o SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers), onde dois sinais, um de 60 Hz e outro de 7 kHz, são aplicados numa proporção de 4:1, medindo-se o quanto houve de intermodulação no sinal de 7 kHz. (BORTONI, 2007)

A Figura 2.19 apresenta um exemplo de distorção por intermodulação presentes em um sinal composto das frequências de 60Hz e de 7kHz. Ocorrem o aparecimento da distorção de intermodulação, dadas pela diferença das frequências de entrada (6940Hz) e soma (7060Hz), assim como a distorção harmônica total, dadas pelos múltiplos das frequências de entrada, como 180Hz, 300Hz, 14kHz e 21kHz.

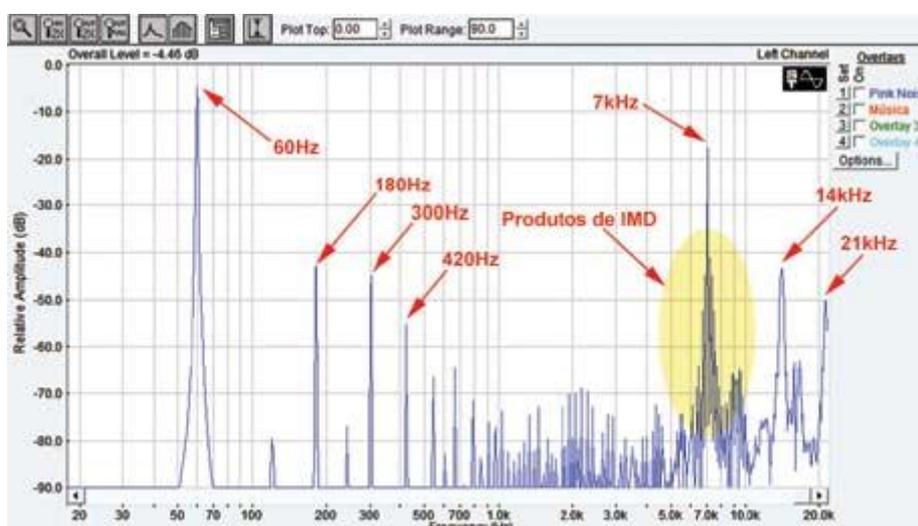


Figura 2.19: Exemplo de Distorção por Intermodulação entre 60Hz e 7KHZ.

Fonte: <http://www.musitec.com.br/blogs/classicos/?c=76>

2.7.4 Potência RMS

A potência denominada RMS, é definida como a potência que o amplificador pode fornecer ao alto-falante sem que haja distorção harmônica superior ao valor de 0,1% de THD. O valor da potência é expresso em watts (RMS).

A potência de saída de um amplificador é um importante critério para projetos sonoros, portanto em projetos e especificações, deve-se sempre utilizar o valor de potência expresso em watts RMS.

Em acordo com Bortoni (2007), a potência de saída de um amplificador de áudio, (P_{out}), é obtida através da seguinte equação:

$$P_{out} = \frac{V_{RMS}^2}{R_L} \quad [W] \quad (4)$$

V_{RMS} : tensão eficaz do sinal de saída de áudio;

R_L : valor da impedância nominal do alto-falante;

Se tratando de alto-falantes veiculares, o valor de R_L de cada alto-falante é de aproximadamente de 4 ohms.

Não se deve confundir o termo potência com volume.

O que determina o volume de um sistema é sim, o valor da potência, diretamente proporcional, maior potência, maior volume, porém é deve ser levado em consideração o valor de eficiência eletroacústica do sistema de alto-falantes. A eficiência eletroacústica do sistema de alto-falantes, especificada em dB/watt a 1 metro, é tão importante quanto a potência. Por exemplo: uma caixa acústica que fala 101dB/W a 1m, alimentada com modestos 10 watts, fornece mais volume sonoro que uma outra que rende 88dB/W a 1m, alimentada por 100 watts. (MARKUS, 2002)

2.7.5 Resposta em frequência

A resposta de frequências é a característica comum a todos os componentes de um sistema de áudio. Sempre se deseja que um sistema tenha resposta plana variando de 20 Hz a 20 kHz, ou ainda melhor, possui uma resposta entre 0 e -3dB, ou seja, deve ser capaz de reproduzir com mesma magnitude e fase, as frequências referentes aos graves, médios e agudos de qualquer tipo de sinal de entrada. (BORTONI, 2007)

2.7.6 Relação sinal/ruído

A relação sinal/ruído é a razão, expressa em dB, entre a potência máxima de saída RMS e a potência do ruído de fundo do amplificador. É um parâmetro que indica à imunidade do amplificador ao ruído. (MARKUS, 2002)

Esta relação é apresentada por:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \quad [W] \quad (5)$$

Onde:

S : Sinal Amplificado;

N : Sinal de Ruído;

P_{sinal} : Potência do sinal em Watts;

$P_{ruído}$: Potência do sinal de ruído em Watts

Segundo Bortoni (2007), quanto maior for a relação S/N, melhor será a qualidade do amplificador já que já que o sinal amplificado será muito maior que o ruído. Esta relação é expressa em dB, caso os valores do sinal e ruído sejam dados em Volts, temos que:

$$\frac{S}{N} (dB) = 20 \log \left(\frac{S}{N} \right) \quad (6)$$

Caso S e N sejam dados em Watts, temos que:

$$\frac{S}{N} (dB) = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right) \quad (7)$$

3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Neste trabalho, o levantamento do modelo visa obter um melhor conhecimento sobre a principal interface do amplificador, que é o alto-falante, e já, preparar a banca de testes para uma próxima etapa de projeto futuro que serão os testes utilizando alto-falantes. O modelo também, nos serve para se ter uma noção do real comportamento de um alto-falante, visto que nos testes iniciais serão utilizadas cargas resistivas que demonstra a impedância nominal do alto-falante, podendo servir de bases para novos estudos sobre o quanto o comportamento mecânico de um transdutor pode influenciar na potência consumida pelo mesmo, já que o alto-falante demanda de valor elevado de potência em seu funcionamento.

3.1 Alto-falante

Um alto-falante, de uma maneira geral é um transdutor eletroacústico, no qual a transdução segue um procedimento elétrico-mecânico-acústico, ou seja, converte energia elétrica em energia mecânica e através de vibrações, energia mecânica em acústica. (YAMAPI, CHABI OROU E WOAFO, 2003).

Em seu funcionamento ocorre uma transdução de duas etapas a primeira, pelo transdutor eletromagnético, chamado de "motor" devido à geração de movimentos, e a segunda transpassada ao segundo transdutor, o mecânico-acústico, que é chamado de "diafragma". O alto-falante mais comum é o Eletrodinâmico, também conhecido como alto-falante de a bobina móvel. (YAMAPI, CHABI OROU E WOAFO, 2003).

Em um alto-falante é possível observar a operação simultânea de três sistemas distintos interligados, Figura 3.1:

1. O sistema motor: composto pelo imã, peça polar, entreferro e bobina móvel;

2. O Diafragma: cone, fabricado de diversos materiais;
3. A Suspensão: constituída pela aranha e o anel de suspensão.

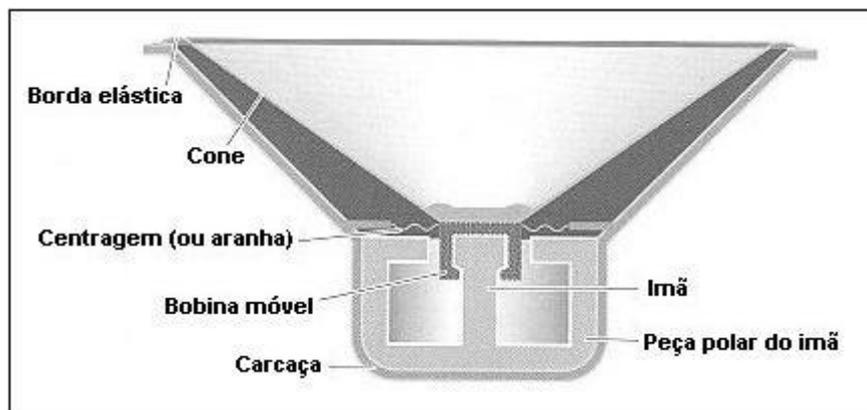


Figura 3.1: Esquema de Um Transdutor eletroacústico. Imagem ilustrativa. Fonte: http://www.burgoseletronica.net/altofalante_index.html.

3.1.1 Funcionamento de um alto-falante

O funcionamento de um alto-falante é baseado no seguinte conceito, um diafragma entra em movimento devido a presença de um campo eletromagnético modulado em amplitude, que atua em conjunto com um ímã permanente. Quando se aplica uma corrente à bobina móvel do alto-falante, é gerado um campo eletromagnético, perpendicularmente ao fluxo da corrente e também ao campo magnético existente pela presença do ímã permanente. A força mecânica resultante desta etapa obriga o diafragma (cone) a se deslocar em um sentido perpendicular ao campo magnético no entreferro, movimentando o ar em ambos os lados. Essa movimentação, ou vibração resultante, é que gera o som ouvido de maneira proporcional ao sinal aplicado no alto-falante. (KINSLER, 2000)

As especificações técnicas mais comumente conhecidas do falante são:

- Impedância Nominal;
- Sensibilidade;
- Resposta de Frequência;
- Potência;

Pode-se comparar o funcionamento de um alto-falante, ao funcionamento de um motor elétrico, onde o rotor seria substituído pela bobina móvel. Portanto é possível descrever o alto-falante em forma de um circuito equivalente, o que será buscado neste capítulo.

3.2 Modelo

A Figura 3.1 apresenta um esquema geral de funcionamento de um transdutor eletroacústico.

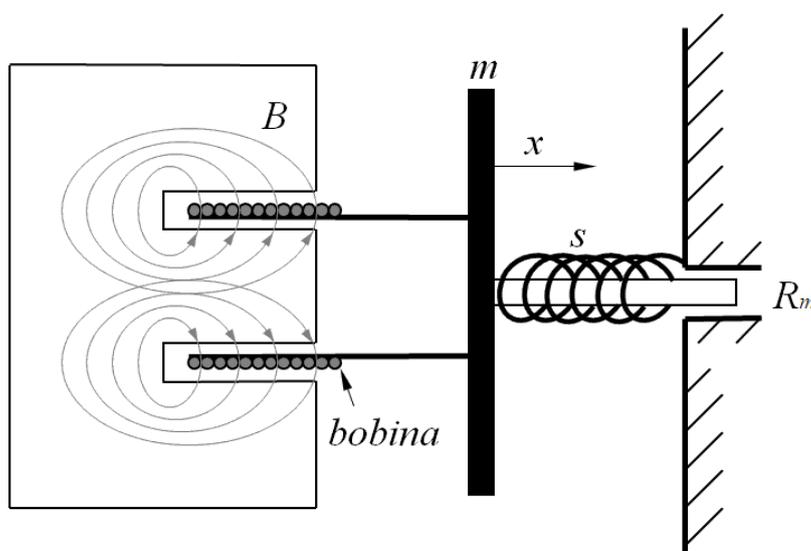


Figura 3.2: Esquema Funcionamento de um transdutor eletromecânico.

