

TESE DE DOUTORADO Nº 243

**UM ESTUDO DE ASPECTOS ELÉTRICOS E ACÚSTICOS DA SONORIZAÇÃO  
AUTOMOTIVA E PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA INTEGRANDO  
TRANSDUÇÃO E AMPLIFICAÇÃO**

**Christian Gonçalves Herrera**

DATA DA DEFESA: 13/12/2016

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**UM ESTUDO DE ASPECTOS ELÉTRICOS E ACÚSTICOS DA  
SONORIZAÇÃO AUTOMOTIVA E PROPOSTA DE UMA  
ARQUITETURA INTEGRANDO TRANSDUÇÃO E AMPLIFICAÇÃO**

Christian Gonçalves Herrera

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Pedro Francisco Donoso Garcia

Coorientador: Prof. Eduardo Bauzer de Medeiros

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2016

H565e

Herrera, Christian Gonçalves.

Um estudo de aspectos elétricos e acústicos da sonorização automotiva e proposta de uma arquitetura integrando transdução e amplificação [manuscrito] / Christian Gonçalves Herrera. - 2016. xxvii, 172 f., enc.: il.

Orientador: Pedro Francisco Donoso Garcia.

Coorientador: Eduardo Bauzer de Medeiros.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 156-172.

Bibliografia: f. 150-155.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Engenharia acústica - Teses. 3. Transdutores eletroacústicos - Teses. 4. Automóveis - Equipamento de som - Teses. I. Donoso- Garcia, Pedro Francisco. II. Medeiros, Eduardo Bauzer . III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

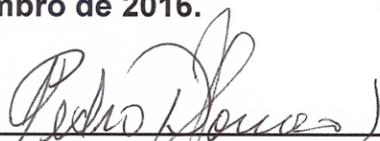
**Um estudo de aspectos elétricos e acústicos da sonorização  
automotiva e proposta de uma arquitetura integrando  
transdução e amplificação.**

**Christian Gonçalves Herrera**

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 13 de dezembro de 2016.

Por:



Prof. Dr. Pedro Francisco Donoso Garcia  
DELT (UFMG) - Orientador



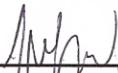
Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros  
DEMEC (UFMG) - Coorientador



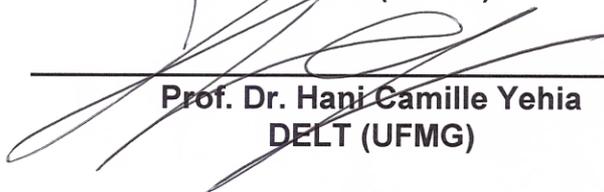
Prof. Dr. Luiz Wagner Pereira Biscainho  
DEE (UFRJ)



Prof. Dr. Stephan Paul  
Departamento de Engenharia Mecânica (UFSC)



Prof. Dr. Alexander Mattioli Pasqual  
DEMEC (UFMG)



Prof. Dr. Hani Camille Yehia  
DELT (UFMG)

## *Dedicatória*

Este trabalho é dedicado à minha  
esposa Priscilla e à minha filha Catharina.

## *Agradecimentos*

Agradeço a Deus por tudo.

Agradeço à minha família, por todos os momentos.

Ao meu orientador Professor Pedro Donoso, grande amigo e mentor. Ao Professor Eduardo Bauzer, coorientador, sempre presente ao longo de toda a minha formação acadêmica.

Ao Rafael Valadão e ao Leonardo Campos pela inestimável colaboração.

A todas as instituições que financiaram a execução deste projeto: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Fiat Chrysler Automobiles, ASK do Brasil LTDA.

# Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre os sistemas de sonorização automotivos sob as óticas do consumo energético, da eficiência e da inteligibilidade. O objetivo é caracterizar o sistema, tanto na arquitetura quanto nos componentes individuais, com relação a esses três parâmetros. Além disso, também são discutidas as condições ambientais elétricas e acústicas que exercem influência no desempenho do sistema de sonorização. O estudo é baseado em fundamentos teóricos e nos resultados de experimentos realizados em bancada e em veículo através de um sistema de instrumentação virtual desenvolvido especialmente para esse trabalho. Foram identificados pontos fracos relacionados: a) ao consumo quiescente do autorrádio; b) à dissipação de potência no amplificador e no alto-falante; c) ao acoplamento vibroacústico entre o alto-falante e o habitáculo do veículo; d) à resposta em frequência eletroacústica, que compromete a inteligibilidade. Assim, fundamentada nos estudos realizados, é proposta uma nova arquitetura para o sistema de sonorização automotiva baseada num novo componente, o transdutor eletroacústico ativo, que integra o alto-falante a um amplificador classe D e conduz a uma redução no consumo de mais de 70 %

e uma dissipação de potência 76 % menor.

# Abstract

This work presents a study on automotive sound systems under the optics of energy consumption, efficiency and intelligibility. The objective is to characterize the system, both in architecture and individual components, in relation to these three parameters. In addition, we also discuss the electrical and acoustic environmental conditions that influence the performance of the sound system. The study is based on theoretical foundations and on results of experiments performed in bench and vehicle through a virtual instrumentation system specially developed for this work. We found weak points related to: a) quiescent consumption of the car radio; b) power dissipation in the power amplifier and the speaker; c) vibroacoustic coupling between the loudspeaker and the cockpit acoustics; d) electroacoustic frequency response, which compromises intelligibility. Based on the studies carried out, a new architecture is proposed for the automotive sound system based on a new component, the active electroacoustic transducer, which integrates the loudspeaker with a class D amplifier and leads to a reduction in consumption of more than 70 % and power dissipation 76% lower.

# Sumário

<b>Resumo</b>	.....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	.....	<b>v</b>
<b>Sumário</b>	.....	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	.....	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	.....	<b>xxi</b>
<b>Nomenclatura</b>	.....	<b>xxii</b>
<b>Capítulo 1</b>	<b>Introdução da Tese de Doutorado</b> .....	<b>1</b>
1.1	Contextualização do trabalho e motivação.....	1
1.2	Objetivos da Tese de Doutorado.....	4
1.2.1	Objetivos Gerais.....	4
1.2.2	Objetivos Específicos.....	5
1.3	Estrutura do texto.....	5

<b>Capítulo 2</b>	<b>Caracterização dos sistemas de áudio automotivos.....</b>	<b>7</b>
2.1	Introdução .....	7
2.2	Funcionalidades e arquitetura do sistema de áudio .....	8
2.3	Caracterização do autorrádio .....	11
2.3.1	Amplificadores de potência automotivos.....	14
2.3.2	Qualidade de áudio de amplificadores de potência.....	16
2.4	O Alto-Falante .....	19
2.4.1	Princípio de funcionamento do transdutor eletrodinâmico .....	19
2.4.2	Modelo do alto-falante .....	21
2.5	Conclusões do capítulo .....	25
<b>Capítulo 3</b>	<b>Estudo sobre o ambiente veicular .....</b>	<b>27</b>
3.1	Introdução .....	27
3.2	Modelo do sistema elétrico de potência automotivo .....	28
3.2.1	Qualidade da energia elétrica no automóvel .....	29
3.2.2	Caracterização experimental da alimentação do sistema de áudio automotivo .....	30
3.2.3	Interferências eletromagnéticas .....	32
3.3	Considerações sobre a acústica do habitáculo .....	36
3.3.1	Caracterização experimental da resposta em frequência eletroacústica .....	37

3.3.2	Considerações sobre a instalação dos alto-falantes .....	44
3.4	Conclusões do capítulo .....	46
3.4.1	Conclusões sobre o sistema elétrico de potência automotivo.	46
3.4.2	Conclusões sobre a acústica do habitáculo e a instalação dos alto-falantes .....	47
<b>Capítulo 4 Estudo sobre o consumo e a eficiência do autorrádio .....</b>		<b>49</b>
4.1	Introdução .....	49
4.2	Consumo do autorrádio .....	50
4.3	Estudo das perdas no amplificador de potência.....	53
4.4	Conclusões do capítulo .....	58
<b>Capítulo 5 Estudo sobre a eficiência da transdução eletroacústica ..</b>		<b>60</b>
5.1	Introdução .....	60
5.2	Obtenção da impedância de radiação e da eficiência .....	62
5.3	Caracterização experimental da eficiência eletroacústica .....	67
5.3.1	Medição das Impedâncias Complexas .....	68
5.4	Conclusões do capítulo .....	78
<b>Capítulo 6 Estudo sobre a inteligibilidade no veículo .....</b>		<b>80</b>
6.1	Introdução .....	80
6.2	Causas de redução da inteligibilidade .....	82

6.2.1	Razão sinal-ruído .....	82
6.2.2	Fatores eletroacústicos .....	83
6.2.3	Reverberação.....	84
6.3	Medidas de inteligibilidade .....	86
6.3.1	Métodos subjetivos .....	87
6.3.2	Métodos objetivos .....	88
6.4	Inteligibilidade em sistemas automotivos.....	90
6.4.1	Funções de transferência no habitáculo .....	90
6.4.2	Ruídos no veículo .....	92
6.4.3	Modelo da inteligibilidade em sistemas de áudio automotivo	92
6.5	Caracterização experimental.....	95
6.5.1	Sinais de fala utilizados nos ensaios .....	96
6.5.2	Cálculo do índice de articulação .....	99
6.5.3	Ruídos com o veículo em movimento .....	101
6.5.4	Medições com o veículo estático .....	106
6.5.5	Equalização .....	109
6.6	Conclusões do capítulo .....	112
<b>Capítulo 7</b>	<b>Projeto de um transdutor eletroacústico ativo de alta</b>	
<b>eficiência</b>	<b>.....</b>	<b>114</b>

7.1	Introdução .....	114
7.2	Proposta de nova arquitetura .....	115
7.2.1	Novo conceito de SEP Automotivo .....	117
7.3	O transdutor eletroacústico ativo para aplicação automotiva.....	119
7.3.1	O amplificador classe D.....	120
7.3.2	Consumo e eficiência.....	121
7.3.3	Qualidade de áudio .....	123
7.3.4	Arquitetura de um transdutor ativo.....	124
7.4	Projeto CDAA .....	126
7.5	Validação e discussão dos resultados .....	129
7.5.1	Qualidade de Áudio .....	129
7.5.2	Compatibilidade Eletromagnética.....	137
7.5.3	Consumo e eficiência.....	139
7.6	Conclusões do capítulo.....	141

**Capítulo 8 Conclusões finais e propostas de continuidade ..... 143**

8.1	Conclusões finais .....	143
8.1.1	O alto-falante e a impedância de radiação acústica .....	143
8.1.2	A inteligibilidade da fala.....	144
8.1.3	Amplificação em potência .....	146

8.2	Produção científica .....	147
8.3	Propostas de continuidade .....	148
8.3.1	Integração entre o alto-falante e o amplificador no transdutor ativo .....	148
8.3.2	Projeto do radiador acústico de alta eficiência .....	148
8.3.3	Inteligibilidade .....	149
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>150</b>
	<b>Apêndice A Sistema de Instrumentação Virtual .....</b>	<b>156</b>
	<b>Apêndice B Projeto CDAA – Documentos.....</b>	<b>166</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1: Serviços e funcionalidades numa plataforma de infotainment veicular. ....	8
Figura 2.2 : Sistema de sonorização composto por autorrádio, alto-falantes e cabos de sinais.....	9
Figura 2.3: Etapas de um sinal de áudio num sistema automotivo.....	10
Figura 2.4: Diagrama de blocos de um autorrádio típico. ....	12
Figura 2.5: Placa-mãe de um autorrádio típico.....	13
Figura 2.6: Configuração meia ponte. ....	15
Figura 2.7: Configuração ponte completa. ....	16
Figura 2.8: Figuras de mérito de um amplificador de potência para autorrádio. ....	17
Figura 2.9: Esquema construtivo de um transdutor eletrodinâmico típico [5]. .....	20
Figura 2.10: Circuito equivalente do transdutor eletrodinâmico .....	21

Figura 2.11: Principais componentes de um alto-falante eletrodinâmico.	22
Figura 2.12: Circuito elétrico equivalente do alto-falante. ....	23
Figura 2.13: Curvas da impedância (módulo e fase) em função da frequência ao ar livre .....	24
Figura 2.14: Resposta em frequência do alto-falante numa caixa tipo bass reflex de 35 litros .....	25
Figura 3.1: Modelo simplificado de um sistema de potência automotivo típico. ....	28
Figura 3.2: Formas de onda da alimentação ( $V_{cc}$ e $I_{cc}$ ) e da tensão de saída ( $V_{out}$ ) com sinal tipo burst.: a) 1 kHz, b) 100 Hz.....	33
Figura 3.3: Formas de onda da tensão de alimentação $V_{cc}$ em duas velocidades angulares do motor de combustão interna e sinal de áudio de: a) 1 kHz; b) 100 Hz.....	34
Figura 3.4: Série temporal da tensão de alimentação no conector do autorrádio (subtraída a componente contínua) com interferência gerada pelo ventilador de climatização do habitáculo. ....	35
Figura 3.5: Espectro de frequências do sinal da Figura 3.4 medido no conector do autorrádio e nos terminais da bateria do veículo. ....	36
Figura 3.6: NPS em função da frequência medida em veículo tipo minivan. .....	39
Figura 3.7: NPS em função da frequência medida no banco traseiro do veículo minivan em decorrência do uso dos alto-falantes frontais e/ou traseiros.	

.....	41
Figura 3.8: NPS em função da frequência em três posições vizinhas no habitáculo (veículo hatchback).....	42
Figura 3.9: Média da pressão sonora da Figura 3.8 e NPS dos segundo e terceiro harmônicos (veículo hatchback). ....	43
Figura 3.10: THD em função da frequência do alto-falante da porta dianteira esquerda.....	44
Figura 3.11: Ilustração de uma porta automotiva típica (adaptado de [11]).	45
Figura 3.12: NPS em função da frequência na posição do motorista com e sem a grade protetora do alto-falante (veículo hatchback). ....	46
Figura 4.1: Consumo energético de seis autorrádios (A a F) dividido por funcionalidades .....	51
Figura 4.2: Consumo de cada amostra de autorrádio . ....	52
Figura 4.3: Consumo médio de cada funcionalidade . ....	52
Figura 4.4: Circuito simplificado do amplificador classe B ideal. ....	53
Figura 4.5: Diagrama de blocos de um amplificador para autorrádio. ....	54
Figura 4.6: Encapsulamentos típicos de amplificadores de potência para autorrádios.....	55
Figura 4.7: Grandezas elétricas à saída de um amplificador classe B ideal (vpico= 1 V). ....	56
Figura 4.8: Grandezas elétricas que caracterizam a saída de um amplificador	

classe B ideal ( $v_{pico} = 0,3 \text{ V}$ ). .....	57
Figura 4.9: Dissipação de potência em função da potência de saída de um amplificador classe AB em ponte. ....	58
Figura 5.1: Um circuito equivalente alternativo para o alto-falante eletrodinâmico.....	63
Figura 5.2: Módulo e fase da impedância $Z_E$ do alto-falante simulado sem considerar a impedância de radiação.....	66
Figura 5.3: Simulação da eficiência de transdução com o alto-falante instalado no painel rígido infinito e em campo livre.....	66
Figura 5.4: Impedância $Z_{EB}$ medida com o alto-falante desmagnetizado: a) veículo A; b) veículo B. ....	68
Figura 5.5: Impedância $Z_E$ medida com o alto-falante no vácuo: a) veículo A; b) veículo B. ....	69
Figura 5.6: Fotografia do aparato para medição do alto-falante no vácuo.	70
Figura 5.7: Impedância total $Z_E$ medida com os alto-falantes instalados: a) veículo A; b) veículo B. ....	72
Figura 5.8: Eficiência em função da frequência de cada um dos quatro alto-falantes instalados no veículo A (com e sem o painel de porta). ....	74
Figura 5.9: NPS no veículo A, com e sem o painel de porta: a) LF; b) RF.	75
Figura 5.10: Fotografias dos alto-falantes nas portas com detalhe nas fixações: a) veículo A; b) veículo B.....	76

Figura 5.11: Eficiência em função da frequência de cada um dos quatro alto-falantes instalados no veículo B (com e sem o painel de porta). .....	78
Figura 6.1: Sistema hands-free de telefonia veicular. ....	81
Figura 6.2: Perda na articulação de consoantes em função da razão sinal-ruído SNR e do tempo de reverberação T .....	85
Figura 6.3: Perda na articulação de consoantes em função da distância D entre o locutor e o ouvinte e do tempo de reverberação T .....	86
Figura 6.4: Diagrama de blocos mostrando as funções de transferência no caminho entre o locutor e o microfone do sistema hands-free.....	91
Figura 6.5: Diagrama de blocos mostrando as funções de transferência no caminho entre o alto-falante e o ouvinte. ....	92
Figura 6.6: Índices de ponderação por banda de oitava para os idiomas inglês e holandês.....	94
Figura 6.7: Fotografia do HATS instalado no veículo. ....	96
Figura 6.8: Série temporal referente ao trecho de fala (voz masculina)..	97
Figura 6.9: Série temporal referente ao trecho de fala (voz feminina)...	98
Figura 6.10: Espectro em bandas de oitavas dos sinais de fala reproduzidos no veículo A. ....	98
Figura 6.11: Espectro em bandas de oitavas dos sinais de fala reproduzidos no veículo B. ....	99
Figura 6.12: Ruídos captados com o veículo A a 100 km/h (asfalto): a)	

espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR.102

Figura 6.13: Ruídos captados com o veículo A a 40 km/h (calçamento): a) espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR.103

Figura 6.14: Ruídos captados com o veículo B no pavimento asfáltico: a) espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR a 100 km/h. .... 104

Figura 6.15: Ruídos captados com o veículo B no calçamento poliédrico: a) espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR a 40 km/h. .... 105

Figura 6.16: Espectro em bandas de oitava dos ruídos captados com o veículo B em condição estática. .... 107

Figura 6.17: Índice de articulação em função da SNR para o veículo B em ensaio estático: a) ruído do ventilador saída A; b) ruído do ventilador saída B; c) ruído do motor a 3000 rpm..... 108

Figura 6.18: Curva da equalização aplicada aos sinais de fala..... 109

Figura 6.19: Espectro em bandas de oitavas dos sinais de fala do veículo A equalizados..... 110

Figura 6.20: Espectro de oitavas dos sinais de fala do veículo B equalizados. .... 110

Figura 6.21: Índice de articulação com e sem equalização do sinal de fala: a) veículo B a 40 km/h em calçamento poliédrico; b) veículo B a 100 km/h no asfalto; c) veículo B, ventilador de climatização, saída B; d) veículo A a 100

km/h no asfalto.....	111
Figura 7.1: Nova arquitetura proposta para o sistema de sonorização automotivo.....	116
Figura 7.2: Arquitetura elétrica automotiva de alta eficiência. (adaptado de [1]) .....	118
Figura 7.3: Circuito simplificado do amplificador classe D.....	120
Figura 7.4: Dissipação de potência em função da potência de saída: a) amplificador classe AB em ponte; b) amplificador classe D. ....	122
Figura 7.5: Gráficos da distorção harmônica total e ruído em função da a) potência de saída, e b) frequência do amplificador classe D . ....	124
Figura 7.6: Diagrama de blocos do transdutor ativo. ....	125
Figura 7.7: Conexões entre o CDAA e outros componentes do automóvel. ....	127
Figura 7.8: Diagrama de blocos do amplificador CDAA.....	128
Figura 7.9: Fotografia do protótipo do amplificador CDAA.....	129
Figura 7.10: Espectro do sinal de tensão de saída do amplificador em modo de espera e com sinal de amplitude de -120 dB FS.....	130
Figura 7.11: Espectro do sinal de tensão de saída do amplificador (-6 dB FS). ....	131
Figura 7.12: Espectro de frequências do sinal de tensão de saída do amplificador (0 dB FS).....	131

Figura 7.13: Resposta em frequência do amplificador a 0 dB FS (fundamental e harmônicos).....	132
Figura 7.14: Resposta em frequência do amplificador a 0 dB FS (componente fundamental).....	133
Figura 7.15: Distorção harmônica total em função da frequência.....	134
Figura 7.16: Distorção harmônica total (THD) em função da potência de saída. ....	135
Figura 7.17: Comparação do NPS dentro do veículo (classe D e classe AB). .....	136
Figura 7.18: THD em função da frequência da resposta eletroacústica (classe D e classe AB).....	137
Figura 7.19: Circuito da entrada de alimentação do CDAA.....	138
Figura 7.20: Espectro do sinal de corrente da alimentação do amplificador sem o indutor.....	139
Figura 7.21: Espectro do sinal de corrente da alimentação do amplificador com o indutor. ....	139
Figura 7.22: Eficiência em função da potência de saída do amplificador.	141
Figura A.1 : Esquema de instrumentação para caracterização da linha de alimentação do autorrádio. ....	159
Figura A.2 : Esquema de instrumentação para caracterização eletroacústica do sistema de sonorização automotiva. ....	160

Figura A.3 : Diagrama em blocos do sistema de medição da tensão e corrente no alto-falante em bancada.....	161
Figura A.4 : Diagrama em blocos do sistema de medição da tensão e corrente no alto-falante em veículo.....	162
Figura A.5 : Diagrama em blocos do sistema de medição biauricular em veículo. ....	163
Figura A.6 : Esquema de instrumentação para caracterização da eficiência do amplificador em bancada. ....	164
Figura A.7 : Painel virtual do sistema de instrumentação – módulo de medição da eficiência. ....	165
Figura B.1 : Diagrama esquemático (folha 1 de 4).....	167
Figura B.2 : Diagrama esquemático (folha 2 de 4).....	168
Figura B.3 : Diagrama esquemático (folha 3 de 4).....	169
Figura B.4 : Diagrama esquemático (folha 4 de 4).....	170
Figura B.5 : Ilustração da placa de circuito impresso.....	172

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Parâmetros físicos do alto-falante [21].....	24
Tabela 7.1: Lista de especificações CDAA implementado.....	127
Tabela 7.2: Comparação entre o consumo de corrente elétrica e a dissipação de potência .....	140
Tabela A.1: Lista dos equipamentos do sistema de instrumentação virtual...	157
Tabela B.1: Lista de materiais.....	171

# Nomenclatura

*AGC* – controle automático de ganho

*AI* – *articulation index*

*AL<sub>CONS</sub>* – perdas na articulação de consoantes

*AM* – *amplitude modulation*

*B* – densidade de fluxo magnético

*BTL*– *bridge tied load*

*CC* – corrente contínua

*CD* – *compact disc*

*CDA* – amplificador automotivo classe D (*Class D Automotive Amplifier*)

*CVC* – consoante-vogal-consoante

*D<sub>C</sub>* – distância crítica

*DAC* – conversor digital-analógico

*DSP* – processador de sinais digitais (*digital signal processor*)

*DVD* – *digital video disc*

*EMC* – compatibilidade eletromagnética

*EMI*– *electromagnetic interference*

*F* – força de Lorentz

*FT* – funções de transferência acústicas

*FS* – fundo de escala (*full scale*)

$\Phi_M$  – coeficiente de transdução eletromecânica

*HATS* – simulador de cabeça e torso (*head and thorso simulator*)

*I* – corrente elétrica

*I<sub>cc</sub>* – corrente de alimentação

*I<sup>2</sup>S* – *Integrated Interchip Sound*

*l* – comprimento do condutor

*L<sub>0</sub>* – indutância da bobina do transdutor

*LASER* – *light amplification by stimulated emission of radiation*

*LF*– anterior esquerdo (*left-front*)

*LR* – posterior esquerdo (*left-rear*)

*m* – massa do conjunto móvel do transdutor

*MLS* – *maximum length sequence*

$\eta$  – eficiência

*p<sub>ce</sub>* – potência dissipada em um dos transistores de um amplificador classe B ideal

*P<sub>d</sub>* – dissipação de potência de um amplificador

## Nomenclatura

---

$P_{in}$  – potência de entrada

$P_{max}$  – potência máxima de saída

$P_{out}$  – potência de saída

$PWM$  – modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*)

$reg$  – regulação de carga

$R_0$  – resistência da bobina do transdutor

$R_L$  – impedância nominal do alto-falante

$R_m$  – resistência mecânica

$R_r$  – resistência de radiação acústica

$RF$  – anterior direito (*right-front*)

$RR$  – posterior direito (*right rear*)

$s$  – rigidez

$SE$  – *single-ended*

$SEP-A$  – sistema elétrico de potência automotivo

$SNR$  – razão sinal-ruído

$S/PDIF$  – *Sony Philips Digital Interconnect Format*

$NPS$  – nível de pressão sonora

$STI$  – índice de transmissão da fala (*speech transmission index*)

$SVRR$  – *ripple rejection ratio*

$T$  – tempo de reverberação

$THD$  –distorção harmônica total (*total harmonic distortion*)

$THD+ruído$  –distorção harmônica total e ruído

$TI$  – *transmission index*

$u$  – velocidade

$V$  – tensão induzida nos terminais da bobina do transdutor

$v_{ce}$  – tensão entre coletor e emissor

$v_{pico}$  – tensão de pico à saída de um amplificador classe B ideal

$V_{rms}$  – tensão eficaz do sinal de áudio

$V_{cc}$  – tensão de alimentação

$V_{pp}$  – tensão pico a pico do sinal de áudio

$X_0$  – reatância da bobina do transdutor

$X_r$  – reatância de radiação acústica

$W(k)$  – fator de ponderação por banda de frequência

$Z_E$  – impedância total vista nos terminais elétricos do alto-falante

$Z_{EB}$  – impedância vista no lado elétrico do transdutor com a bobina imobilizada

$Z_{mo}$  – impedância vista no lado mecânico do transdutor com o circuito elétrico em aberto

$Z_{MOT}$  – impedância móvel vista no lado elétrico do transdutor

$Z_r$  – impedância de radiação acústica

# Capítulo 1

## Introdução da Tese de Doutorado

### 1.1 Contextualização do trabalho e motivação

Os sistemas de áudio vêm assumindo maior importância junto aos automóveis de passeio graças a novos serviços, principalmente ligados a área de telecomunicações e informática, que se desenvolveram nos últimos anos, além da tradicional demanda pelo entretenimento de ouvir as músicas ou informações com qualidade durante a utilização do veículo. A fim de atender a tais demandas, os sistemas de sonorização automotiva têm apresentado notável ganho de complexidade, incorporando novos circuitos e interfaces, assim como acontece com vários outros sistemas eletrônicos embarcados (ex.: computador de bordo e quadro de instrumentos).

Por outro lado, o consumo energético do crescente número de componentes eletro-eletrônicos num automóvel tem impacto na sua autonomia, pois esta energia é conseguida diretamente no eixo do motor de combustão interna, através do alternador. Estima-se que um consumo elétrico igual a 100 W equivale a adicionar uma massa de 50 kg ao veículo, ou diminuir a sua autonomia em 0,2 km/l [1].

Com o advento do carro elétrico, o conceito de eficiência tornou-se muito importante para todos que trabalham na concepção de sistemas eletroeletrônicos embarcados em automóveis. Assim, novas abordagens de projeto com métodos que levem a componentes mais eficientes e novas arquiteturas se fazem necessárias. Busca-se também, com o emprego de novas tecnologias, reduzir a quantidade de materiais empregados e melhorar a qualidade das funcionalidades implementadas, tudo isso sem aumento dos custos.

No caso dos sistemas de sonorização automotiva, que têm o consumo médio estimado igual a 100 W, existe uma percepção de que é possível reduzir o consumo e as perdas nos amplificadores de potência e também melhorar o acoplamento vibroacústico dos alto-falantes ao meio elástico ar dentro do habitáculo. Também é perceptível que a inteligibilidade desses sistemas é prejudicada pelos diversos ruídos presentes no habitáculo do veículo e pelo posicionamento dos alto-falantes, que comprometem a cobertura acústica.

Não foram encontrados na literatura científica registros de esforços no sentido de melhorar a eficiência do sistema de áudio veicular. Ao contrário, o que se vê são fabricantes de automóveis de alto padrão lançando no mercado sistemas de som com um número cada vez maior de alto-falantes (até 16) e consumo de potência superior a 600 W.

Contudo, já são conhecidos métodos para diminuir o consumo e aumentar a eficiência dos amplificadores de potência, por exemplo. São os amplificadores classe D [2, 3], que possibilitam reduzir também o emprego de materiais na construção do amplificador, mantendo a qualidade sonora.

Também já são bem difundidas as metodologias para modelar um alto-falante e para projetar gabinetes que enclausurem o transdutor e melhorem o seu acoplamento acústico com o ambiente [4, 5, 6, 7, 8]. Contudo, esse conhecimento não vem sendo utilizado em aplicações de áudio

automotivas, exceto pelos trabalhos publicados pelo engenheiro norte-americano Roger Shively, da Harman/Becker Automotive System [9, 10, 11]. Em seus artigos, Shively discute a instalação dos alto-falantes no veículo e o seu impacto na percepção auditiva dos ouvintes, além de métodos para determinar o desempenho do sistema de áudio automotivo a partir de testes subjetivos.

De fato, a questão da avaliação da qualidade sonora do sistema é mais discutida na literatura [12, 13]. Busca-se correlacionar resultados de medições de parâmetros objetivos com a opinião média de determinado grupo de ouvintes treinados. Clark [14] coloca o tema em perspectiva e compara o ambiente automotivo a outros ambientes acústicos usuais como, por exemplo, salas de concerto e salas de *home theater*.

Outro pesquisador cujo trabalho merece citação é o Professor Angelo Farina (Universidade de Parma, Itália). Dr. Farina, muitas vezes em parceria com membros da indústria, publicou vários trabalhos relacionados ao tema áudio automotivo. Um dos assuntos abordados foi o desenvolvimento de um método para corrigir a resposta de um sistema de áudio automotivo através de equalização inversa, o que permite também controlar a posição virtual de fontes sonoras dentro do habitáculo [15]. Embora os resultados de testes subjetivos tenham sido encorajadores, a técnica não é adaptada para tratar com as não linearidades típicas de componentes de áudio.

Outra contribuição foi no campo da inteligibilidade dos sistemas automotivos [16], onde o Dr. Farina apresenta um método para medir a inteligibilidade que aplica sequências de comprimento máximo (*maximum length sequence* – MLS) para extrair a resposta ao impulso do sistema. A sua conclusão é que a concepção de sistemas de áudio automotivos visando à máxima inteligibilidade demanda uma abordagem diferente daquela empregada quando o objetivo é a

reprodução de música no veículo, principalmente nos temas de isolamento e tratamento acústico do habitáculo.