O funcionamento, segundo Lawrence E. Kinsler (2000) segue o seguinte raciocínio:

1. Uma bobina móvel de comprimento do condutor " L " é imersa num campo magnético com densidade de fluxo igual a B .
2. Uma corrente elétrica " I " percorre a bobina e produz uma força, denominada força de Lorentz, equação (7), no oscilador mecânico formado pela massa " m ", pela mola com elasticidade " s " e pela resistência mecânica " R_m ".

$$F_{Lorentz} = B \cdot I \cdot L \quad [N] \quad (7)$$

3. O movimento se dá na direção "x". Além disso, pela Lei de Lenz, uma tensão "V" é induzida nos terminais da bobina quando a massa se move com velocidade "u", ou seja:

$$V = B \cdot L \cdot u \quad [V] \quad (8)$$

O circuito equivalente para o alto-falante é mostrado na Figura 3.3.

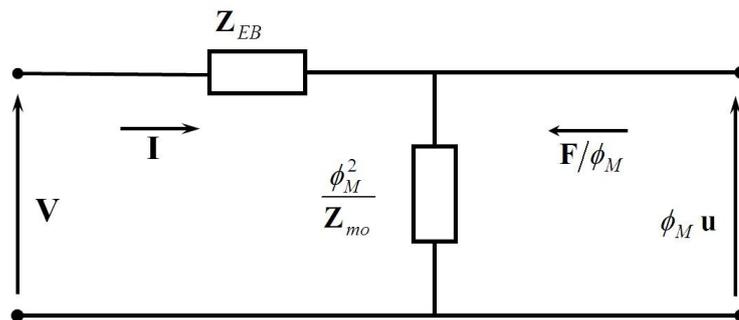


Figura 3.3: Circuito elétrico equivalente para um transdutor eletroacústico.

Fonte: KINSLER (2000)

Segundo Kinsler (2000), as equações canônicas que descrevem o transdutor eletroacústico podem ser descritas como:

$$V = Z_{EB}I + \phi_M u \quad (9)$$

$$F = \phi_M u I + Z_{mo} u \quad (10)$$

onde:

Z_{EB} : impedância vista no lado elétrico com a bobina imobilizada

Z_{mo} : Impedância vista no lado mecânico com o circuito elétrico em aberto.

Φ_M : coeficiente de transdução eletromecânica que neste modelo simplificado é real e constante.

O coeficiente de transdução eletromecânica utilizado para este modelo é dado por:

$$\Phi_M^2 = BL \quad (11)$$

Nesse modelo linear do alto-falante as impedâncias são dadas por:

$$Z_{EB} = R_O + j\omega L_O \quad (12)$$

$$Z_{mO} = R_m + j\left(\omega m + \frac{S}{\omega}\right) \quad (13)$$

onde R_O e L_O são a resistência e a indutância da bobina respectivamente.

Os parâmetros do modelo linear do alto-falante podem ser levantados experimentalmente a partir das análises das curvas de impedância elétrica do alto-falante. Esse experimento é realizado coletando o valor o valor de impedância do alto-falante operando ao ar livre, e em seguida operando com uma massa " M " adicionada ao seu conjunto móvel, quando excitado por um sinal de 2 Volts eficazes, variando de frequência. KINSLER (2000)

Com os valores destas curvas de impedância, através do conceito de oscilador mecânico, é possível relacionar a frequência de ressonância do transdutor com a elasticidade da mola e sua massa. KINSLER (2000)

Esta relação é apresentada pela seguinte equação:

$$\omega_o^2 = \left(\frac{S}{m}\right) \quad (14)$$

que, quando desenvolvida, é apresentada como:

$$m = M \cdot \left(\frac{\omega_{Ob}^2}{\omega_{Oa}^2 - \omega_{Ob}^2}\right) \quad (15)$$

Desta maneira sabendo-se os valores destas frequências, é possível obter os parâmetros para levantamento do modelo do transdutor.

Visando realizar um levantamento de modelo para estudo, e não simulação, na tentativa de aproximar tal estudo com os testes realizados, foi escolhido um alto falantes cujos parâmetros necessários para levantamento de modelo são conhecidos. Trata-se de um alto-falante do tipo veicular de diâmetro padrão de seis polegadas, aproximadamente 15,4 cm, do fabricante ASK, Figura 3.4.

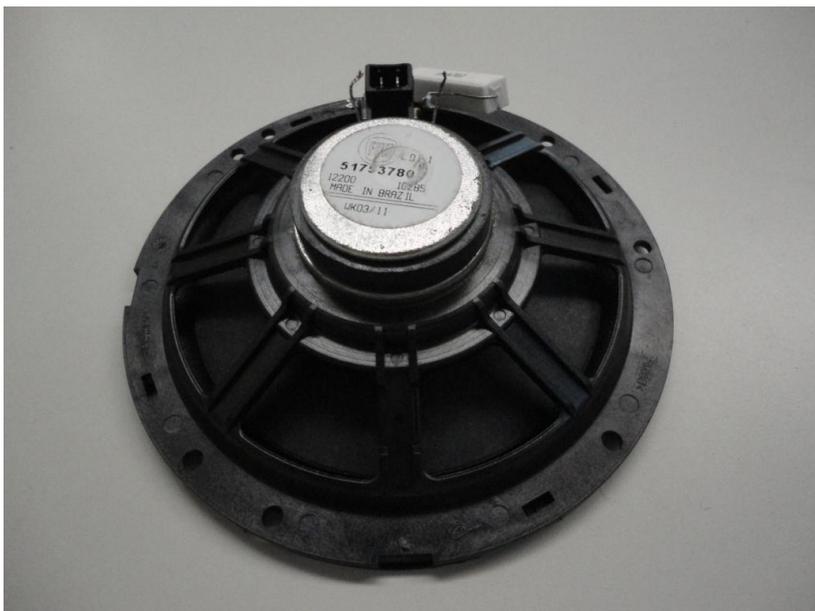


Figura 3.4: Alto Falante ASK, de 6 polegadas. Imagem Real do transdutor.

Este alto-falante é de posse do Laboratório de áudio do CEFET MG, e por esses motivos, devido a vários testes, alguns de seus principais parâmetros, como frequência de ressonância e curvas de impedâncias já são conhecidos e/ou já foram levantados em experimentos.

Sabendo que os valores das frequências de ressonância ω_{0a}^2 e ω_{0b}^2 deste alto-falante são respectivamente 42 e 73 Hz, podemos dar continuidade ao levantamento do modelo do mesmo, aplicando tais valores em (14).

Temos que a massa m do transdutor é igual à:

$$m = 0,01412 \cdot \left(\frac{42^2}{73^2 - 42^2} \right) = 0,00694 \quad [Kg] \quad (16)$$

Com o valor e m , é possível determinar o valor da elasticidade da mola, dado por:

$$s = m \cdot \omega_0^2 = 0,00694 \times (2\pi \cdot 73)^2 = 1459 \quad [N/m] \quad (17)$$

O fator de qualidade mecânico (QM) é um parâmetro que relaciona a frequência de ressonância e as duas frequências adjacentes:

$$QM = \left(\frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \right) \quad (18)$$

onde ω_1 e ω_2 são as frequências adjacentes, respeitando o fato de que $\omega_1 < \omega_2$. A resistência mecânica se relaciona com o fator de qualidade mecânico da seguinte maneira:

$$QM = \left(\frac{\omega_0 \cdot m}{R_m} \right) \quad (19)$$

logo:

$$R_m = \left(\frac{\omega_0 \cdot m}{QM} \right) = 0,00694 \cdot (2\pi(89 - 59)) = 1,31 \quad [N \cdot \frac{s}{m}] \quad (20)$$

Com esses dados, temos que os parâmetros para montagem do circuito equivalente ao alto-falante, após realizados todos os cálculos necessários são apresentados na Tabela 1.

A resistência R_0 é definida como o valor da parte real de Z_E para a menor frequência medida e a indutância L_0 é definida como aquela correspondente à reatância para a maior frequência medida.

O coeficiente de transdução é determinado pela expressão:

$$B.L^2 = (R_E(f_0) - R_0) * R_m \quad [T.m] \quad (21)$$

onde, $R_E(f_0)$ é a parte real de Z_E medida na frequência de ressonância.

Tabela 1 - Parâmetros do alto-falante

Parâmetros	Valor
R_0 (Ω)	3,9
L_0 (mH)	0,17
Bl (T.m)	2,28
m (g)	6,94
s (N/m)	1459
R_m (N.s/m)	1,31

O levantamento de modelo possibilita um melhor entendimento do funcionamento do transdutor eletroacústico, prevendo no futuro, projetos que venham a incorporar testes prático com alto-falantes.

3.3 Simulação

Com o intuito de exemplificar as características marcantes das classes citadas no trabalho, foram realizadas simulações de algumas tipologias de estágios de saída inclusive o da classe D.

Citado anteriormente é de conhecimento que amplificadores de classe A apesar de possuir um baixo rendimento, possui uma ótima qualidade do sinal de saída, ou seja, uma distorção muito pequena.

Já a classe B, possui a tão famosa distorção de crossover.

O Circuito básico da Figura 3.5 apresenta um típico estágio de saída classe B, onde um par de transistores complementares é disposto em configuração pushpull. O Sistema é alimentado por uma fonte de tensão contínua e o sinal de entrada possui frequência de 1kHz. A idéia aqui é apresentar as formas de saída das classes e não seu ganho de amplificação.

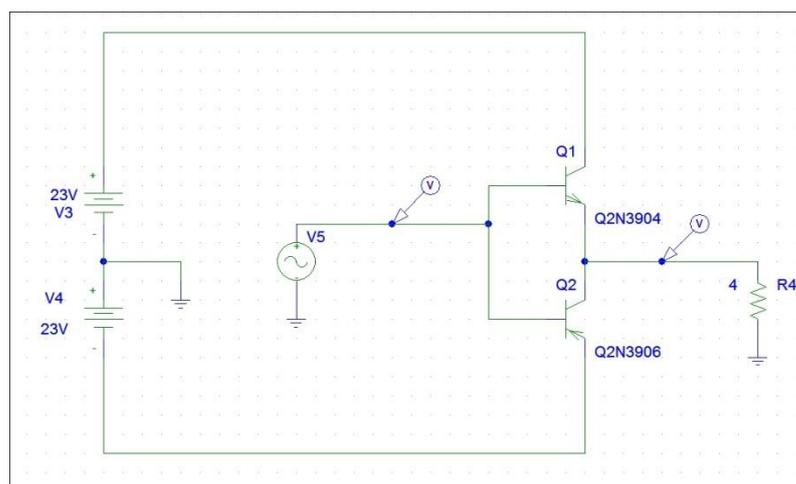


Figura 3.5: Circuito exemplo do estágio de saída do tipo Classe B.

Fonte: Circuito Utilizado na Simulação do PSpice .

A Figura 3.6 apresenta o sinal de saída deste estágio, que, mesmo se tratando de um circuito básico de exemplificação, demonstra a presença da distorção de crossover no sinal. Válido ressaltar que neste estágio o ganho do amplificador é realizado sobre o ganho de corrente, e que na simulação, o intuito é demonstrar em as formas de

saída das classes, evidenciando a teoria apresentada na fundamentação teórica do trabalho.

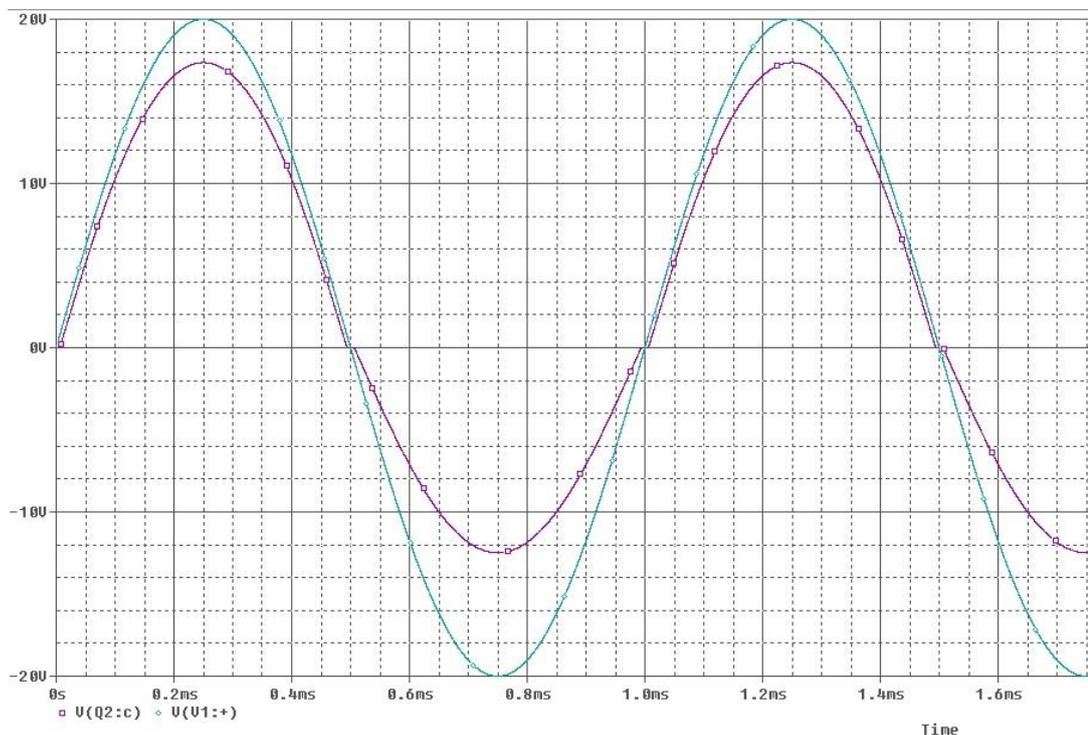


Figura 3.6: Comportamento apresentado na Saída Amplificador Classe B.

Fonte: Resultado da Simulação.

Esta distorção é evidenciada na Figura 3.7 detalhando o intervalo no qual o sinal passa pelo eixo das abscissas, ponto no qual os transistores não conduzem e o sinal de saída apresenta amplitude zero, fato que ocorre devido aos diferentes momentos em que cada transistor entra em condução.

Apesar de aparentar ser um pequeno desvio do sinal de entrada, esta distorção deve ser evitada a fim de não se poluir a etapa de amplificação do sinal desejado.

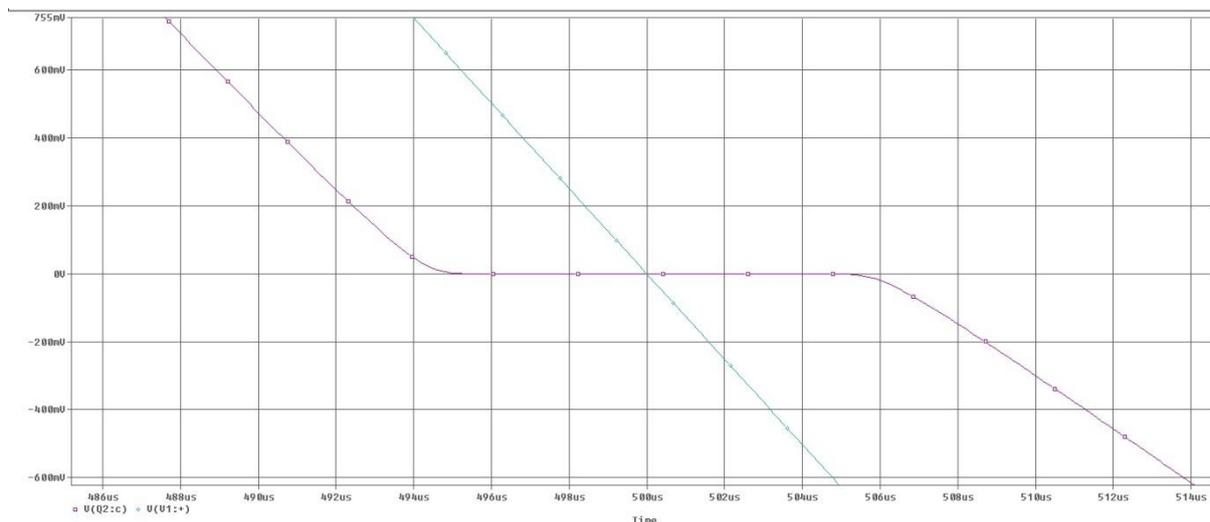


Figura 3.7: Distorção de Crossover.

Fonte: Resultado da Simulação.

Para se obter um circuito que evidencie a classe AB são implementados no circuito anterior, duas fontes de tensão que possuem a função de manter em condução, e polarizados, o par de transistores complementares. Essa mudança garante (em parte) que a distorção de crossover seja reduzida, pois reduzirá o tempo de não condução dos transistores, evitando que o sinal amplificado seja nulo mesmo que em um pequeno intervalo de tempo. O circuito simulado é apresentado pela Figura 3.8, e sinal referente a saída amplificada na Figura 3.9.

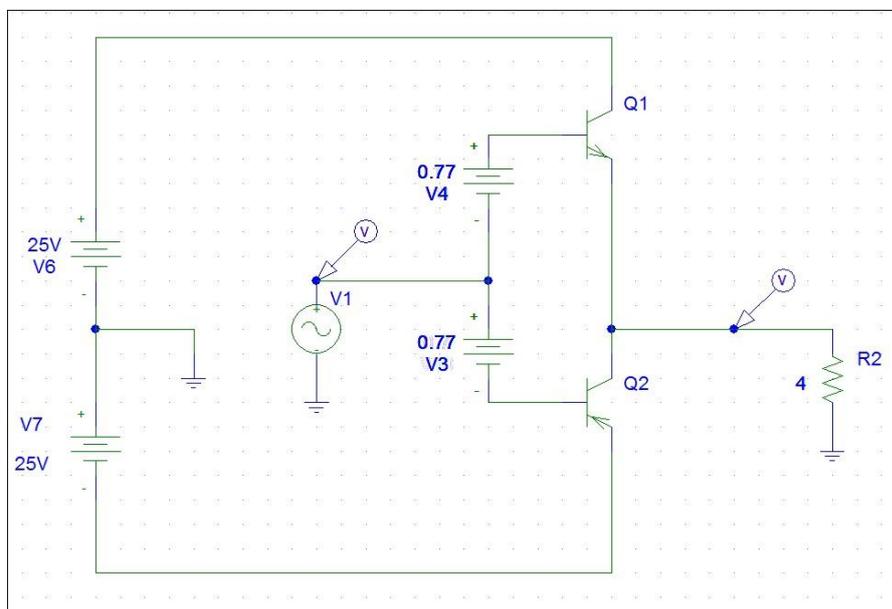


Figura 3.8: Circuito exemplo da Classe AB.

Fonte: Circuito Utilizado na Simulação do PSPICE.

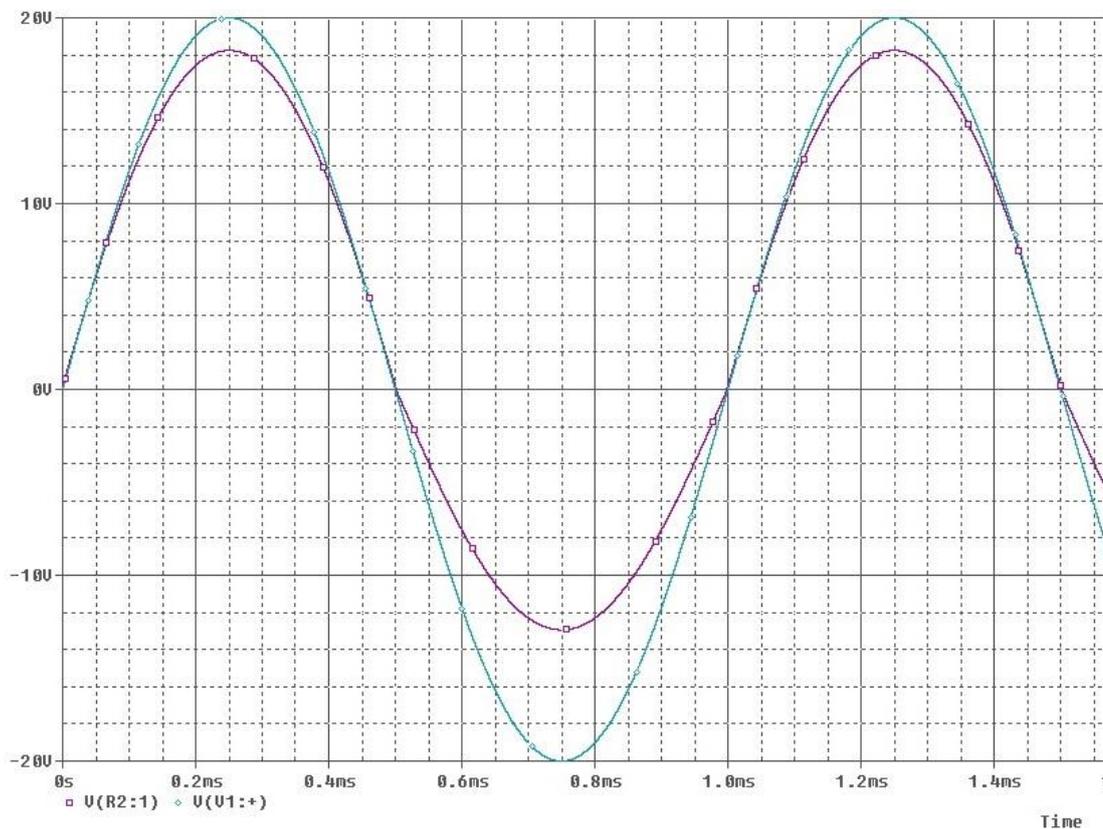


Figura 3.9: Saída Amplificada circuito classe AB.

Fonte: Resultado da Simulação.

Na Figura 3.10, vemos no detalhe, que somente o fato de ter adicionado as fontes de tensões para manterem as polarizações dos transistores, diminuem consideravelmente a distorção de crossover da saída do circuito.