Assim, o que motiva o presente trabalho de pesquisa é a oportunidade vislumbrada de propor melhorias para o sistema de sonorização veicular que objetivam a redução no seu consumo e o aumento da sua eficiência, o que não foi abordado anteriormente. Indo além, se for possível uma ruptura total com o atual modelo de arquitetura desses sistemas, pode-se propor também alcançar uma melhoria na inteligibilidade e redução de custo e de quantidade de materiais empregados através de novos componentes e um novo modelo de arquitetura.

Para tanto, essa tese apresenta inicialmente os resultados de um trabalho de caracterização do sistema de áudio veicular, a fim de identificar e colocar em escala as grandezas e os parâmetros que permitem descrever o seu comportamento, além de apontar as direções que oferecem oportunidades reais para a proposta e implementação de melhorias. Foram utilizadas amostras de componentes do sistema de sonorização automotivos cedidos por fabricantes e também foram utilizados veículos de teste.

## 1.2 Objetivos da Tese de Doutorado

### 1.2.1 Objetivos Gerais

O principal objetivo desta tese de doutorado é, a partir de argumentos técnicos, fundamentados teórica e experimentalmente, apresentar uma nova arquitetura para os sistemas de áudio automotivos com melhorias na eficiência global, o que inclui a diminuição do consumo e o aumento da eficiência energética de seus componentes, além de melhoria na inteligibilidade.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

1. Estudo aprofundado dos fenômenos eletroacústicos envolvidos na reprodução sonora.
2. Estudo do ambiente veicular sob a perspectiva do sistema de áudio.
3. Implementação de um sistema de medição eletroacústica para caracterização do sistema automotivo.
4. Estudo do consumo, da eficiência e da inteligibilidade do sistema de sonorização automotivo.
5. Especificação e proposta de nova arquitetura e novos componentes para sistemas de áudio veiculares com melhorias na eficiência.

## 1.3 Estrutura do texto

O Capítulo 2 apresenta uma caracterização dos sistemas de sonorização automotivos, no qual são descritas as funcionalidades e a arquitetura típicas desses sistemas, juntamente com os principais componentes que são o autorrádio e o alto-falante.

No Capítulo 3 é abordado o ambiente veicular, que é o sítio onde o sistema de áudio é instalado, alimentado e operado. São estudados os fenômenos elétricos e acústicos presentes no veículo e que influenciam o comportamento do sistema de som.

O Capítulo 4 apresenta um estudo sobre o consumo e a eficiência do autorrádio, com destaque na eficiência do amplificador de potência.

No Capítulo 5 é apresentada uma metodologia para a determinação experimental da eficiência da transdução eletroacústica realizada pelos alto-falantes instalados num automóvel.

O Capítulo 6 aborda a eficiência sob o ponto de vista da inteligibilidade do sistema de áudio

ao tratar com sinais de fala. O tema primeiramente é discutido numa perspectiva ampla para posteriormente serem apresentados os aspectos relativos à aplicação automotiva.

No Capítulo 7 são apresentados os conceitos que conduzem à proposta de uma nova arquitetura para o sistema de sonorização automotivo com melhorias na eficiência. A principal melhoria consiste na implementação do transdutor ativo com um amplificador classe D de entrada digital. Um protótipo foi projetado e construído e os resultados experimentais obtidos confirmam a redução no consumo e o aumento da eficiência de amplificação.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões finais do trabalho e as propostas de continuidade.

Do Capítulo 3 ao Capítulo 7 as discussões são fundamentadas em dados experimentais referentes a sinais eletroacústicos coletados por um sistema de instrumentação virtual especialmente desenvolvido para esta pesquisa de doutorado. No Apêndice A são mostrados os diagramas de blocos de todos os instrumentos virtuais, juntamente com a descrição técnica de todos os sensores e conversores analógico-digital utilizados.

O Apêndice B apresenta os diagramas elétricos, a lista de materiais e o desenho da placa de circuito impresso do amplificador de potência cujo projeto é apresentado no Capítulo 7.

Foram executados ensaios em bancada e também em veículos de teste, sendo que nesse último caso uma parte das medições foi feita numa pista de testes e outra parte feita numa câmara fonoisolada. Em algumas das medições do nível de pressão sonora, os microfones foram instalados num simulador de torso e cabeça (HATS – *head and thorso simulator*). A maior parte dos ensaios em veículos de teste foi executada no Laboratório de Eletroacústica da montadora de automóveis Fiat Chrysler Automobiles, em Betim, Minas Gerais, durante o estágio de doutorado sanduíche.

# Capítulo 2

## Caracterização dos sistemas de áudio automotivos

### 2.1 Introdução

Os sistemas de sonorização automotiva se distinguem dos demais sistemas eletrônicos embarcados num veículo de baixo custo tanto pela complexidade de suas funcionalidades quanto pelo seu critério de desempenho, que é a qualidade sonora percebida pelo usuário. Um mecanismo de leitura de discos óticos, um algoritmo para descompactação de sinais de áudio e um circuito de demodulação de sinais de rádio frequência são exemplos de funcionalidades encontradas num autorrádio que demandam circuitos muito mais complexos do que os circuitos para acionamento de lâmpadas ou pequenos motores elétricos comumente encontrados em automóveis.

Assim, caracterizar e entender o funcionamento de um sistema de som veicular demanda métodos sofisticados de instrumentação e a capacidade de abordar cada componente de forma

individual, mas não em detrimento de uma visão sistêmica, que é considerar a interação entre os diversos componentes, além do ambiente onde o sistema está embarcado.

Neste capítulo é discutida a arquitetura típica de um sistema de áudio veicular de baixo custo e são apresentados os dois principais componentes desse sistema que são o autorrádio e o alto-falante. No próximo capítulo será apresentado um estudo do ambiente veicular onde o sistema de áudio é instalado, de forma a evidenciar a natureza dos fenômenos presentes e o seu impacto na arquitetura.

## 2.2 Funcionalidades e arquitetura do sistema de áudio

Escutar músicas ou notícias, assistir a filmes, comunicar-se pelo telefone ou com o próprio veículo: essas são algumas das principais atividades de um usuário relacionadas a áudio dentro de um automóvel. A sonorização no veículo evoluiu desde os antigos receptores AM até os modernos sistemas multimídia com diversos monitores de vídeo e fones de ouvido sem fio em configurações de múltiplos canais. É comum denominar tais plataformas como “*infotainment*”, termo que associa informação e entretenimento, como representado na Figura 2.1.

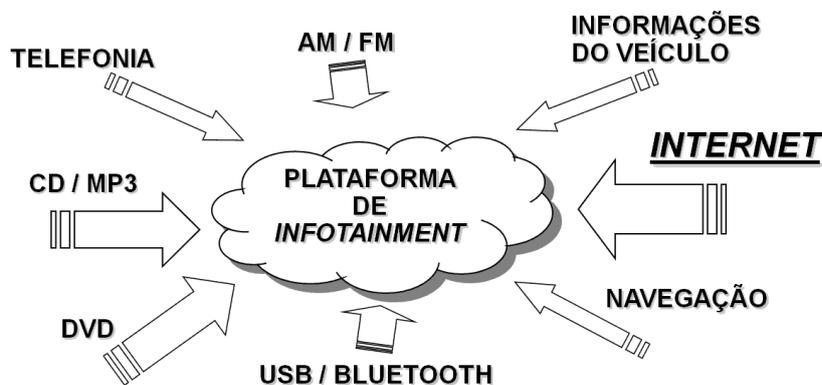


Figura 2.1: Serviços e funcionalidades numa plataforma de *infotainment* veicular.

Muitas das funcionalidades citadas são também utilizadas pelos usuários do automóvel, porém em outros ambientes e através de outros aparelhos (e.g.: telefone celular, MP3 *player*, *notebook*, *home theater*). Assim, não deve haver diferença no nível de qualidade sonora entre esses diversos equipamentos e o sistema de áudio automotivo. Além disso, deve existir compatibilidade entre as mídias de armazenamento e também entre os formatos de codificação do sinal de áudio.

A arquitetura de um sistema de sonorização refere-se às características individuais de seus componentes e também à maneira como estão dispostos e interagindo com o restante do veículo. Uma das arquiteturas mais encontradas em muitas categorias de veículos, principalmente de baixo custo, é composta essencialmente por três componentes: o autorrádio, os alto-falantes e os cabos (Figura 2.2). As linhas de alimentação, que são conectadas ao autorrádio, não são mostradas nessa figura. Outros componentes que também podem ser encontrados são: o microfone, a antena receptora de rádio com o seu cabo e uma caixa acústica amplificada dedicada a sinais de baixa frequência (sons graves, abaixo de 200 Hz).

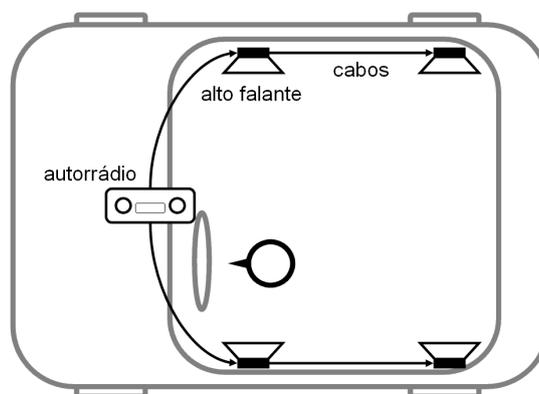


Figura 2.2 : Sistema de sonorização composto por autorrádio, alto-falantes e cabos de sinais.

Os sinais de áudio oriundos de diversas fontes são condicionados, decodificados, processados

e amplificados pelo autorrádio e enviados aos alto-falantes para a conversão eletroacústica e produção de som no habitáculo. A Figura 2.3 apresenta as etapas percorridas pelo sinal de áudio num sistema automotivo desde a sua fonte até o usuário. As etapas podem ser vistas como elos de uma corrente, onde o desempenho global do sistema é determinado pelo desempenho do elo mais fraco.

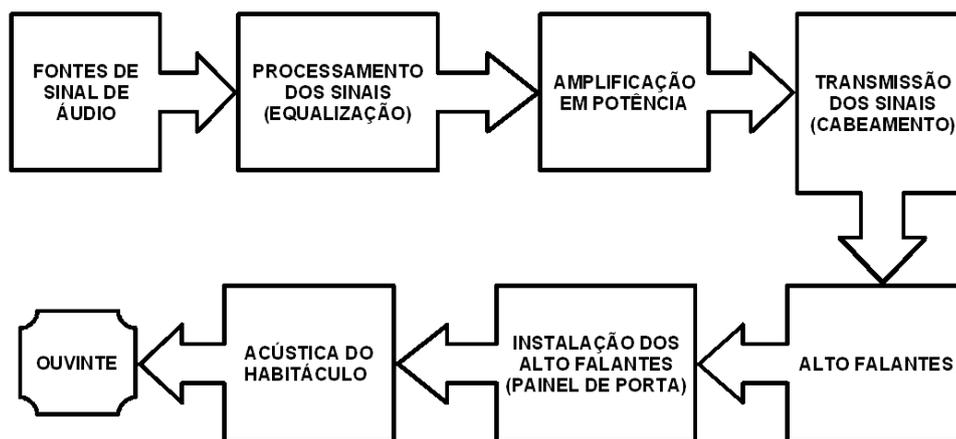


Figura 2.3: Etapas de um sinal de áudio num sistema automotivo.

Os sinais de áudio podem ser música ou fala. Para o sistema de sonorização, as fontes desses sinais podem ser: a) um microfone instalado no veículo, b) um telefone conectado ao autorrádio; c) alguma mídia de armazenamento (ex.: CD/DVD, memórias FLASH), d) sinais de radiofrequência captados pela antena e demodulados. Antes de serem convertidos em som, os sinais de áudio precisam ser amplificados e transmitidos através de um cabeamento relativamente longo. Isso porque o amplificador de potência é, normalmente, instalado no autorrádio, enquanto os alto-falantes situam-se nas portas e/ou na tampa do porta-malas.

A eficiência com que os sinais de áudio são convertidos da forma elétrica para a acústica depende das características dos alto-falantes e da instalação destes nas portas, que agem como radiadores. O campo sonoro no habitáculo depende das suas características acústicas, como

geometria, absorção e isolamento. Ao longo da cadeia de áudio a informação pode se deteriorar devido às perdas de potência ou pela ação das não linearidades particulares de cada componente, ou ainda sofrer interferência de ruídos (elétricos ou acústicos).

Como será discutido nos próximos capítulos, a questão do consumo energético e da eficiência dos sistemas de áudio automotivo representa um significativo ponto fraco da arquitetura atualmente empregada na maioria dos automóveis. Indo além, será também apresentada uma nova arquitetura alternativa com conceitos e tecnologias mais modernos que visa a propor melhorias referentes ao consumo e à eficiência do sistema.

Nesse ponto da discussão é importante que seja feita uma caracterização dos dois principais componentes de um sistema de sonorização automotiva: o autorrádio e o alto-falante. O objetivo é entender a arquitetura interna desses componentes, as soluções tecnológicas empregadas, e também identificar as suas limitações.

## 2.3 Caracterização do autorrádio

Sendo o autorrádio o único componente ativo nos sistemas atuais, cabe a ele implementar a maioria das funcionalidades inerentes ao sistema de sonorização. O diagrama de blocos da Figura 2.4 mostra a estrutura típica de um autorrádio e as direções dos fluxos de sinais e energia. Os blocos à direita na figura são circuitos que trabalham com os sinais de áudio, desde a leitura dos programas a partir de diversas mídias de armazenamento, até o processamento no bloco DSP – processador de sinais digitais (*digital signal processor*) e a amplificação em potência. À esquerda é mostrado o bloco microcontrolador, que é responsável por implementar a interface homem-máquina juntamente com os interruptores e *rotary encoders* do teclado, o *display* e as memórias que armazenam as informações de configuração do autorrádio. O último bloco, no

canto inferior esquerdo, é o circuito regulador de tensão, que tem como função converter a tensão de alimentação do barramento automotivo (nominalmente igual a 13,5 V) a níveis mais baixos para alimentar os circuitos eletrônicos citados.

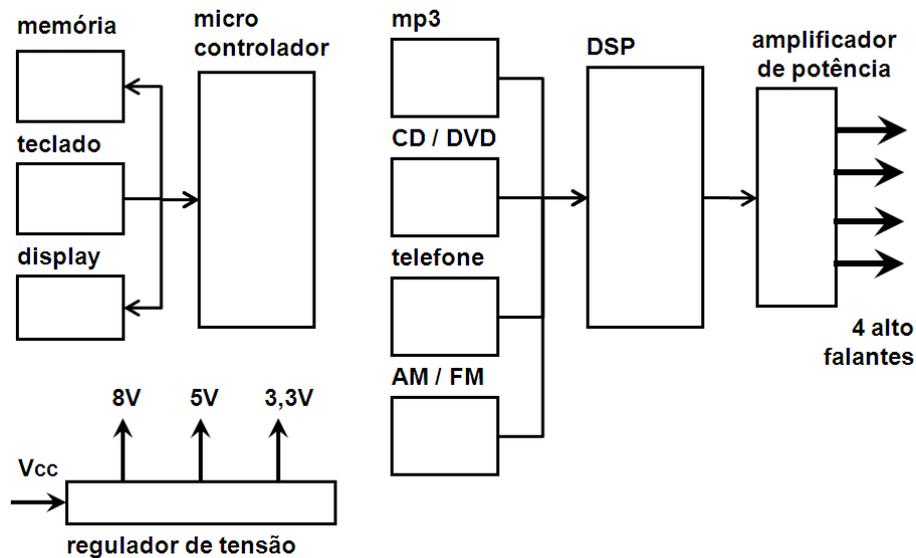


Figura 2.4: Diagrama de blocos de um autorrádio típico.