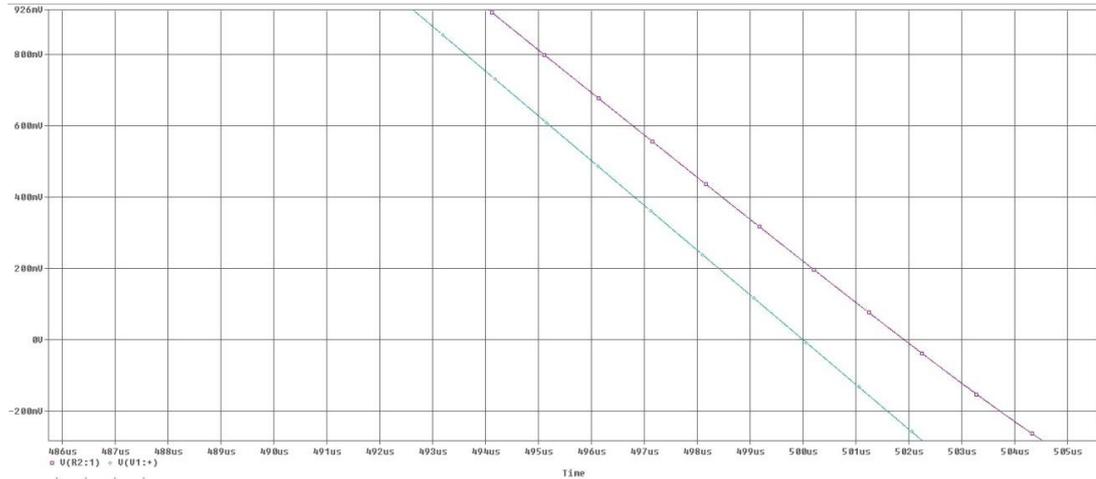


Figura 3.10: Detalhe, Correção da Distorção de crossover Circuito AB.

Fonte: Resultado da Simulação.

A simulação do circuito classe D, foi realizada de maneira a entender seu funcionamento, desde a comparação de sinais para se gerar pulsos para o chaveamento à etapa final de filtro que retorna o sinal amplificado proporcional ao sinal de entrada.

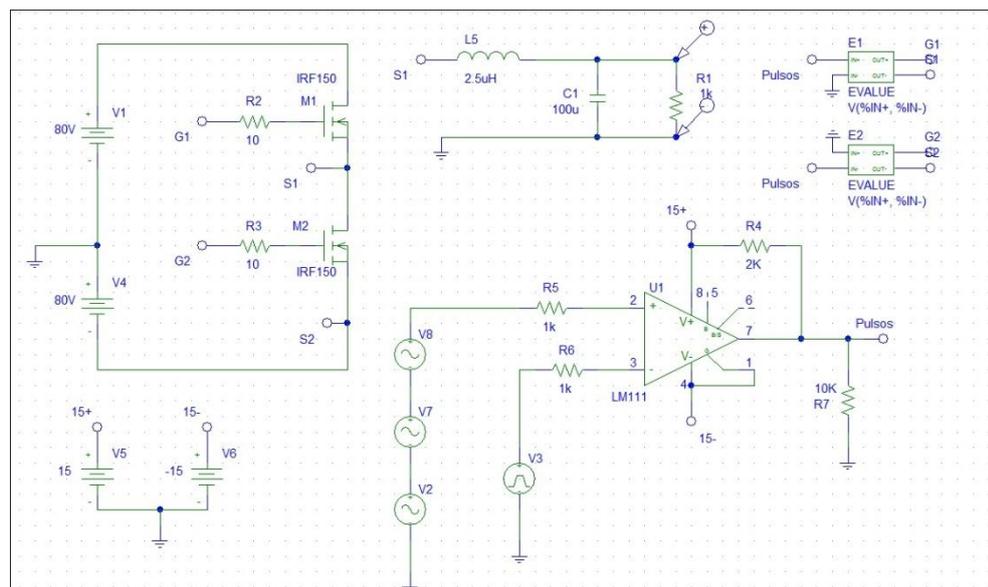


Figura 3.11: Circuito de um exemplo de funcionamento de um amplificador Classe D meia-ponte. Fonte: Circuito Utilizado na Simulação do PSpice.

Na simulação do circuito que exemplifica o amplificador classe D, foi utilizado um modelo chamado de Amplificador de meia ponte.

Neste modelo, o sinal de entrada Figura 3.12, que foi simulado utilizado um somatório de vários sinais de diferentes amplitudes e diferentes frequências conforme circuito apresentado, é constantemente comparado com o sinal de referência, que possui fre-

quência maior do que a frequência máxima do sinal de entrada de áudio. O sinal de referência é apresentado na Figura 3.13, trata-se de um sinal com forma de onda triangular.

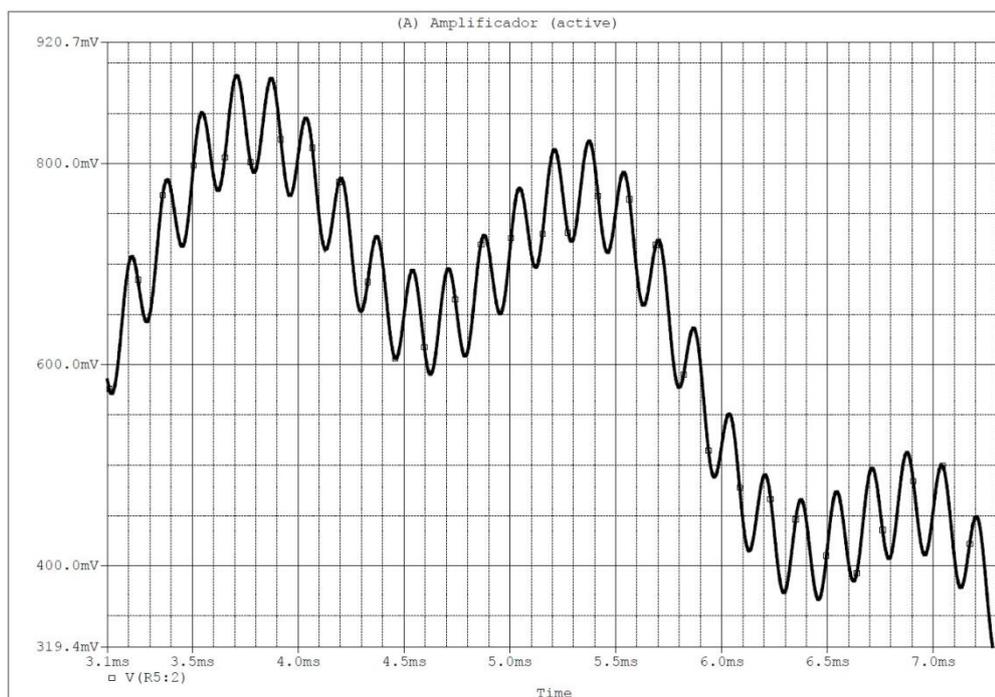


Figura 3.12: Sinal de Entrada. Fonte: Resultado da Simulação.

Fonte: Resultado da Simulação.

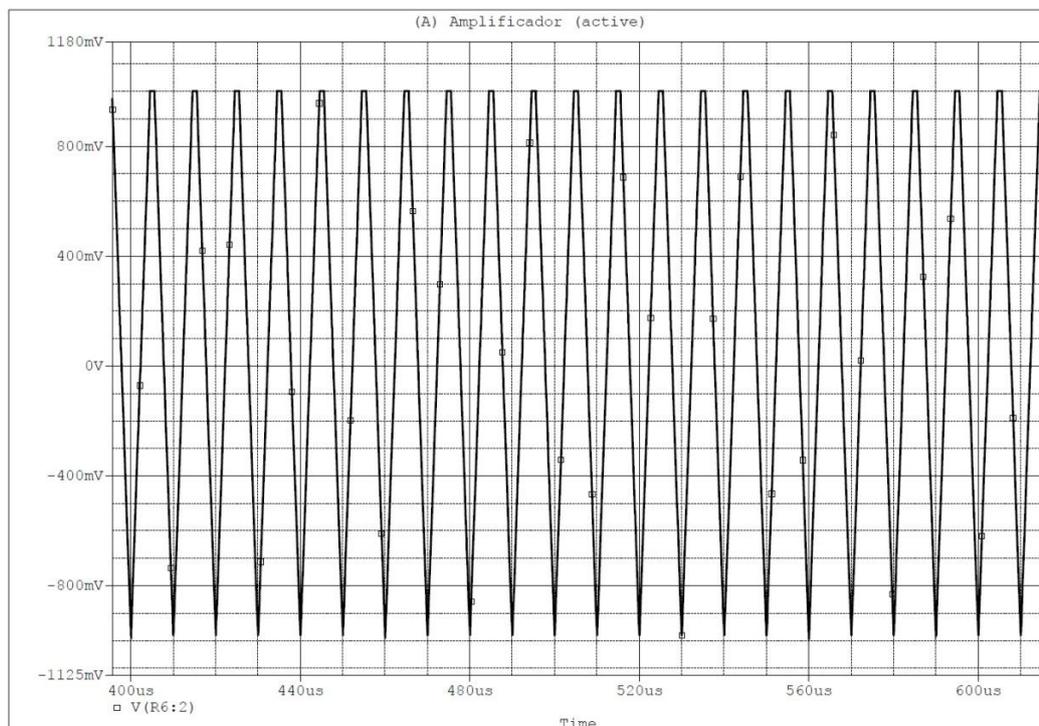


Figura 3.13: Sinal de Referência para comparação - Classe D.

Fonte: Resultado da Simulação.

Após a comparação destes dois sinais, realizado pelo circuito da Figura 3.14, obtêm-se uma onda quadrada com largura de pulso que varia proporcionalmente de acordo com a amplitude do sinal de áudio de entrada Figura 3.15.

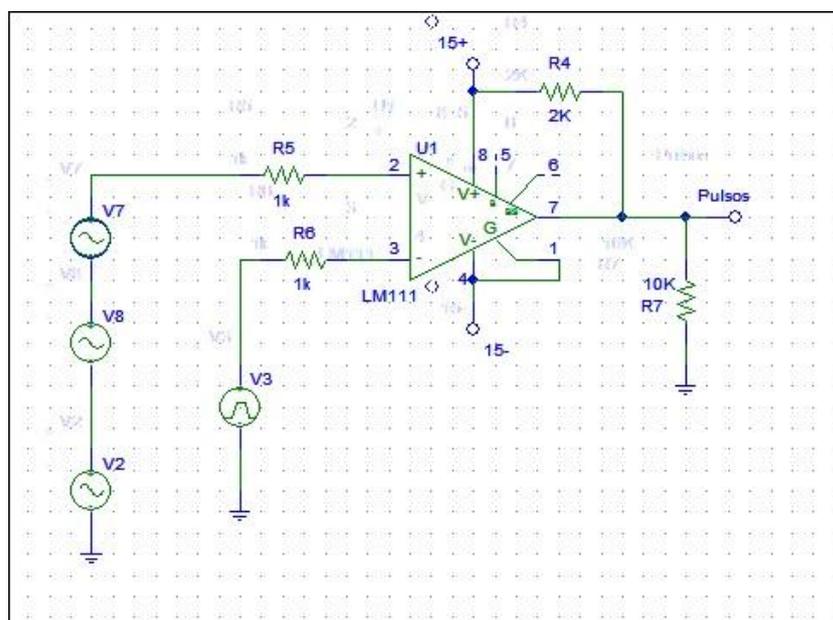


Figura 3.14: Circuito comparador dos sinais de entrada e sinal de referência.

Fonte: Circuito Utilizado na Simulação do PSpice.

A onda quadrada resultante desta comparação é utilizada como pulsos que acionam diretamente os transistores de chaveamento, que após enviar o sinal por um filtro passa-baixas, recuperar sua forma original.

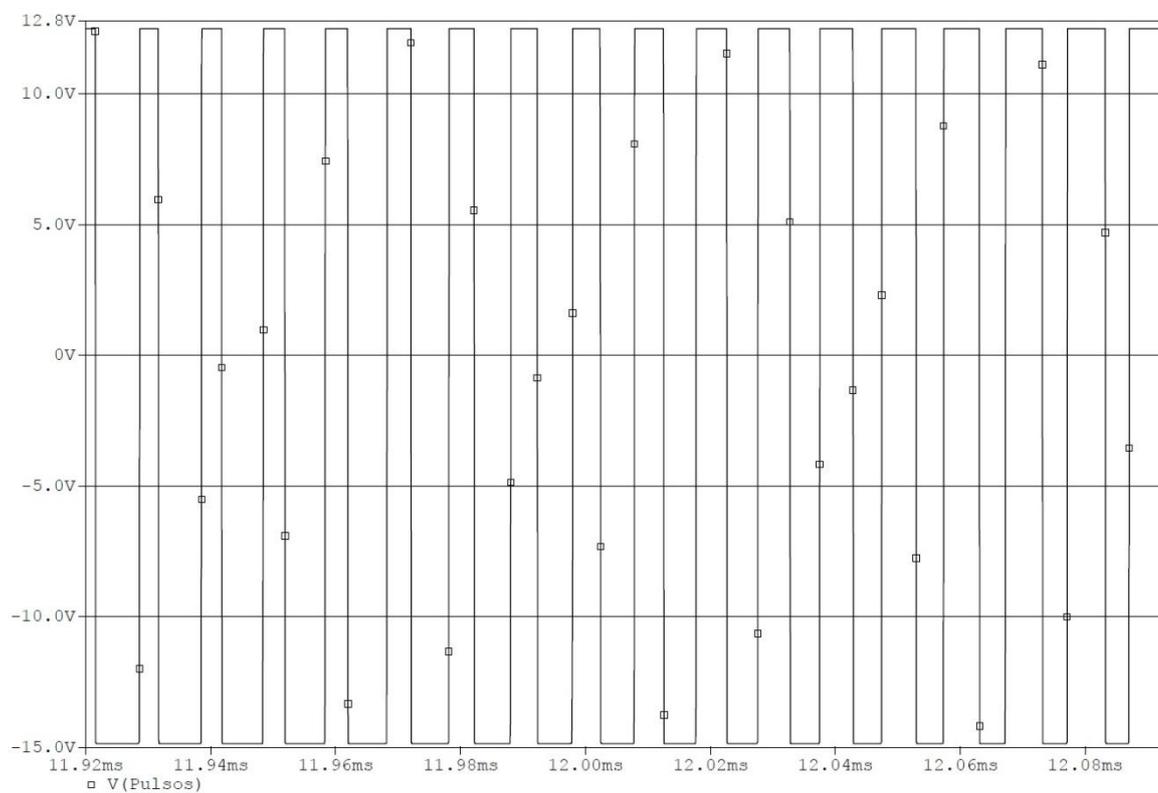


Figura 3.15: Pulsos Resultante da comparação.

Fonte: Resultados da Simulação.

Note que o sinal da saída do filtro passa-baixa, é proporcional ao sinal de entrada de áudio, porém amplificado.

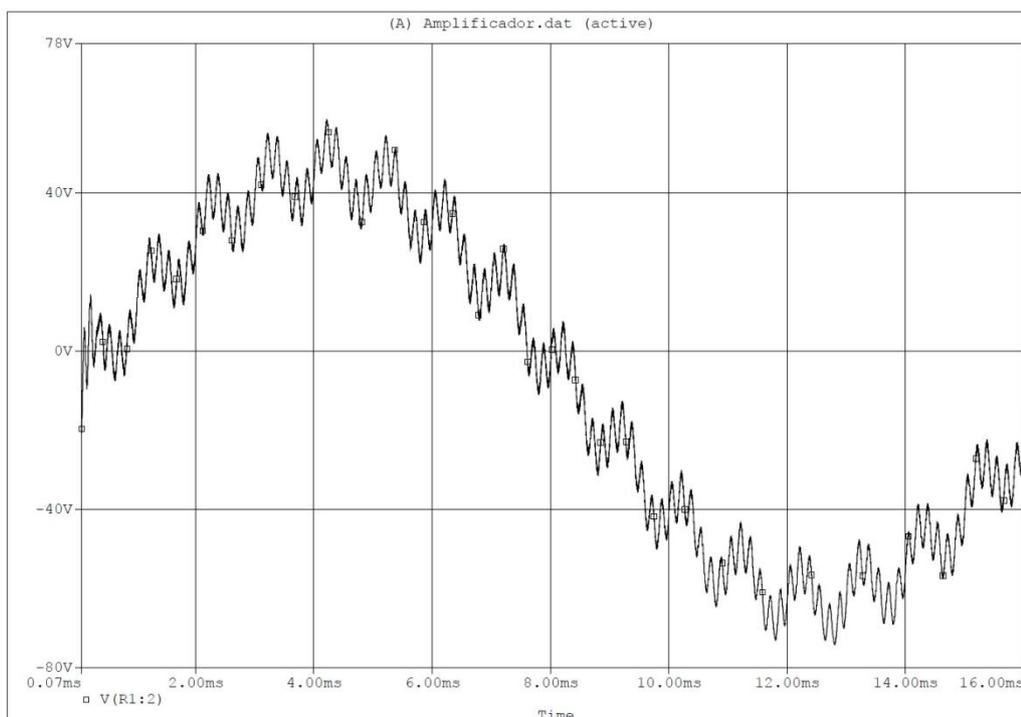


Figura 3.16: Sinal de Saída Amplificada do Circuito Classe D.

Fonte: Resultados da Simulação.

Com base nas simulações efetuadas, pode-se perceber que as diferentes classes assim como as tipologias e arranjos de amplificadores podem ser avaliados de diversas formas, podendo ser analisada de maneira objetiva, utilizando equipamentos, testes, observando parâmetros, dentre análise de outros fatores, ou de maneira subjetiva, o que depende de pessoas, e suas opiniões e percepções sobre qualidade áudio.

O foco do trabalho, apesar de manter o estudo sobre as figuras de mérito dos amplificadores é o consumo. Foi elaborado portanto, um estudo e teste com o intuito de se analisar objetivamente as amostras escolhidas evidenciando sua eficiência energética em comparação com a arquitetura de classe de amplificação utilizada no auto-rádio.

4. EXPERIMENTO

4.1 Planejamento do Experimento

O experimento a ser realizado visa, através de medições em diferentes amostras, comparar o consumo energético das principais classes de amplificadores de áudio, a classe AB e classe D. A base de tal experimento é a comparação da potência fornecida pelo amplificador aos alto-falantes e a real consumida pelo mesmo, visando levantar a curva de eficiência de cada amostra. O experimento possui alguns critérios a serem seguidos, que serão abordados em seguida, e será realizado dentro de um ambiente de testes construído especificadamente para tal finalidade, formado pela bancada de testes e alguns equipamentos de suporte.

4.1.1 Bancada

Para executar os testes nos amplificadores, foi utilizada uma bancada de testes construída especialmente para executar este experimento.

A bancada é formada por um painel de madeira, que simula um painel automotivo. Este, é projetado de maneira que possa simular a alimentação do auto-rádio quando conectado a um veículo e as cargas às quais é submetido, no caso, os alto-falantes. O painel possui conexões e bornes que facilitam a etapa de medição de valores de tensão e corrente necessárias para se calcular a eficiência do rádio e consequentemente do amplificador em seu interior.

A Figura 4.1 apresenta de maneira geral o painel utilizado no experimento.

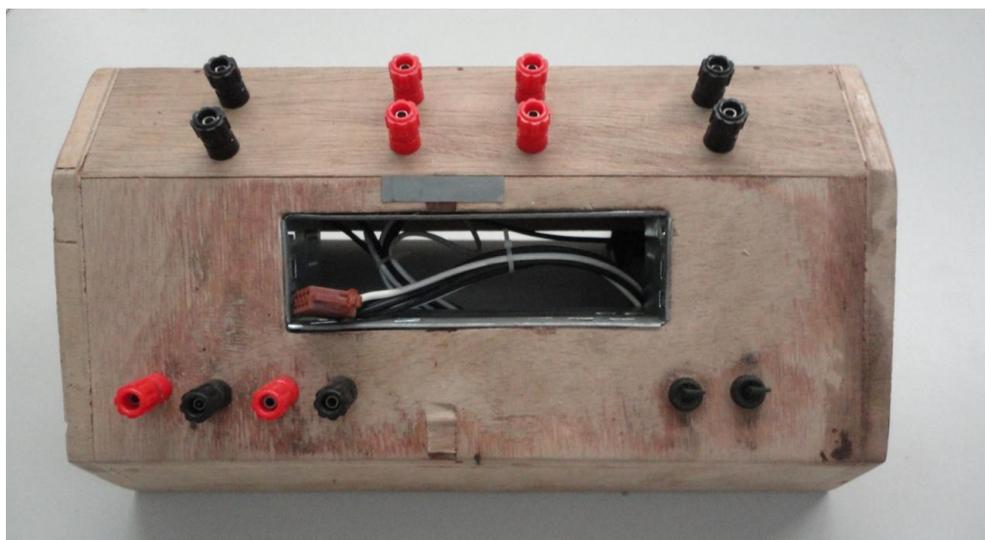


Figura 4.1: Painel de Testes para rádios automotivos.

A ligação do rádio no sistema de alimentação do veículo assim como nas cargas referentes aos alto-falantes, dão origem a um circuito fechado que pode ser exemplificado pelo diagrama da Figura 4.2.

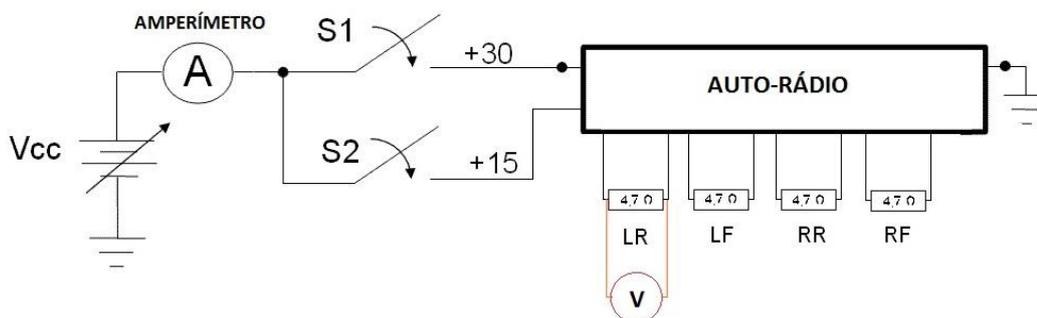


Figura 4.2: Diagrama do Circuito de medição do experimento.

Através do diagrama, compreende-se que a alimentação do rádio é realizada por uma fonte de tensão contínua, mas que pode ter dois diferentes valores. Em uma situação real, quando conectado a um veículo, a alimentação do rádio ocorre de diferentes maneiras. Quando o veículo se encontra com o motor fora de funcionamento, desligado, o rádio é alimentado somente pela carga da bateria do veículo, sendo assim alimentado por uma tensão de valor aproximado de 12 V.