A Figura 2.5 mostra uma placa de circuito impresso principal (placa-mãe) de um autorrádio. A placa contém um conector principal que recebe a alimentação do barramento elétrico do veículo e também envia os sinais de áudio amplificados aos quatro alto-falantes. Logo ao lado do conector principal estão os filtros que atuam sobre a tensão de alimentação a fim de evitar que os ruídos presentes no barramento causem interferência nos circuitos internos do autorrádio. No centro da placa está em destaque um dos microprocessadores, juntamente com seus dois *chips* de memória. O amplificador de potência aparece na extremidade esquerda e, embora isso não seja mostrado nesta figura, é fixado a um radiador de calor de alumínio que normalmente costuma se estender por todo o comprimento deste lado da placa e com alguns milímetros de espessura.

O circuito do autorrádio que merece a maior atenção nos quesitos consumo energético e

qualidade de áudio é o amplificador de potência. Microprocessadores e seus periféricos não serão abordados nesta tese porque têm consumo menos significativo que o consumo do amplificador, como será mostrado no Capítulo 4. Os amplificadores, ao contrário, operam com a maior parte da potência consumida pelo autorrádio, apresentam perdas por dissipação e também têm influência na qualidade de áudio do sistema de sonorização.

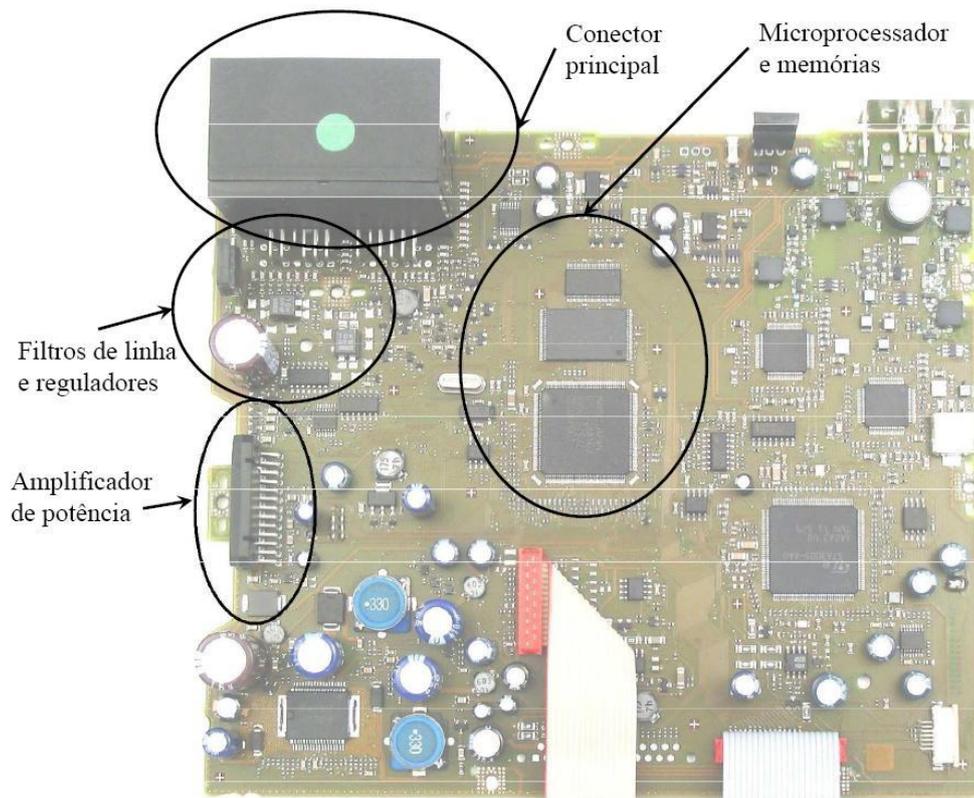


Figura 2.5: Placa-mãe de um autorrádio típico.

A seguir são discutidas as condições de operação de um amplificador de potência num automóvel e também o esquema de acionamento utilizado para entregar a potência ao alto-falante. Ao final dessa discussão são apresentadas as principais figuras de mérito consideradas na avaliação da qualidade de áudio de um amplificador automotivo típico, utilizando um modelo comercial como exemplo.

### 2.3.1 Amplificadores de potência automotivos

A transdução eletroacústica realizada pelo alto-falante é de baixa eficiência (entre 1 % e 10 %), principalmente por causa do acoplamento acústico, conforme será discutido adiante neste trabalho. Assim, é necessário injetar um sinal com potência relativamente alta no lado elétrico do alto-falante para produzir a potência sonora desejada. Como as fontes de sinais de áudio operam com baixo nível de potência, é necessário um dispositivo que amplifique esses sinais.

Os amplificadores de potência para sinais de áudio são circuitos especiais que se destinam a acionar alto-falantes com máxima fidelidade sonora. Para tanto, normalmente é empregada realimentação negativa, que também aumenta a rejeição do amplificador a ruídos oriundos da linha de alimentação. A potência de saída ( $P_{out}$ ) de um amplificador de potência pode ser calculada pela Equação 2.1:

$$P_{out} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} \quad (2.1)$$

onde  $V_{rms}$  é a tensão eficaz do sinal de áudio e  $R_L$  é o valor da impedância nominal do alto-falante, que no caso de sistemas automotivos é igual a 4  $\Omega$ .

A máxima tensão que um amplificador automotivo pode aplicar num alto-falante depende da sua tensão da alimentação ( $V_{cc}$ ), que é igual a 13,5 V em automóveis de passeio. A potência máxima ( $P_{max}$ ) para um sinal senoidal é:

$$P_{max} = \frac{(V_{pp}/2\sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{(V_{cc}/2\sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{(13,5/2\sqrt{2})^2}{4} = 5,7W$$

onde  $V_{pp}$  é a tensão pico a pico do sinal de áudio. Nesse caso a tensão  $V_{pp}$  é igual à tensão de

alimentação ( $V_{pp} = V_{cc}$ ) e representa um caso ideal. Na prática, os transistores entram no estado de saturação antes que o sinal de áudio atinja o valor da alimentação e a potência máxima é menor que no caso ideal.

A Figura 2.6 ilustra a configuração de amplificação denominada meia ponte (ou *single ended* – SE). O sinal amplificado contém um componente contínuo com amplitude igual à metade da tensão de alimentação, o que demanda um capacitor em série com o alto-falante a fim de eliminar esse componente. Uma vantagem desta configuração é a possibilidade de conectar o terminal negativo do alto-falante diretamente ao chassi do veículo em local próximo, reduzindo assim o comprimento de um dos cabos.

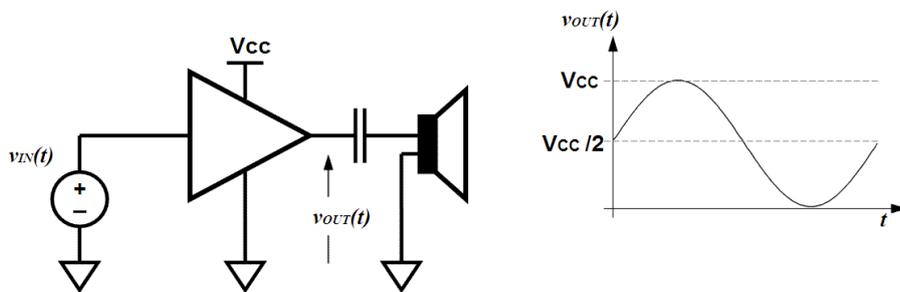


Figura 2.6: Configuração meia ponte.

É possível obter maior potência de saída com a configuração em ponte completa (ou *bridge tied load* – BTL) mostrada na Figura 2.7. Nessa configuração são utilizados dois circuitos amplificadores do tipo meia ponte iguais ao da Figura 2.6, porém a polaridade do sinal de áudio é invertida na entrada de um dos amplificadores, resultando em  $V_{pp} = 2V_{cc}$ . Dessa forma a potência máxima é:

$$P_{max} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} = \frac{(V_{pp}/2\sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{(V_{cc}/\sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{(13,5/\sqrt{2})^2}{4} = 22,8W$$

Nesta configuração a tensão contínua ( $V_{cc}/2$ ) é comum aos dois terminais do alto-falante, o que permite eliminar o capacitor em série. Entretanto, pelo mesmo motivo não é mais possível conectar um dos terminais ao chassi do automóvel.

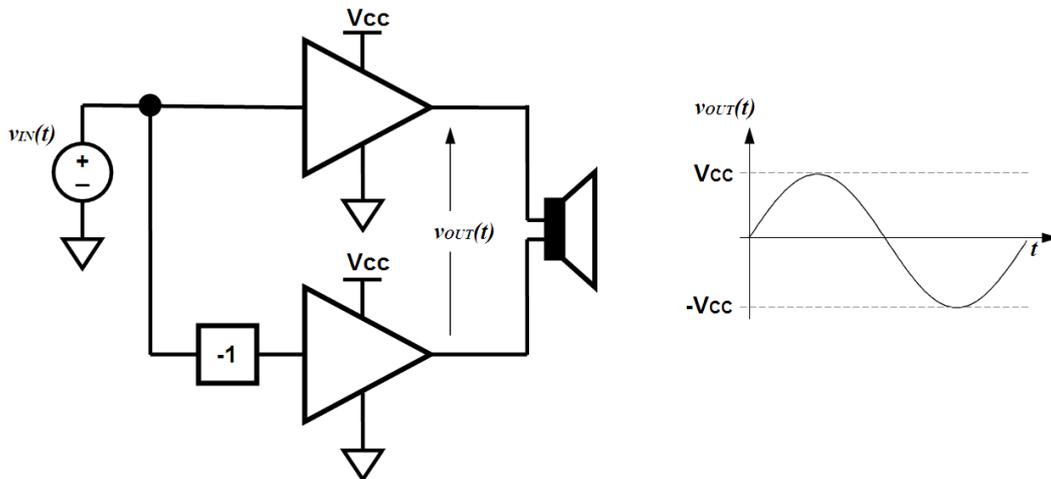
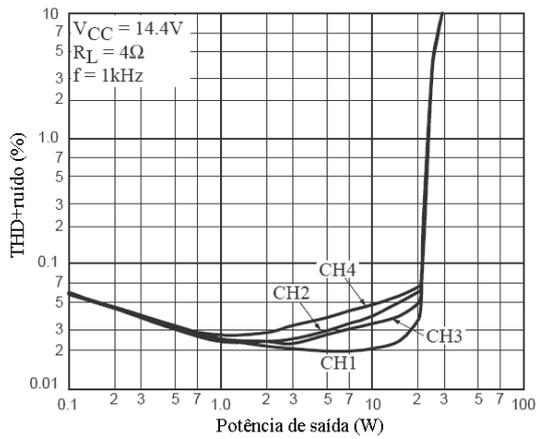


Figura 2.7: Configuração ponte completa.

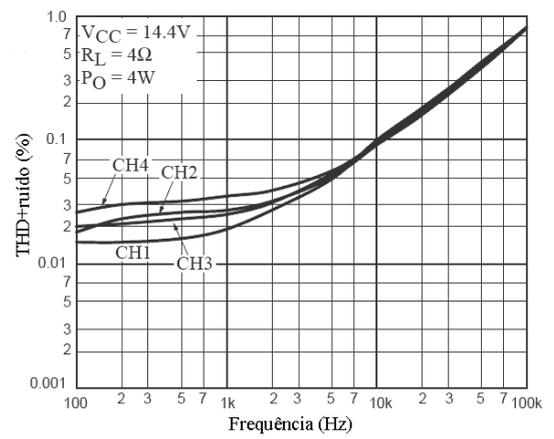
### 2.3.2 Qualidade de áudio de amplificadores de potência

Amplificadores são projetados para atender a critérios relacionados a distorção, ruído e resposta em frequência. Além disso, devem apresentar imunidade a interferências externas, como ruídos na linha de alimentação. As figuras de mérito e os métodos de medição dos parâmetros relacionados aos critérios aceitos pela comunidade científica e pela indústria são reunidos em normas internacionais, como por exemplo, a IEC 60268-3 [17]. Essa norma, que trata da validação de amplificadores de potência para sinais de áudio, apresenta as características a serem especificadas e os seus métodos de medição.

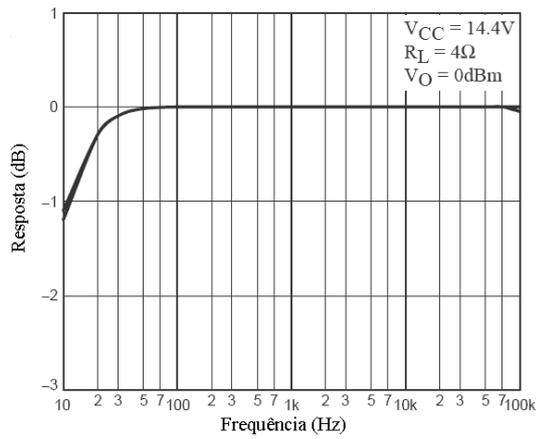
Como exemplo destas figuras de mérito, na Figura 2.8 são apresentados gráficos retirados da folha de dados do amplificador comercial Sanyo Semiconductor LA47202P, classe AB em ponte completa [18].



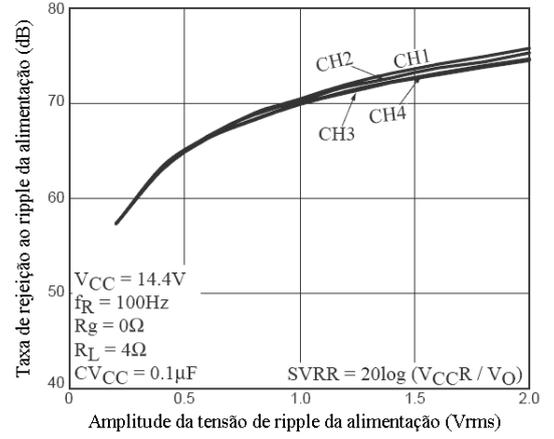
a)



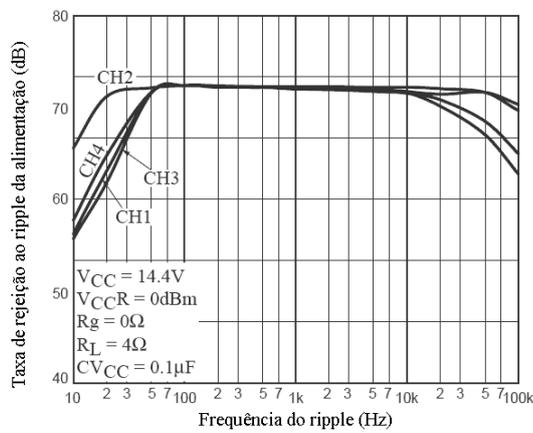
b)



c)



d)



e)

Figura 2.8: Figuras de mérito de um amplificador de potência para autorrádio. [18]

A Figura 2.8a apresenta os valores da distorção harmônica total e ruído (THD+ruído – *total harmonic distortion plus noise*) do sinal de áudio da saída em função da potência de saída do amplificador. A THD+ruído é uma figura de desempenho que possibilita a identificação de alguns tipos de não linearidades do amplificador, e que é normalmente considerada por apresentar alto grau de correlação com a qualidade sonora percebida, mesmo pelo ouvinte leigo.