Já com o motor em funcionamento, devido a presença do alternador em paralelo ao sistema de alimentação do veículo, a alimentação do rádio assume um valor aproximado de 13,8 V, gerados pelo alternador que tem a função de gerar energia, alimentar todo sistema do veículo e carregar a bateria.

Em conjunto com o circuito, são conectados nas saídas referente aos alto-falantes, 4 resistores de 4,7 ohms, que representam o valor da impedância nominal dos alto-falantes.



Figura 4.3: Detalhe da ligação dos resistores de 4,7 ohms, utilizados como carga nominal no experimento.

Esses resistores são conectados tanto nas saídas do rádio quanto em bornes presentes no painel de testes, o que facilita o acesso para medição. Estes estão dispostos da maneira proposta na mesma relação que estão alocados nos veículo. Figura 4.3 é possível ver os bornes destacados na bancada.

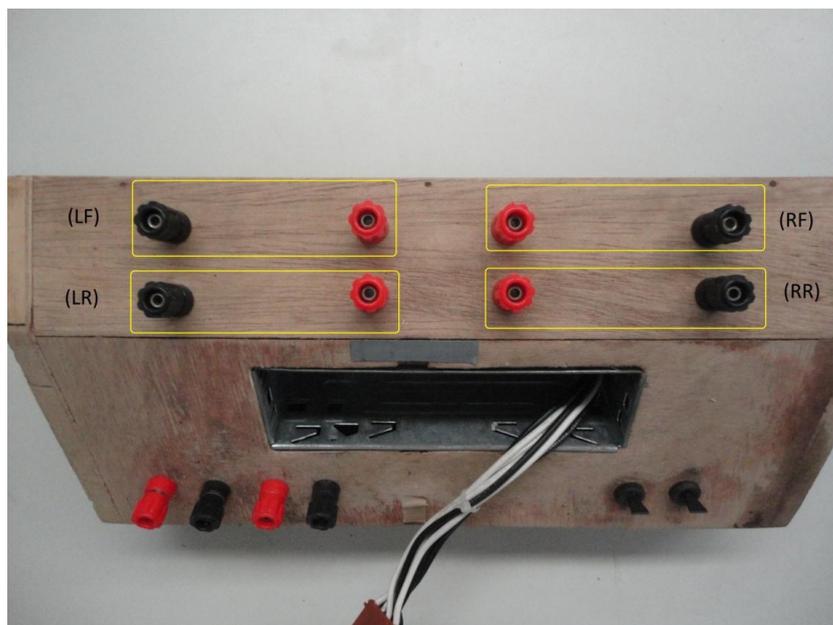


Figura 4.4: Bornes de acesso as saídas amplificadas do rádio.

Tanto a alimentação quanto as ligações com as cargas resistivas são realizadas através do uso de conector ISO, conforme exemplificado na Figura 4.6

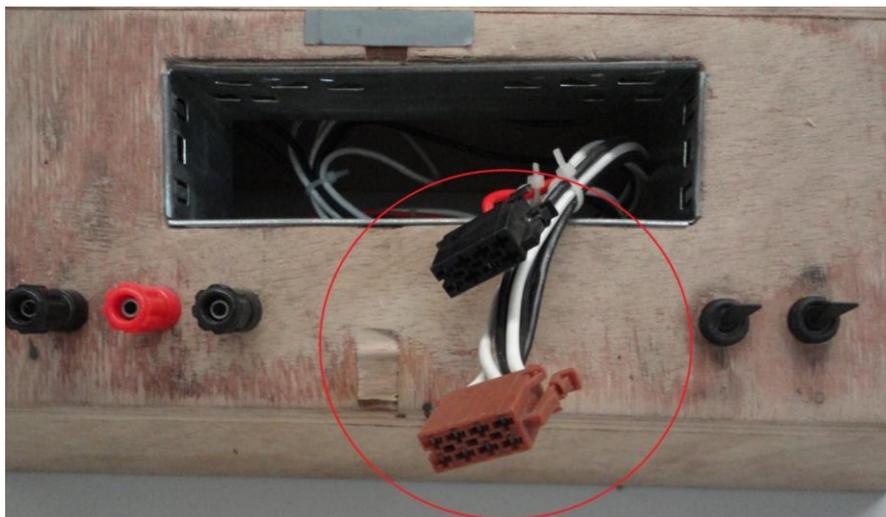


Figura 4.5: Detalhe, Conector Padrão ISO utilizados em Auto-rádios.

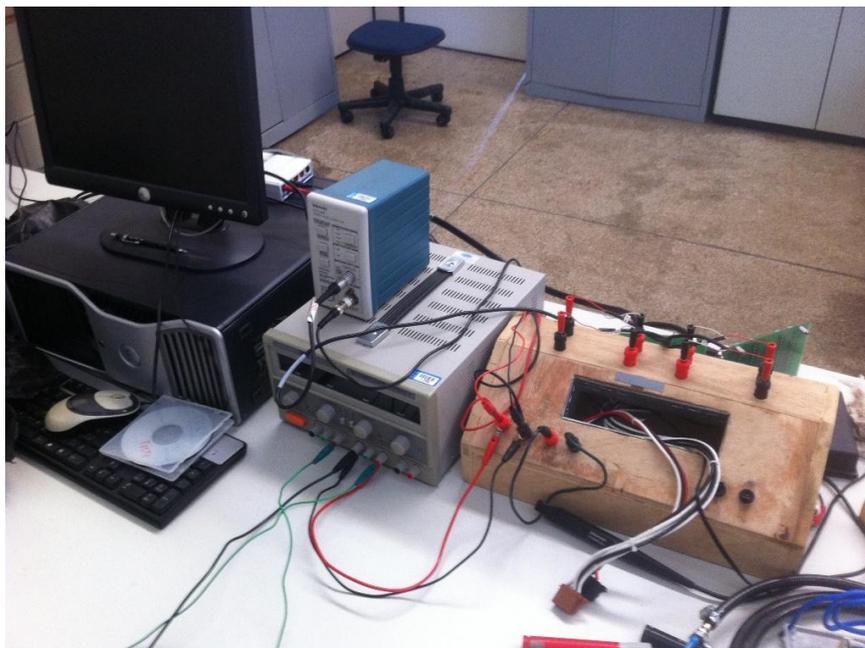


Figura 4.6: Imagem Real da Bancada de testes Utilizada.

4.2 Procedimento

A idéia básica do experimento foi medir a potência consumida pelo amplificador a fim de se obter valores para comparar as arquiteturas utilizadas. A questão é que neste teste será utilizado sempre um limite de potência onde não haja distorção, ou seja, até onde é válido medir o valor de eficiência do amplificador levando em consideração suas figuras de mérito.

O experimento será realizado seguindo os seguintes passos.

1. Identificação da arquitetura utilizada na amostra;
2. Preparação da bancada;
3. Reprodução dos sinais de teste;
4. Conferir THD;
5. Coleta dos valores a serem analisados.

4.2.1 Cálculo da eficiência

Para se obter os valores de consumo das amostras, é necessário conhecer o valor da potência consumida (alimentação) de cada uma. Esta potência é obtida através dos valores médios de tensão e corrente que alimentam o rádio, obtida através da seguinte equação:

$$P_{in} = V_{CC} \cdot I_{total} \quad [W] \quad (22)$$

onde:

P_{in} : Potencia média consumida.

V_{CC} : Tensão Média de Entrada.

I_{total} : Corrente média de entrada.

Deve-se lembrar que da corrente total consumida pelo auto-rádio, uma parcela é destinada a outras funções do auto-rádio que não amplificar sinais de áudio, como alimentação do display, microprocessadores, leitores de mídia, Cd, dentre outros, conhecida como corrente quiescente do auto-rádio.

Esta parcela de corrente deve ser subtraída da corrente total consumida, de maneira a obter o valor de corrente consumida somente pelo amplificador, que é o foco deste estudo.

Esta corrente é obtida da seguinte maneira:

1. Liga-se o auto-rádio;
2. Inicia-se reprodução do sinal de teste;
3. Regula o volume para nível 0, ou seja, não exigindo corrente do amplificador;
4. Coleta-se o valor de corrente média na alimentação.

Observe que realizando esses passos, apesar de o sinal já está sendo reproduzido, não há consumo de corrente por parte do amplificador, logo o valor de corrente medido se destina apenas ao consumo quiescente do auto-rádio.

Sabendo o valor desta corrente, este valor é descontado do valor da corrente total de alimentação do sistema de maneira que a corrente utilizada para se calcular a potência seja somente oriunda da etapa de amplificação.

$$I_{CC} = I_{Total} - I_{Quiescente} \quad [A] \quad (23)$$

Aplicando este valor em (22), é calculado então, o valor da potência consumida somente pelo amplificador em questão. Importante ressaltar que nesta etapa de medição, da potência de entrada, são coletados valores médios de corrente, I_{CC} , e tensão, V_{CC} , responsáveis por retornar o valor de potência média consumida, $P_{in \ amp}$.

$$P_{in \ amp} = V_{CC} \cdot I_{CC} \quad [W] \quad (24)$$

Para se calcular o valor da potência fornecida aos alto-falantes, são coletados os valores da tensão eficaz (RMS), V_{out} , de cada canal de saída do auto-rádio. Através da equação (25), aplicando o valor da carga utilizada no experimento, R , obtém-se o valor da potência fornecida aos transdutores do experimento, P_{out} .

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R} \quad [W] \quad (25)$$

Possuindo os valores da potência consumida pelo amplificador, $P_{in \ amp}$, e fornecida aos alto-falantes, P_{out} , pode-se calcular a eficiência energética do sistema η , utilizando a relação descrita abaixo resultando em um valor percentual da mesma.

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad [W] \quad (26)$$

Desta maneira, no experimento, durante a reprodução do sinal, são coletados diferentes valores de tensão e corrente, que após a manipulação descrita acima, retorna os valores de eficiência de cada amostra, perante diferentes valores de potência testados.

A coleta de dados foi realizada utilizando-se equipamentos do laboratório de eletrônica, como multímetro e amperímetro. Mas também pode ser realizada utilizando aquisição de dados via instrumentação virtual, que neste caso, foi utilizada apenas para se gerar o sinal de entrada para um dos testes realizados.

O sinal senoidal de teste possui frequência padronizada pela norma IEC-60268-3 no valor de 1KHZ. Este sinal para a execução dos testes, foi implementado na bancada de duas maneiras distintas, por se tratarem de diferentes tipos de rádios. A primeira, foi através do uso de leitor de cd dos próprios rádios. Foi realizado a gravação, do sinal senoidal com frequência de 1 kHz em formato wave, a ser reproduzido em um cd, e através deste, foi possível efetuar os testes.

Nos rádios que não possuíam leitores ópticos, foi realizada uma implementação do sinal, com o uso de instrumentação virtual com o auxílio da plataforma LabView.

Através do software, foi criado uma interface básica que cria um sinal e através das placa de aquisição NI PCI-6221 disponibiliza o mesmo para ser utilizado no experimento, nas entradas auxiliares dos auto-rádios.

4.3 Amostras

Como dito no início do trabalho, foram utilizados diferentes tipos de amostras para a realização de testes eficiência.