É possível perceber que a THD+ruído varia entre cada um dos quatro canais na região entre 1 W e 20 W. Contudo, é importante considerar que o gráfico apresenta o eixo vertical em escala logarítmica e a variação se mantém entre 0,02 % e 0,07 %. Ainda nessa figura, é possível identificar o valor de potência máxima, definido como aquela na qual a THD+ruído é igual a 10 % [17], ou seja, pouco menor que 30 W.

A Figura 2.8b apresenta as curvas de THD+ruído em função da frequência. Nas condições especificadas no gráfico, o valor da THD+ruído se mantém abaixo de 0,2 % em frequências menores que 20 kHz, que é a frequência limite superior da audição humana. A Figura 2.8c mostra a resposta em frequência do amplificador, que varia menos que 1 dB entre 10 Hz e 100 kHz. Conforme será discutido adiante, esse desempenho referente à distorção, ao ruído e à resposta em frequência é muito superior ao dos alto-falantes.

A Figura 2.8d mostra a taxa de rejeição do amplificador a um distúrbio senoidal (*ripple*) somado à tensão de alimentação (SVRR – *ripple rejection ratio*) em função da amplitude do *ripple*. Se uma oscilação com frequência igual a 100 Hz e amplitude de 1 V contaminar a alimentação, o gráfico revela que o sinal de áudio à saída do amplificador apresentará um *ripple* decorrente da contaminação com amplitude igual a 316  $\mu$ V, ou 70 dB menor. A Figura 2.8e mostra como a SVRR varia em função da frequência do *ripple*. Dentro da região entre 100 Hz e 10 kHz a SVRR se mantém praticamente constante, porém fora desta região ela diminui e varia

entre os quatro canais do amplificador.

Outras figuras de mérito utilizadas para qualificar um amplificador de potência são: amplitude do ruído de fundo (igual a  $100 \mu\text{V rms}$  no modelo estudado), distorção por intermodulação, separação entre canais, diferenças de ganho e fase entre canais.

## 2.4 O Alto-Falante

Alto-falantes automotivos apresentam características construtivas que são específicas da aplicação. No projeto de um automóvel, fatores como estética, segurança e desempenho (do veículo) são prioritários e os alto-falantes são desenhados para atender a esses fatores, mesmo que seja em detrimento da sua qualidade de áudio e eficiência. As demandas da aplicação automotiva geralmente têm impacto na geometria do alto-falante e nos materiais utilizados, para que possam suportar as severas condições ambientais dentro de um automóvel.

A seguir é apresentado o princípio de funcionamento de um alto-falante, partindo da discussão sobre o modelo do transdutor eletrodinâmico, que é o caso mais geral. Ao final, como exemplo, é abordado um alto-falante comercial através da análise das informações da folha de dados.

### 2.4.1 Princípio de funcionamento do transdutor eletrodinâmico

O alto-falante é um transdutor que converte energia elétrica em energia acústica. A Figura 2.9 mostra o esquema construtivo simplificado de um transdutor eletrodinâmico típico, que é o caso dos alto-falantes e dos microfones dinâmicos [5]. Nessa figura é vista uma bobina móvel em corte, com comprimento do condutor igual a  $l$ , imersa num campo magnético com densidade de fluxo  $B$ . Uma corrente elétrica  $\mathbf{I}$  passando pela bobina produz uma força (força de Lorentz,

$\mathbf{F}=B\mathbf{I}$ ) no oscilador mecânico formado pela massa  $m$ , pela mola com rigidez  $s$  e pela resistência mecânica  $R_m$ . O movimento se dá na direção  $x$ . Além disso, pela Lei de Lenz uma tensão  $\mathbf{V}$  é induzida nos terminais da bobina quando a massa se move com velocidade  $\mathbf{u}$  ( $\mathbf{V}=B\mathbf{u}$ ).

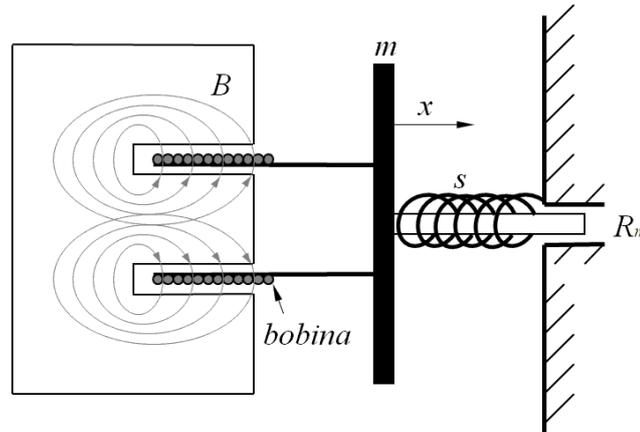


Figura 2.9: Esquema construtivo de um transdutor eletrodinâmico típico [5].

Na Figura 2.10 é apresentado o circuito elétrico equivalente do transdutor eletrodinâmico [4]. As equações canônicas, mostradas na Equação 2.2, são: (obs.: letras em negrito representam variáveis complexas)

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{Z}_{EB}\mathbf{I} + \Phi_M\mathbf{u} \\ \mathbf{F} &= -\Phi_M\mathbf{I} + \mathbf{Z}_{mo}\mathbf{u} \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde  $\mathbf{Z}_{EB}$  é a impedância vista no lado elétrico com a bobina imobilizada ( $\mathbf{u} = 0$ ), e  $\mathbf{Z}_{mo}$  é a impedância vista no lado mecânico com o circuito elétrico em aberto ( $\mathbf{I} = 0$ ). O termo  $\Phi_M$  é o coeficiente de transdução eletromecânica, que pode ser considerado como sendo real e constante, como mostrado na Equação 2.3:

$$\phi_M^2 = Bl \quad (2.3)$$

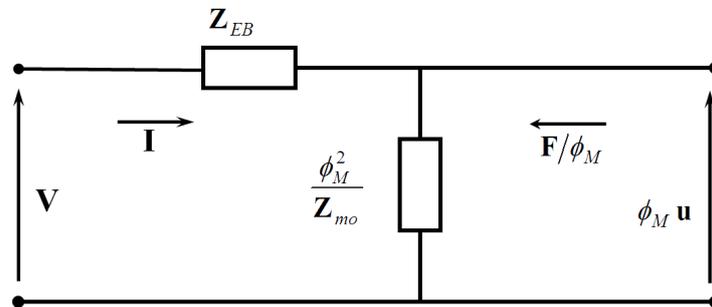


Figura 2.10: Circuito equivalente do transdutor eletrodinâmico [4].

As impedâncias do circuito equivalente representam os parâmetros físicos do transdutor, como mostrado nas Equações 2.4 e 2.5:

$$Z_{EB} = R_0 + j\omega L_0 \quad (2.4)$$

$$Z_{mo} = R_m + j(\omega m + s/\omega). \quad (2.5)$$

onde  $R_0$  e  $L_0$  são a resistência e a indutância da bobina.

### 2.4.2 Modelo do alto-falante

Na Figura 2.11 são mostradas as principais partes de um alto-falante real. Nele, a bobina é acoplada a uma das extremidades de uma membrana rígida em forma de tronco de cone que é presa à estrutura do alto-falante na sua outra extremidade através de uma suspensão elástica. Essa suspensão, cuja função primária é permitir que a membrana vibre, também tem a função de minimizar o movimento do cone fora do eixo axial, para que se comporte de maneira similar a um pistão rígido, e também de amortecer os seus modos de vibração. A aranha, outra membrana

elástica, mantém a bobina suspensa no centro do entreferro e provê a força restauradora.

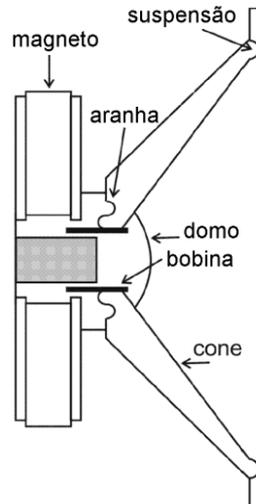


Figura 2.11: Principais componentes de um alto-falante eletrodinâmico.

A função do cone e do domo é deslocar o ar adjacente de acordo com o movimento da bobina, produzindo som. Assim, esse volume de ar deslocado é visto pelo alto-falante como uma carga acústica, ou impedância de radiação  $Z_r = R_r + jX_r$ .

A Figura 2.12 apresenta o circuito equivalente dinâmico de um alto-falante. A impedância total  $Z_E$  vista nos terminais elétricos do transdutor é mostrada na Equação 2.6:

$$Z_E = \frac{V}{I} = Z_{EB} + Z_{MOT}, \quad (2.6)$$

onde  $Z_{MOT}$  é a impedância móvel vista do lado elétrico do transdutor, que representa a impedância de radiação acústica  $Z_r$  associada à impedância mecânica  $Z_{mo}$ , como mostra a Equação 2.7:

$$\mathbf{Z}_{MOT} = \frac{\Phi_M^2}{\mathbf{Z}_{mo} + \mathbf{Z}_r} \quad (2.7)$$

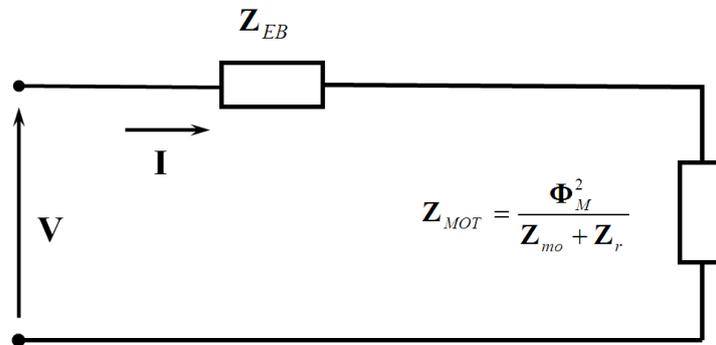


Figura 2.12: Circuito elétrico equivalente do alto-falante.

Esse modelo é bem validado para baixas frequências e pequenos sinais. Com sinais de grande amplitude, alguns tipos de não linearidades manifestam-se de forma significativa, alterando o comportamento dinâmico do alto-falante [19, 20]. Ainda assim, o modelo linear tem sido muito utilizado para prever o comportamento eletroacústico do transdutor em conjunto com painéis radiadores ou caixas acústicas [6, 7, 8]. Por essa razão, é comum encontrar os parâmetros do modelo na folha de dados publicada pelo fabricante do alto-falante.

A Tabela 2.1 mostra os parâmetros do modelo de um alto-falante comercial tomado como exemplo, retirados da folha de dados [21]. A Figura 2.13 mostra a curva de impedância em função da frequência do alto-falante ao ar livre, ou seja, com mínima carga acústica. É possível obter os parâmetros elétricos e mecânicos através da medição da impedância complexa de um alto-falante, o que será abordado no Capítulo 5.

No gráfico da curva do módulo da impedância é possível verificar o comportamento do oscilador mecânico  $Z_{mo}$  através do pico de ressonância em 44 Hz. Também é possível perceber a

influência da resistência da bobina, que desloca a curva para cima, e da sua indutância, que é mais significativa a partir de 2 kHz.

Tabela 2.1: Parâmetros físicos do alto-falante [21].

Resistência do enrolamento ( $R_0$ )	6,2 $\Omega$
Indutância do enrolamento ( $L_0$ )	619 $\mu\text{H}$ (@ 1 kHz)
Massa do conjunto móvel ( $m$ )	16,9 g
Coefficiente de transdução ( $\Phi_M$ )	5,6 T.m
Rigidez ( $s$ )	5555 N/m
Resistência mecânica ( $R_m$ )	0,6 N.s/m

A Figura 2.14 apresenta a resposta em frequência eletroacústica do alto-falante instalado numa caixa tipo *bass reflex* com volume interno igual a 35 litros, dentro de uma câmara anecóica. Nesse caso o alto-falante foi excitado com 10 % da sua potência nominal. Também estão presentes na figura as respostas referentes ao segundo e ao terceiro harmônicos, que são mais significativos nas baixas frequências, menores que 100 Hz.

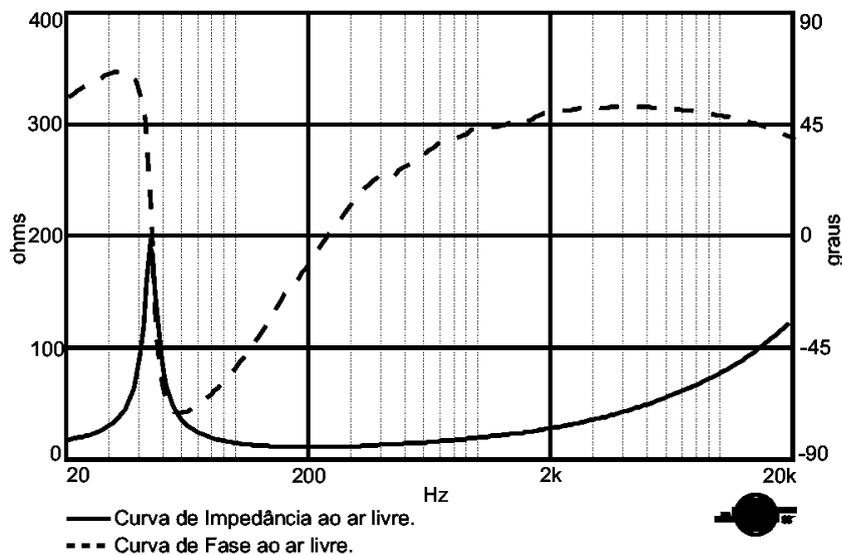


Figura 2.13: Curvas da impedância (módulo e fase) em função da frequência ao ar livre [21].

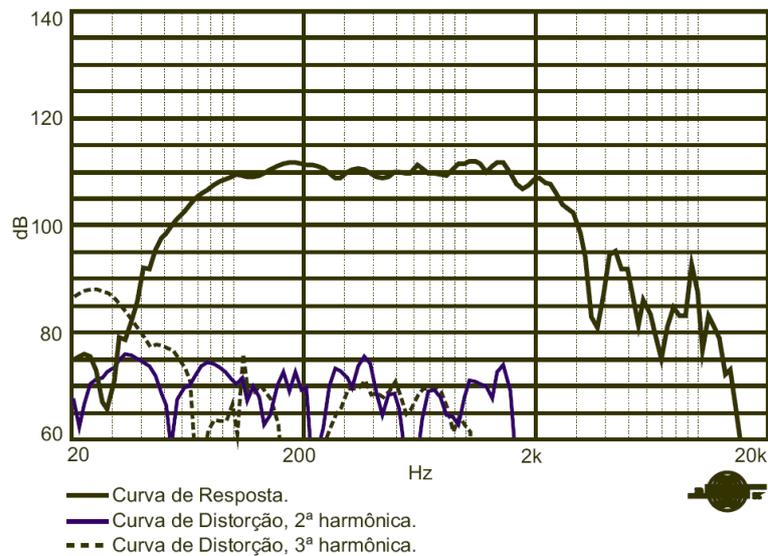


Figura 2.14: Resposta em frequência do alto-falante numa caixa tipo *bass reflex* de 35 litros [21].

## 2.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi visto que o sistema de sonorização automotivo recebe sinais a partir de diversas fontes de programas de áudio. Esses programas podem ser música ou voz falada. Atualmente, muitas das fontes de áudio disponibilizam esses sinais na forma digital, o que leva a concluir que a arquitetura eletrônica do sistema de áudio veicular pode ser baseada em circuitos processadores de sinais digitais (DSP) e seus periféricos (memórias, barramentos e interfaces de comunicação). Indo além, as funcionalidades implementadas pelo sistema referentes à decodificação, demodulação e processamento passam a ser vistas como componentes de *software* e que podem inclusive ser executadas em outras centrais de processamento.

Foram apresentados os dois principais componentes do sistema de áudio automotivo: o amplificador de potência e o alto-falante. Eles são importantes porque operam com as maiores potências do sistema e por isso estão suscetíveis a perdas que determinam a eficiência de todo o sistema.

Com relação ao amplificador de potência, foram abordadas as configurações e a topologia mais comumente encontradas em aplicações automotivas, que é a classe AB em ponte completa. Foram apresentadas algumas figuras de mérito que caracterizam de forma objetiva a qualidade de áudio de um amplificador comercial. Essas figuras serão utilizadas como referência ao longo deste trabalho.

Foi mostrado o princípio de funcionamento de um alto-falante dinâmico e as suas principais partes construtivas. Um modelo linear amplamente validado para baixas frequências e pequenos sinais foi apresentado, e também será utilizado adiante nessa tese no estudo da eficiência dos alto-falantes.

# Capítulo 3

## Estudo sobre o ambiente veicular

### 3.1 Introdução

Um automóvel é um ambiente severo para a sobrevivência de componentes eletrônicos e eletroacústicos devido à presença de fenômenos eletromagnéticos, térmicos e vibracionais que podem interferir nestes componentes. As origens desses fenômenos podem estar em outros componentes embarcados ou no ambiente externo ao veículo.

Para se proteger contra as interferências, e também para atender aos requisitos ligados a segurança, desempenho e custo, o projeto de um automóvel torna-se repleto de exigências e restrições que muitas vezes têm impacto na qualidade do serviço de componentes eletroeletrônicos.

Neste capítulo são estudados dois aspectos do ambiente veicular sob o ponto de vista do sistema de sonorização. O primeiro refere-se à alimentação do sistema de áudio, ou seja, o estudo do sistema elétrico de potência automotivo (SEP-A) e da qualidade da energia elétrica no veículo. O segundo aspecto refere-se às condições acústicas de um automóvel, ou seja, as

consequências da geometria e do tratamento acústico do habitáculo no desempenho do sistema de sonorização.

### 3.2 Modelo do sistema elétrico de potência automotivo

Uma representação simplificada do SEP-A é apresentada na Figura 3.1 [1]. Nela é possível identificar à esquerda os dois componentes ativos do sistema elétrico: o gerador (ou alternador) e a bateria. Quando o gerador está funcionando, a bateria torna-se passiva e consome energia a fim de recarregar-se. A tensão nominal do gerador é 13,5 V e a da bateria é 12 V.

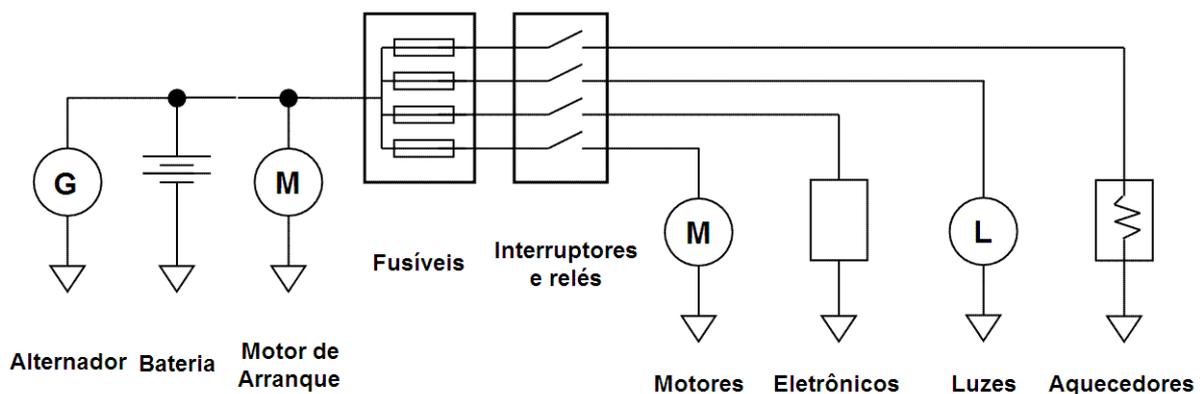


Figura 3.1: Modelo simplificado de um sistema de potência automotivo típico [1].

A principal carga do sistema elétrico é o motor de arranque, que é um motor de corrente contínua utilizado para dar partida no motor de combustão interna do veículo. Ele é alimentado pela bateria, que deve estar suficientemente carregada a fim de fornecer a potência necessária à partida.

No lado direito da Figura 3.1 estão representadas as demais cargas típicas de um SEP-A. Elas são agrupadas em quatro principais categorias: motores, centrais e sensores eletrônicos, componentes da iluminação interna e externa e, finalmente, resistências utilizadas para

aquecimento.

Cada um desses componentes é alimentado a partir de um relé ou interruptor e tem a sua linha de alimentação protegida por um fusível. Uma das simplificações deste modelo é a ausência de elementos (impedâncias) para representar os cabos de alimentação e os conectores. Essas impedâncias são de considerável importância nas análises da regulação de carga, das perdas e das interferências eletromagnéticas conduzidas.

Outro ponto importante e também desconsiderado no modelo diz respeito ao potencial negativo utilizado como referência (ou massa) no sistema elétrico. Ao contrário do que mostra a Figura 3.1, num veículo real os componentes elétricos são referenciados em potenciais diferentes. Isso ocorre devido às impedâncias parasitas oriundas do complexo cabeamento e dos conectores, e também devido aos diversos pontos de conexão elétrica do potencial negativo ao chassi metálico do veículo.

O autorrádio é o único componente do sistema de sonorização que é alimentado diretamente pelo sistema elétrico do veículo. Como será abordado adiante nesse trabalho (Seção 4.2), o consumo do autorrádio pode ser dividido em duas parcelas: a primeira é composta pelo consumo quiescente dos amplificadores, dos circuitos digitais, dos componentes de iluminação do painel e, quando presentes, do sistema de leitura de discos óticos. A segunda parcela é a potência entregue aos alto-falantes, que varia de acordo com a potência sonora desejada no habitáculo. Para altas potências sonoras essa parcela pode se tornar até dez vezes maior que a parcela referente ao consumo quiescente.

### 3.2.1 Qualidade da energia elétrica no automóvel

A tensão no barramento elétrico de um automóvel não é constante como no caso de uma

fonte ideal. Ao contrário, ela apresenta variações ao longo do tempo que são resultantes dos fenômenos de regulação de carga e regulação de linha de cada um dos componentes conectados ao barramento, além de distúrbios introduzidos por indução eletromagnética ou acoplamento capacitivo.

A regulação de carga (*reg*) é definida como a queda relativa na tensão de alimentação em decorrência de um aumento na corrente consumida pela carga, como mostrado na Equação 3.1:

$$reg = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_a - V_b}{I_b - I_a}, \quad (3.1)$$

onde  $V_a$  e  $I_a$  são a tensão e a corrente médias antes do aumento da corrente na carga e  $V_b$  e  $I_b$  são a tensão e a corrente médias depois do aumento da carga. A regulação de carga pode ser vista como uma resistência em série com a fonte de tensão de alimentação. Num automóvel, esse fenômeno ocorre devido principalmente à desfavorável relação entre o comprimento dos cabos de alimentação e o nível da tensão nominal do barramento.

A regulação de linha surge quando o conversor de energia, que no caso automotivo é o alternador, experimenta uma queda na potência disponível à sua entrada e não consegue evitar uma queda proporcional em sua saída. Tal efeito é minimizado com o emprego de um circuito eletrônico de regulação da tensão de saída do alternador.

### 3.2.2 Caracterização experimental da alimentação do sistema de áudio automotivo

Para ilustrar o comportamento dinâmico do sistema elétrico e o impacto na tensão de alimentação do autorrádio, foi realizado um ensaio de caracterização do SEP-A cujo esquema de instrumentação é mostrado na Figura A.1 do Apêndice A. Além dos sinais de áudio, são amostrados os sinais referentes à alimentação, pois o objetivo é identificar e caracterizar os

distúrbios presentes nesta linha. A leitura do sinal de tensão é feita em dois pontos: no conector do autorrádio e nos terminais da bateria, a fim de proporcionar uma comparação do conteúdo espectral.

A Figura 3.2 mostra as séries temporais medidas dos sinais de tensão e corrente de alimentação ( $V_{cc}$  e  $I_{cc}$ ) e também o sinal de áudio na saída do amplificador de potência ( $V_{out}$ ). O sinal senoidal de excitação opera durante dez ciclos com amplitude máxima (o que corresponde a  $THD = 10\%$ ) para depois voltar à amplitude inicial (*burst signal*). Na Figura 3.2a a frequência do sinal é igual a 1 kHz e na Figura 3.2b a frequência é igual a 100 Hz. Ambas as figuras mostram o afundamento e as oscilações (*ripple*) na tensão de alimentação  $V_{cc}$  devido ao aumento na corrente consumida pelo autorrádio. Este fenômeno ilustra a regulação de carga, que é mais pronunciada para sinais de entrada de baixa frequência (100 Hz na Figura 3.2b).

Também é interessante observar a atuação dos capacitores tanque existentes no autorrádio junto aos pinos de alimentação do amplificador. Na Figura 3.2a o primeiro pulso de alta corrente é fornecido por esses capacitores, o que pode ser confirmado pela forma de onda da corrente  $I_{cc}$ .

As formas de onda da Figura 3.3 ilustram a regulação de linha. Especialmente no caso do sinal de entrada de baixa frequência (100 Hz), é possível perceber que o valor médio da tensão de alimentação é menor para uma velocidade angular do motor do veículo igual a 800 rpm quando comparado ao sinal medido com uma velocidade de 3000 rpm.

Os valores da regulação em todos os casos são calculados a partir dos valores médios nos respectivos intervalos das séries temporais medidas:

$$reg_{1kHz, 800rpm} = \frac{14,017V - 13,453V}{6,843A - 0,9997A} = 96,5m\Omega$$

$$reg_{1kHz,3000rpm} = \frac{13,995V - 13,439V}{6,803A - 1,010A} = 95,9m\Omega$$
$$reg_{100Hz,800rpm} = \frac{14,015V - 13,378V}{6,696A - 0,9909A} = 111,5m\Omega$$
$$reg_{100Hz,3000rpm} = \frac{14,046V - 13,440V}{6,717A - 0,991A} = 105,8m\Omega,$$

onde é possível perceber que a regulação é menor quando a frequência do sinal de áudio é maior (1 kHz) e quando a velocidade angular do motor também é maior (3000 rpm).

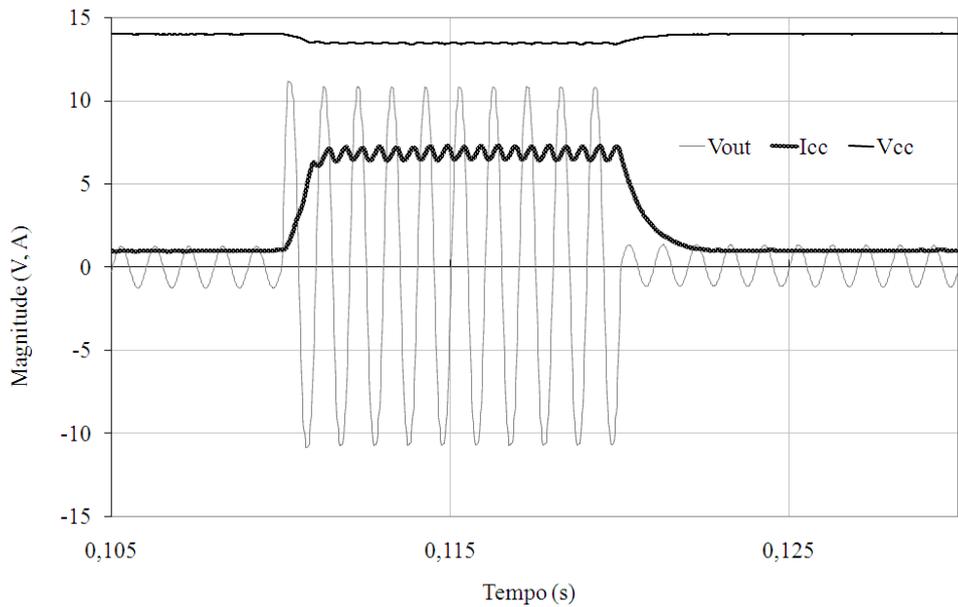
A regulação de carga de uma fonte de alimentação pode comprometer o desempenho de um amplificador de potência que opera sem realimentação negativa (malha aberta). Com o afundamento da tensão de alimentação, os transistores entram em estado de saturação antes do previsto, o que pode levar ao ceifamento da forma de onda amplificada (*clipping*).

### 3.2.3 Interferências eletromagnéticas

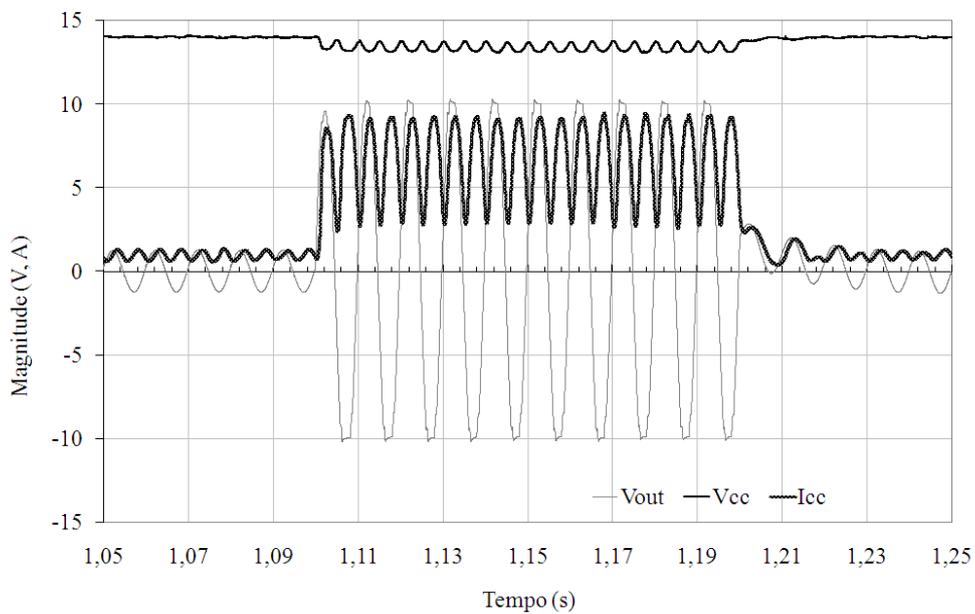
Também é possível identificar nas formas de onda da Figura 3.3 a interferência eletromagnética (*electromagnetic interference* – EMI) produzida pelas centelhas de ignição do motor de combustão interna acopladas na tensão de alimentação. Outros componentes do veículo também produzem interferências que podem atingir a tensão de alimentação do autorrádio, principalmente os motores de corrente contínua.