Os fabricantes de automóveis não produzem todas as suas peças para abastecer sua linha de produção, eles contratam terceiros que fabricam algumas peças para a empresa. Na maioria dos casos o fabricante de um veículo, produz somente a carroceria, chassi e os principais componentes do motor. O restante é produzido pelos fabricantes OEM/OES. Então, o fabricante/montador de automóvel fornece as especificações dos componentes que necessita a estes fabricantes (OEM/OES).

Os produtos aftermarket, não são produzidos pelos fabricantes do veículo. Podem ser produzidas por um fabricante de equipamento original ou por um fabricante

diferente. A diferença é que não são produzidas totalmente com as especificações do fabricante. Isto não significa que não tenham qualidade. Há empresas que produzem tanto produtos OEM quanto aftermarket.

Dos produtos utilizados, estão citadas abaixo suas especificações.

1. Rádio Clarion FB275

Este é um típico auto-rádio aftermarket, se tratando de um modelo que não vem de fábrica com o veículo. É adquirido externamente, pelo mercado de produtos complementares e acessórios para veículos.

O modelo FB 275, fabricado pela *Clarion* se baseia em um rádio com quatro saídas amplificadas máxima de 50W x 4 canais, e utiliza amplificador do tipo Classe AB TDA7385, já apresentado pela Figura 2.6.

A Figura 4.7 apresenta imagem ilustrativa do rádio utilizado.



Figura 4.7: Amostra 1 - Clarion FB275. Fonte: Imagem Real do Auto-rádio.

2. Rádio Blaupunkt F312

O auto-rádio Blaupunkt F312, Figura 4.8, é um dos exemplos de auto-rádios OEM, ou seja, vem em conjunto com o veículo, mas é fabricado por uma empresa es-

pecializada que presta serviço para a montadora. Também se baseia em um rádio com 4 canais amplificadas que utiliza um amplificador interno do tipo classe AB.



Figura 4.8: Amostra 2 Blaupunkt F312. Fonte: Imagem Real da amostra.

3. Amplificador TAS5182 EVM

Como representante da classe D, foi utilizado no experimento, o amplificador TAS5182 EVM é apresentado pela Figura 4.9.

Trata-se de um amplificador da Texas Instruments de dois canais amplificadas utilizando PWM e potência MOSFET.



Figura 4.9: Amplificador Classe D utilizado no experimento.

Fonte: TAS5182EVM Users Guide 3.00.

A Figura 4.10 apresenta o diagrama de seu funcionamento. Basicamente, ele recebe um sinal de áudio que é processado, e amplificado conforme funcionamento de um amplificador classe D descrito no capítulo 2.

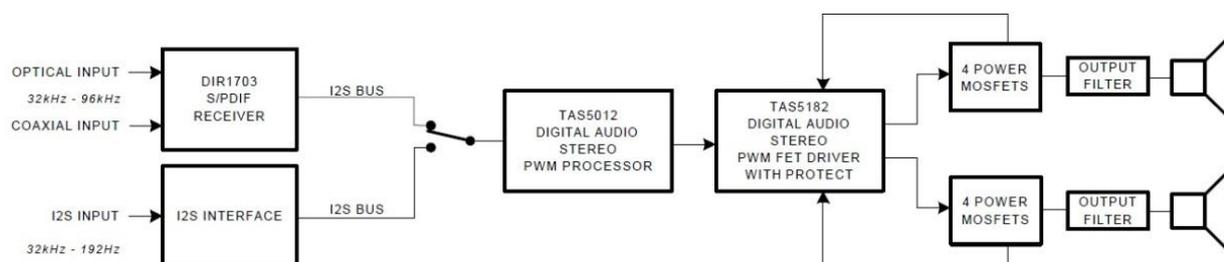


Figura 4.10: Diagrama de funcionamento do Amplificador TSA5182

Fonte: TAS5182EVM Users Guide 3.00.

5. RESULTADOS

5.1 Dados

Através dos experimentos realizados foram obtidas as seguintes tabelas de dados referentes à eficiência de cada amostra testada. Nas tabelas são apresentados os valores da potência fornecida aos alto-falantes P_{out} , tensão de saída do amplificador V_{out} e eficiência energética do mesmos, η .

A Tabela 2 apresenta de maneira sucinta, os resultados obtidos através dos testes de consumo para a amostra número 1, auto-rádio Clarion FB275. Nesta tabela é abordado diretamente o valor de potência consumida e o resultado obtido no cálculo da eficiência do amplificador.

Tabela 2 - Amostra 1 - Clarion FB275

$\eta(\%)$	$V_{out}(RMS)$	$P_{out}(W)$
0.141	0.097	0.002001915
5.15	0.915	0.178132979
12	1.82	0.704765957
25.9	3.56	2.696510638
32.1	4.35	4.02606383

Fonte: Dados Obtidos no Experimento.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para a amostra número 2, autorádio Blaupunkt F312 e respectivamente a tabela 4, referente os resultados referentes à amostra 3, TSA5182.

Tabela 3 - Amostra 2 - Blaupunkt F312

BLAUPUNKT F312 (1kHz)	
$\eta(\%)$	$P_{out}(W)$
68.8	17.4
40.8	5.5
21.3	1.4
11	0.32
6.63	0.08
4.3	0.02

Fonte: Dados Obtidos no Experimento.

Tabela 4 - Amostra 3 - TSA5182

TAS5182	
$\eta(\%)$	$P_{out}(W)$
90.6	14.1
86.3	3.6
70.5	0.9
39.3	0.21
15.5	0.06
5.83	0.02

Fonte: Dados Obtidos no Experimento.

As tabelas apresentadas já trazem os valores diretos de eficiência.

De maneira geral, para todas as tipologias de amplificadores, a eficiência tende a crescer com o aumento de potência. Porém, o que difere uma classe da outra, é exatamente a inclinação da curva de crescimento da eficiência em função do aumento de potência.

Com o intuito de se facilitar a análise dos resultados, foram gerados gráficos para cada amostra, que apontam a eficiência em função da potência gasta de cada amplificador.

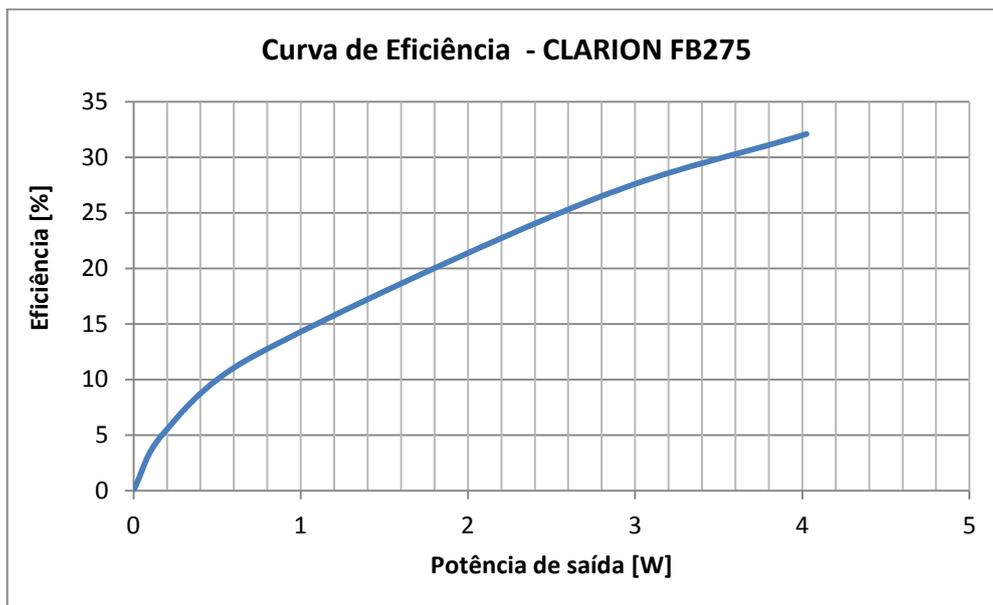


Figura 5.1: Gráfico Eficiência VS Potência - Clarion FB275.
Fonte: Dados obtidos no Experimento.

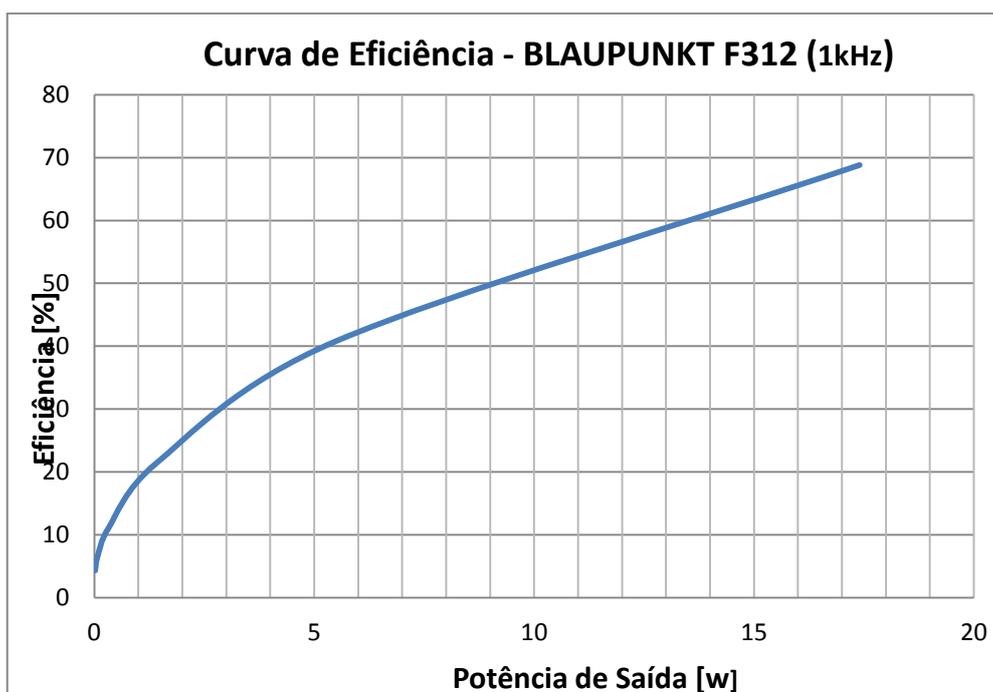


Figura 5.2: Gráfico Eficiência VS Potência - Blaupunkt F312
Fonte: Dados obtidos Experimento..