Na Figura 3.4 é mostrada a série temporal da tensão de alimentação (subtraída a componente contínua) sofrendo uma interferência oriunda do ventilador de climatização do habitáculo. É possível identificar que os pulsos de corrente decorrentes da comutação na máquina induzem tensão nas linhas do sistema elétrico. No ponto medido (conector do autorrádio) a amplitude desses pulsos ultrapassa 200 mV. Além disso, é possível identificar também a indutância

característica dos enrolamentos da máquina e do cabeamento, que respondem aos sinais impulsivos e produzem uma oscilação amortecida.



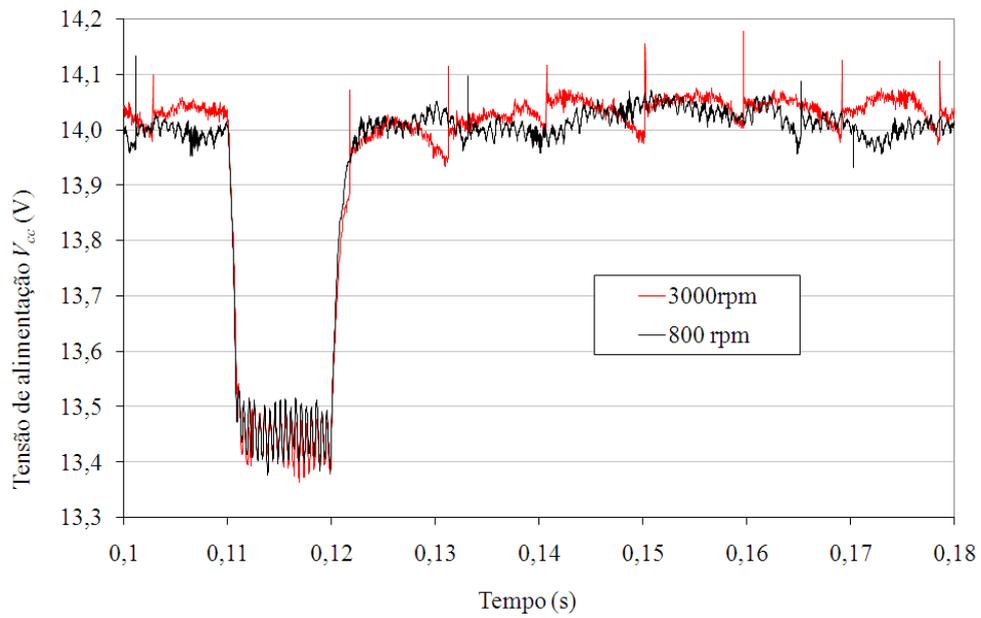
a)



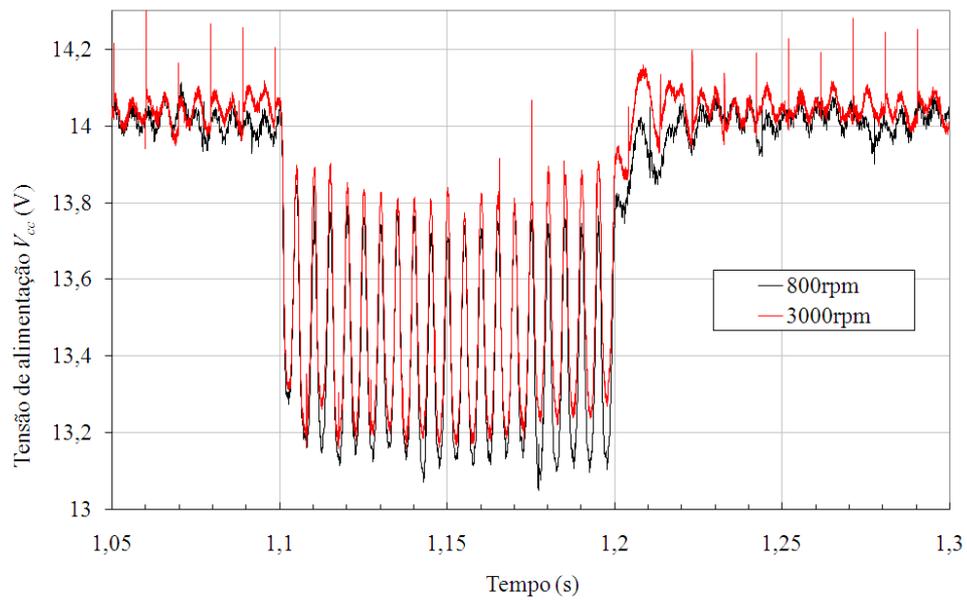
b)

Figura 3.2: Formas de onda da alimentação ( $V_{cc}$  e  $I_{cc}$ ) e da tensão de saída ( $V_{out}$ ) com sinal tipo *burst*.: a) 1

kHz, b) 100 Hz.



a)



b)

Figura 3.3: Formas de onda da tensão de alimentação  $V_{cc}$  em duas velocidades angulares do motor de combustão interna e sinal de áudio de: a) 1 kHz; b) 100 Hz.

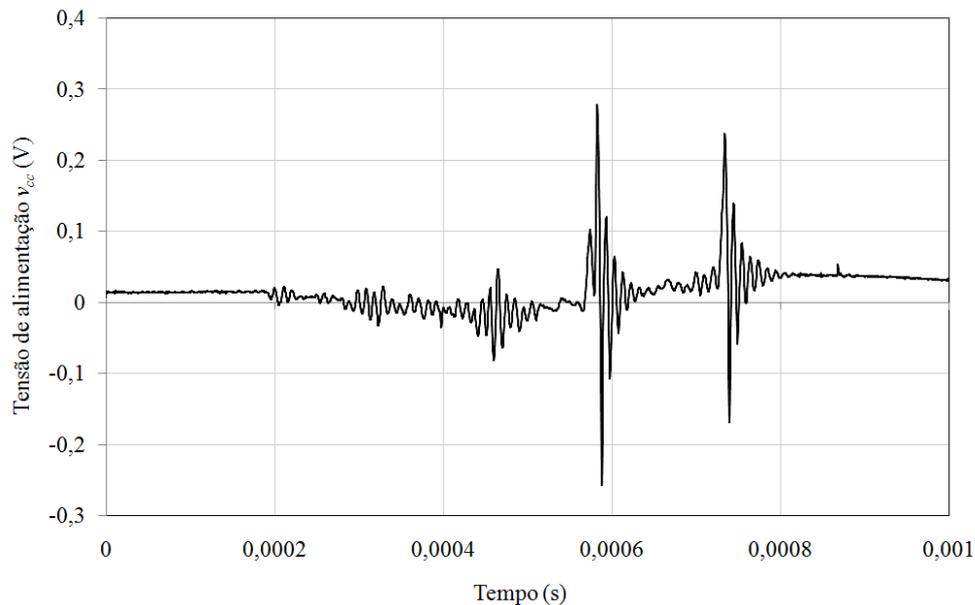


Figura 3.4: Série temporal da tensão de alimentação no conector do autorrádio (subtraída a componente contínua) com interferência gerada pelo ventilador de climatização do habitáculo.

A Figura 3.5 mostra o módulo do espectro de frequências medido simultaneamente no conector do autorrádio e também nos terminais da bateria do veículo referente ao sinal da Figura 3.4. A energia dentro da banda de frequências mostrada (1 MHz) é bem maior no conector do autorrádio, o que é esperado devido à influência do complexo cabeamento de alimentação.

Além dos motores de corrente contínua, qualquer carga do SEP-A que consuma correntes com altas taxas de variação, ou mesmo chaveadas, pode injetar distúrbios transitórios no barramento de alimentação.

A fim de minimizar esse tipo de interferência é utilizada filtragem passa-baixas na entrada de alimentação do autorrádio. Esses filtros normalmente são circuitos LC ou somente capacitores em paralelo. Além disso, a alimentação de circuitos mais sensíveis como os microprocessadores e memórias é precedida por circuitos reguladores de tensão, como já foi mostrado na Figura 2.4.

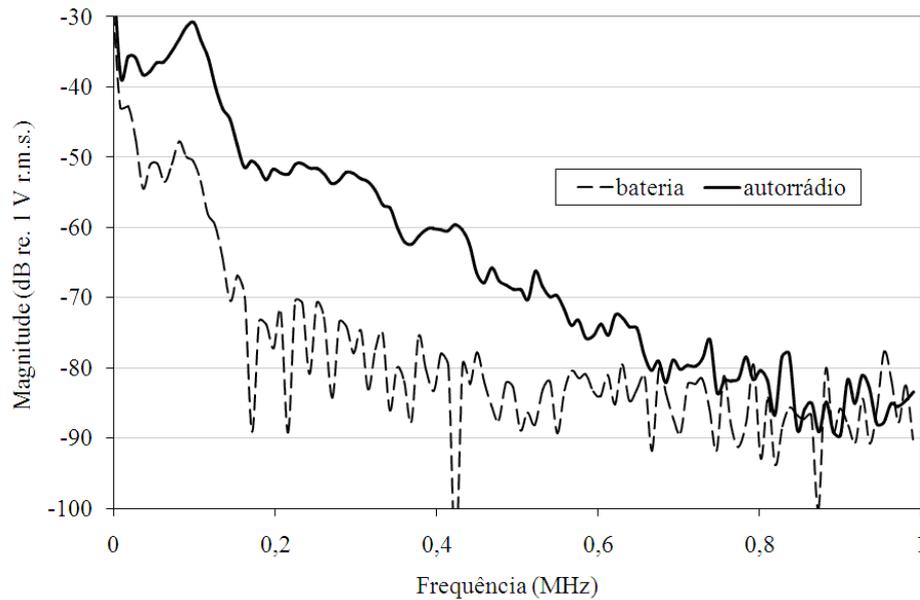


Figura 3.5: Espectro de frequências do sinal da Figura 3.4 medido no conector do autorrádio e nos terminais da bateria do veículo.

### 3.3 Considerações sobre a acústica do habitáculo

Do ponto de vista acústico, o habitáculo (ou célula de sobrevivência) apresenta sérias limitações à reprodução sonora em alta fidelidade, devido tanto às características e à intensidade dos ruídos de fundo, quanto à geometria e ao tratamento acústico [22, 23].

Uma figura de mérito com relação à acústica do habitáculo a ser considerada é a uniformidade espectral, ou resposta em frequência, que é determinada a partir da resposta ao impulso do sistema de sonorização medida com um microfone na posição da cabeça do ouvinte. Essa resposta reflete o desempenho do alto-falante acoplado ao seu radiador (muitas vezes a porta), associado à acústica do habitáculo e à posição do ouvinte ou do microfone. Idealmente, a resposta em frequência de um sistema de áudio deve ser plana dentro da faixa de frequências de interesse. Isso seria um forte indicativo da linearidade e da transparência do sistema ao

reproduzir um programa sonoro (sistema ortofônico). Em alguns casos, a resposta ao impulso pode ser manipulada através de filtragem a fim de atender a demandas específicas como, por exemplo, equalização espacial [15].

No entanto, um automóvel normalmente não é concebido com o objetivo de apresentar excelente resposta eletroacústica. Além da geometria desfavorável, paredes quase paralelas com vidros, e excesso de revestimento absorvedor, ainda contribui negativamente o posicionamento dos alto-falantes com relação aos usuários. O que se espera da resposta de um sistema de áudio automotivo de baixo custo é, então:

- a) presença de picos e vales na resposta em baixas frequências em decorrência de ondas estacionárias;
- b) redução de energia em altas frequências (deficiência de agudos);
- c) alta variação da resposta ao impulso em função da posição do ouvinte;
- d) resposta em frequência irregular devido ao mau posicionamento dos alto-falantes.

Outro problema encontrado em sistemas de baixo custo e que merece atenção é a vibração do radiador acústico ao qual o alto-falante está acoplado, ou a vibração de outro componente presente no habitáculo, em decorrência de ressonância em alguma frequência do sinal de áudio reproduzido. Na maior parte das vezes, essa ressonância vem acompanhada de frequências harmônicas e o resultado para o ouvinte é a percepção de que o som foi distorcido.

### 3.3.1 Caracterização experimental da resposta em frequência eletroacústica

A fim de ilustrar os aspectos discutidos, foram realizadas medições num veículo de teste da categoria *minivan* a fim de caracterizar o comportamento eletroacústico do sistema em determinados pontos do campo acústico dentro do habitáculo. A instrumentação utilizada é

descrita na Figura A.2 do Apêndice A.

O sinal de excitação senoidal com duração de um segundo teve sua frequência variada em 256 valores logaritmicamente entre 20 Hz e 20000 Hz. A amplitude do sinal elétrico de excitação aplicado ao alto-falante foi ajustada para que o NPS fosse igual a 94 dB (ref. 20  $\mu$ Pa) em 1000 Hz e mantida fixa nesse valor para todas as outras frequências. O NPS do ruído de fundo dentro do veículo na câmara fonoisolada medido foi menor que 40 dB (ref. 20  $\mu$ Pa). O veículo foi mantido com portas, janelas e entradas de ar fechadas.

O microfone de medição foi preso ao banco do motorista e posicionado num plano paralelo ao piso da câmara, alinhado longitudinalmente com o veículo e apontando para o pára-brisa. A cápsula do microfone foi locada numa altura correspondente aos ouvidos de um motorista de altura mediana. O banco do motorista foi mantido na posição mais afastada do pára-brisa.

O sinal elétrico referente à pressão sonora foi digitalizado com uma taxa da amostragem igual a 50000 amostras por segundo e resolução de 24 bits por amostra. O nível de pressão sonora mostrado é o valor eficaz de toda a série temporal.

Na Figura 3.6 é apresentado o NPS em função da frequência relativa aos dois alto-falantes dianteiros (direito e esquerdo) do veículo de testes. Embora os alto-falantes sejam do mesmo modelo (tipo *full range*), as curvas apresentam diferenças entre si, revelando que os sinais percorrem caminhos acústicos diferentes.

Alguns fenômenos detectados na medição da Figura 3.6 não são passíveis de serem corrigidos com equalização. Um deles é o caso das ondas estacionárias que se formam no habitáculo em decorrência das superfícies reflexivas paralelas. O comprimento de uma onda estacionária depende da distância entre essas superfícies reflexivas. Na figura em questão elas se destacam nas frequências aproximadas de 55 Hz e 110 Hz.

Um aspecto interessante é o fato de a pressão sonora resultante da contribuição combinada dos dois alto-falantes (linha mais grossa) na frequência de, aproximadamente, 180 Hz apresentar comportamento típico de interferência destrutiva.