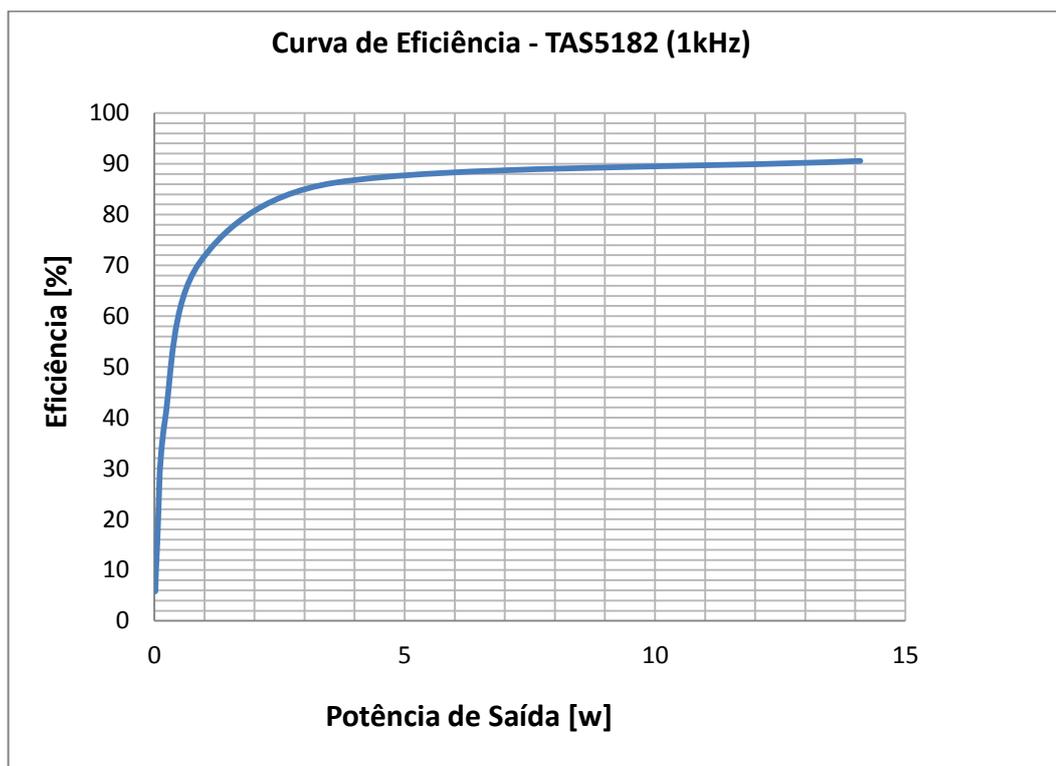


Figura 5.3: Gráfico Eficiência VS Potência - TAS5182
Fonte: Dados obtidos nos testes.

Em uma primeira análise, pode-se perceber que a eficiência total do amplificador classe D, é bem superior à eficiência encontrada na outra tipologia.

Durante os testes observou-se que além do auto consumo de energia, quando exigido uma potência moderada dos amplificadores classe AB, ambas as amostras contendo esse tipo de arquitetura esquentavam muito.

Foi identificado então, uma grande dissipação de potência por parte do chip de amplificador o que interfere diretamente em seu rendimento.

Este pode ser considerado um dos motivos chaves para o baixo rendimento dos amplificadores Classe AB, quando comparados com Classe D. Esta comparação é apresentada na Figura 5.4.

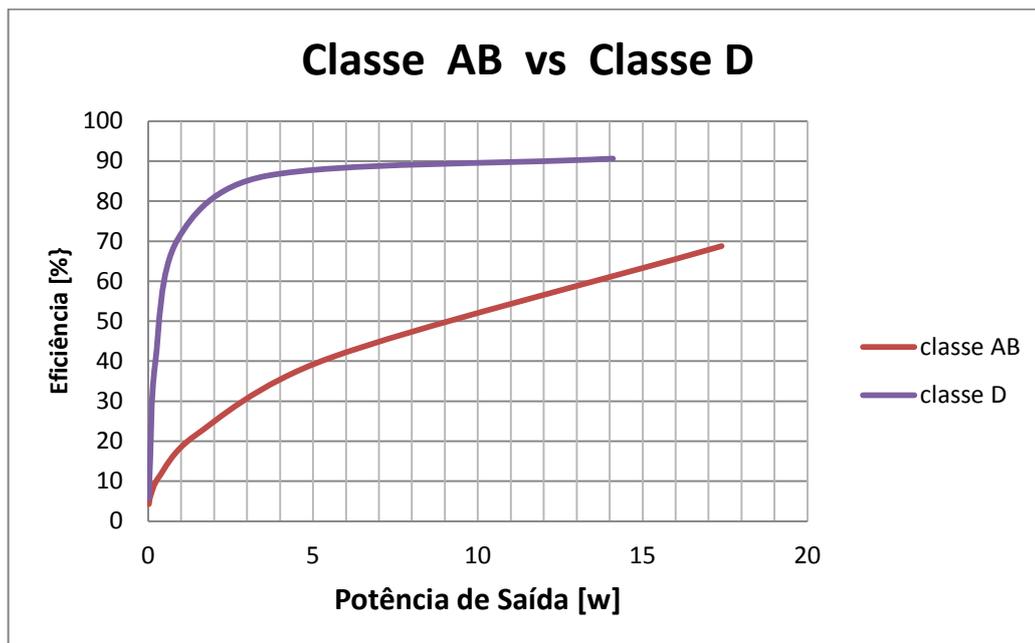


Figura 5.4: Comparação Curvas de Eficiência das amostras com amplificadores Classe AB e Classe D. Fonte: dados obtidos nos testes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A identificação de arquitetura utilizada em cada amostra possibilitou um melhor entendimento sobre os componentes distribuídos na placa principal do rádio, onde o pode-se ter uma maior interação com os diferentes esquemas apresentados nas diferentes amostras e classes estudadas.

Os testes foram realizados com sucesso, evidenciando que a bancada em conjunto com o procedimento utilizado pode ser uma valiosa ferramenta de estudo relacionado a dispositivos de potência, principalmente ligados ao setor automotivo. Sendo a bancada de teste um experimento que poderá ser utilizado em vários trabalhos.

Após a análise dos resultados de eficiência obtidos, foi observado com mais atenção, o elevado consumo dos amplificadores classe AB.

Um dos fatores que justificam este elevado consumo, é o fato desta classe possuir um consumo quiescente elevado, diferente dos modelos de classe D. no classe AB esse consumo pode chegar até 20% do consumo total do auto-rádio.

Como em amplificadores classe D ocorre o consumo quiescente bem menor que os da Classe AB, esse fato é visto como uma das vantagens dessa classe de amplificação.

A Classe AB requer ruma maior dissipação de calor, o que implica na utilização de um radiador de alumínio que representa um aumento no custo e na massa do rádio. Isso evidencia outra vantagem por parte da Classe D, que é a vantagem relativa à eficiência, pois uma menor dissipação reflete em uma maior eficiência energética.

Embora seja pouco utilizado em sistemas automotivos, o amplificador classe D apresenta desempenhos referentes ao consumo e à eficiência que motivam um estudo visando a sua validação em veículos. Contudo, o fato de o amplificador Classe D trabalhar com frequências da ordem de 1 MHz, pode ocorrer o aparecimento de ondas esta-

cionárias no cabo de transmissão, ruídos, ou mesmo induzir tensão elétrica em outros cabos e componentes embarcados. Portanto necessita de uma atenção maior em seu projeto.

O estudo deixa uma base de testes elaborada que pode contribuir para futuros trabalhos na área de áudio, principalmente de setor automotivo. O levantamento do modelo representativo do alto-falante permite em uma próxima abordagem, o uso de testes que possam levar em consideração a influência do transdutor no consumo de amplificadores, assim como comparações com testes qualitativos.

REFERÊNCIAS

- ALL ABOUT CIRCUITS, "", 16-01-2010, Disponível em:
<[http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/Early Tube History chpt_13/2.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/Early_Tube_History_chpt_13/2.html)> Acesso: 13/08/2012 ;
- BALLOU, GLEN, "**Handbook for Sound Engineers**" -The New Audio Cyclopedia 2nd edition, 1996;
- BORTONI ROSALFONSO, "**Amplificadores de Potência**", 2007; Disponível em:
<http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf> Acesso: 17/02/2012;
- CLARION FB275
<[http://www.clarion.com/us/en/products/2008/audio/source_units/bluetooth_sd/FB275B TB/us-en-product-pf_1172385079386.html](http://www.clarion.com/us/en/products/2008/audio/source_units/bluetooth_sd/FB275B_TB/us-en-product-pf_1172385079386.html)> Acesso: 10/10/2012;
- IEC-60268-3: Sound System Equipment - Part 3: Amplifiers, Edition 3.0 (2000);
- IEEE, Global History Network, "**Lee de Forest**", 16/01/2010, Disponível em:
<http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Lee_De_Forest> Acesso: 15/09/2012;
- JALOPNIK, "**A história do som Automotivo**", Leonardo Contesini. Disponível em :
<<http://www.jalopnik.com.br/jalopnik-explica-a-historia-do-som-automotivo/>> Acesso: 12/12/2012;
- KINSLER, Lawrence, "**Fundamentals of Acoustics**", John Wiley & Sons, Inc., fourth edition, 2000;
- MARKUS, OTÁVIO. Ensino Modular: Sistemas Analógicos – Circuitos com Diodos e Transistores. 4. ed. São Paulo: Érica, 2002;
- MOTOROLA, 2013. **O primeiro auto-rádio** . Disponível em:
<<http://www.motorolasolutions.com/USEN/About/Company+Overview/History/Explore+Motorola+Heritage/Sound+in+Motion>> Acesso: 24/05/2012;
- NBR60268-3:2010;
- PIONEER, "**Conector ISO**". Disponível em:
<http://www.pioneer.com.br/suporte/faq/servicos/o-que-e-o-conector-iso>> Acesso: 10/12/2012;
- SELF, DOUGLAS. "**Audio Power Amplifier Design Handbook**", Third edition;
- SISTEMAS ELÉTRICOS AUTOMOTIVOS, (2009). Disponível em :
<http://sistemasautomotivos.blogspot.com.br/2009/01/sistema-eltrico.html> Acesso: 28/07/2012;

SEDRA AND SMITH, “**Microeletrônica**”, 5.ed. -São Paulo:Pearson Prentice Hall, 2007;

PIRES, FRANCISCO JOSÉ AMORIM, "**Amplificador de áudio classe D**", FEUP, 2010;

KASSAKIAN, J. G., H. C. WOLF, J. M. MILLER and C. J. HURTON, “**Automotive Electrical Systems circa 2005**”, IEEE Spectrum, 22–27 , Aug. 1996;

MUSICTEC. “**Amplificadores de Áudio, Parâmetros principais**”. Disponível em: <<http://www.musitec.com.br/blogs/classicos/?c=76>> Acesso: 28/07/2012 ;

TDA7385, Datasheet.Disponível em:

<http://www.datasheetcatalog.net/pt/datasheets_pdf/T/D/A/7/TDA7385.shtml>

Acesso: 10/10/2012;

TAS5182EVM, “**Users Guide 3.0**”. Disponível em:

<<http://www.andriuz.skynet.lt/soft/Elektronika/schemos/Stiprintuvai/Skaitmeniniai%20klases%20D%20ir%20T%20stiprintuvai/sleu043.pdf>> Acesso 11/10/2012;

YAMAPI R., CHABI OROU J. B., WOAFO P., “**Harmonic oscillations, stability and chaos control in a nonlinear electromechanical system,**” Journal of Sound and Vibration 259, 1253–1264 (2003);

Fornero, Leonardo
TCC – Estudo sobre Desempenho e Consumo Energético de
amplificadores de áudio automotivo
Divinópolis, 05/04/2013.
nº pág. 82

Concede-se o CEFET MG Campus Divinópolis, a permissão para reproduzir cópias deste trabalho e emprestá-las tão somente para propósitos acadêmicos e científicos. Direitos reservados. Leis 9.609/98 e 9.610/98. Autoriza-se copia, para utilização exclusivamente com finalidade didática, desde que com a citação da fonte.

Autor