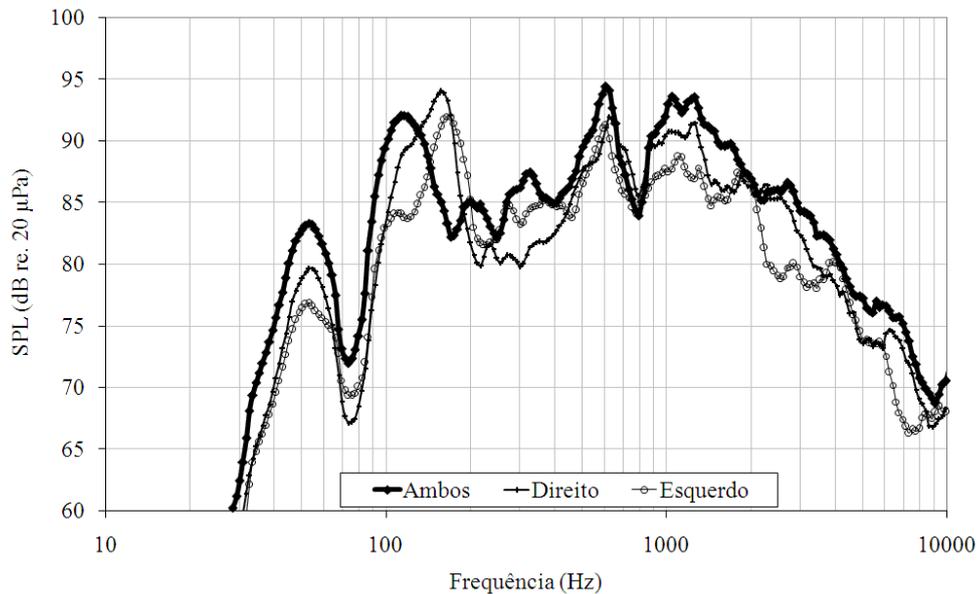


Figura 3.6: NPS em função da frequência medida em veículo tipo *minivan*.

Nas frequências acima de 1 kHz é percebido um decaimento de aproximadamente 20 dB por década no NPS, o que é um fenômeno relacionado à diretividade do transdutor e seu posicionamento em relação ao microfone, e também à absorção da energia sonora em frequências altas pelo estofamento das poltronas do veículo. Nesse caso também a equalização não é a melhor solução, pois resultaria num reforço acentuado nas altas frequências, podendo levar o sistema à saturação.

Uma solução para melhorar a cobertura acústica é a instalação de vários alto-falantes pelo interior do veículo, para que cada alto-falante cubra uma determinada região no espaço do habitáculo. Além disso, cada transdutor pode ser especificado para responder dentro de uma determinada região do espectro de frequências de áudio, o que permite otimizar o tamanho e a

potência nominal do alto-falante. Embora possam apresentar desempenho superior às arquiteturas convencionais, tal solução apresenta, na maioria das vezes, alto custo e baixa eficiência.

A Figura 3.7 apresenta os NPSs medidos na posição da cabeça do passageiro sentado do lado direito do banco traseiro. Uma interferência destrutiva possivelmente é a causa do comportamento em 60 Hz, onde a resposta dos dois alto-falantes combinada é quase 10 dB menor que a resposta individual de qualquer um deles. Ainda é possível observar os modos acústicos em frequências baixas (em 100 e 160 Hz). Além disso, as curvas revelam que os alto-falantes frontais têm pouca contribuição na posição medida para frequências maiores que 100 Hz, pois resultam num NPS até 15 dB menor entre 400 Hz e 1000 Hz. Em frequências altas (maiores que 5 kHz) é mantido o decaimento de 20 dB por década igual à figura anterior.

Os resultados das medições mostram que o sistema de sonorização automotiva não pode ser considerado ortofônico, dado o padrão bastante irregular das curvas de NPS em função da frequência. Além disso, essas curvas mostram que é interessante investigar a resposta em várias posições do espaço, ou melhor, naquelas onde é maior a probabilidade de se encontrar a cabeça do usuário durante situações normais de utilização do veículo.

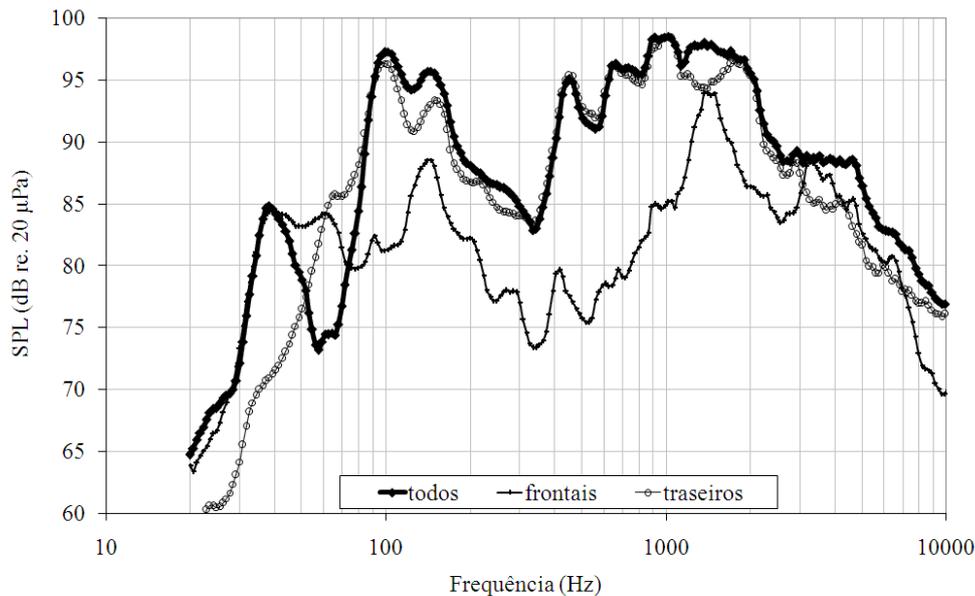


Figura 3.7: NPS em função da frequência medida no banco traseiro do veículo *minivan* em decorrência do uso dos alto-falantes frontais e/ou traseiros.

Da Figura 3.8 à Figura 3.10 são mostradas curvas de NPS e também de THD, ambas em função da frequência, medidas em outro veículo de testes, da categoria *hatchback*. Em todos esses casos, foram medidos 91 valores de frequência do sinal de excitação senoidal, entre 4 Hz e 4000 Hz.

A Figura 3.8 mostra os níveis de pressão sonora medidos apenas com o alto-falante dianteiro esquerdo funcionando. Nesse caso, cada curva representa uma posição diferente do microfone dentro da região do espaço supostamente ocupada pela cabeça do motorista. O microfone inicialmente é posicionado apontando para frente na direção do volante. Nas outras duas medições o microfone é rotacionado no plano horizontal para a esquerda e para a direita em ângulos retos, ou seja, apontando para cada uma das janelas laterais das portas dianteiras do veículo. O objetivo desta técnica é, além de detectar a ocorrência de ondas estacionárias e de interferências, utilizar a média da pressão sonora entre as três medições como um parâmetro

representativo do campo acústico na região da cabeça do motorista.

Uma informação importante revelada nessa figura é a semelhança entre os NPSs nas três orientações do microfone em frequências inferiores a 500 Hz. Acima disso as curvas divergem entre si, o que é um indício da complexidade do campo acústico formado nesta região do habitáculo.

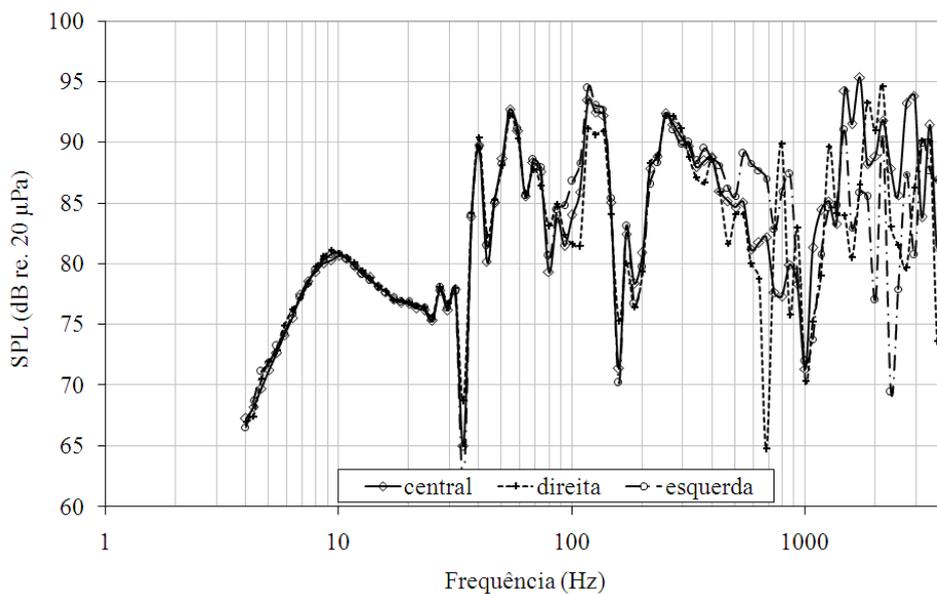


Figura 3.8: NPS em função da frequência em três posições vizinhas no habitáculo (veículo *hatchback*).

Na Figura 3.9 é mostrada a média dos NPSs nas três posições do microfone, além das respostas médias referentes aos segundo e terceiro harmônicos. Um ponto a ser notado é a presença de energia em frequências subsônicas, ou abaixo de 20 Hz. A resposta em frequência medida no outro veículo e mostrada na Figura 3.6 não apresenta tal comportamento. Também é interessante notar a marcante presença dos harmônicos na região abaixo de 200 Hz, o que certamente implicará altos níveis de distorção, como será discutido adiante.

Nesse ponto é importante traçar uma comparação entre as curvas de NPS no habitáculo e a

resposta do amplificador de potência apresentado na Figura 2.8c. A variação na resposta entre 20 Hz e 4 kHz do amplificador é menor que 1 dB, enquanto a variação no NPS nessa mesma faixa de frequências é maior que 30 dB.

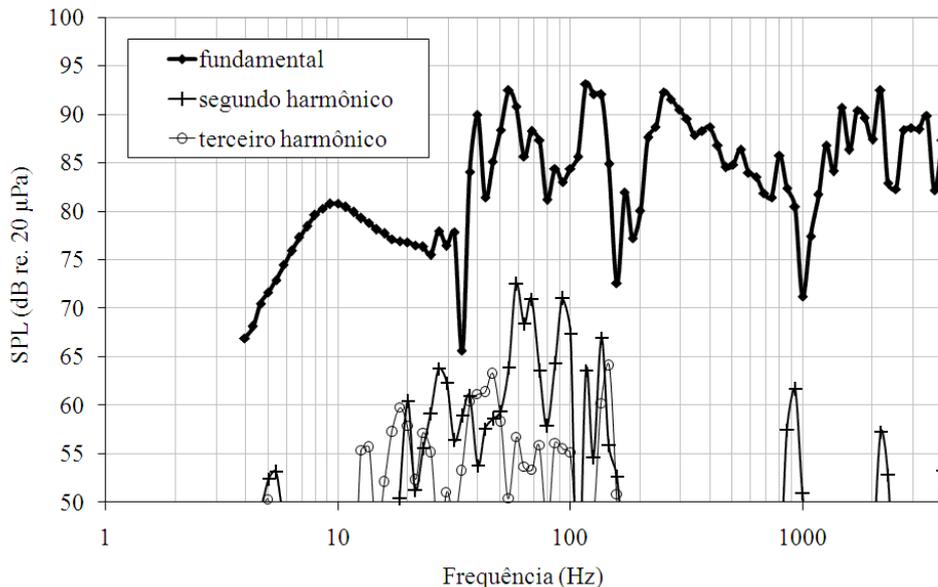


Figura 3.9: Média da pressão sonora da Figura 3.8 e NPS dos segundo e terceiro harmônicos (veículo *hatchback*).

Outra figura de mérito a ser comparada é a THD em função da frequência. A Figura 3.10 apresenta as curvas de THD do alto-falante instalado na porta dianteira esquerda, onde é possível notar que, entre 20 e 200 Hz, a THD é sempre maior que 1 %, sendo que o valor máximo é de quase 100 %. O gráfico da Figura 2.8b mostra que, no caso do amplificador de potência, a THD não ultrapassa 0,03 % na mesma faixa de frequências.

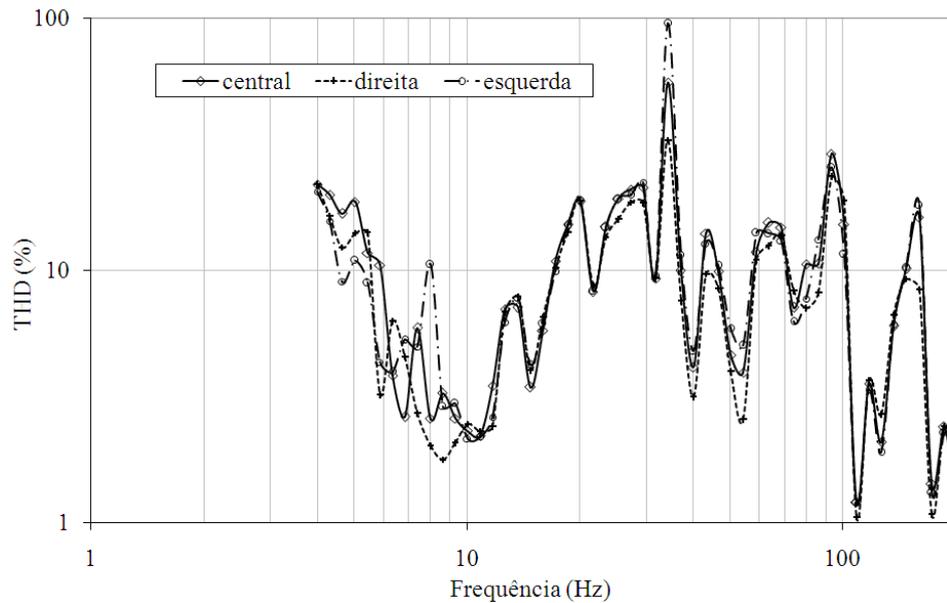


Figura 3.10: THD em função da frequência do alto-falante da porta dianteira esquerda.

### 3.3.2 Considerações sobre a instalação dos alto-falantes

Em muitas aplicações automotivas os alto-falantes são instalados nas portas por ser um sítio estratégico com algumas vantagens relacionadas principalmente à durabilidade do alto-falante. Contudo, sob o ponto de vista da qualidade de áudio tal instalação nem sempre é vantajosa. As portas são cavidades formadas por chapas de metal com determinado volume interno. Do lado de dentro do veículo as portas recebem um painel de plástico, ou de estofamento, onde figuram também interruptores, maçanetas e bolsas (Figura 3.11). O alto-falante normalmente é fixado diretamente à chapa metálica ou ao forro da porta e ainda recebe uma grade protetora.

Embora a porta apresente certo volume interno, nem sempre todo o volume está disponível para o ar movido pelo alto-falante, pois a cavidade pode ser subdividida internamente a fim de impedir a penetração de água em determinados espaços. Além disso, o painel metálico costuma apresentar diversas aberturas para atender a outras funcionalidades (vidros, fechaduras, cabeamento), o que o distancia de se comportar como um gabinete selado.

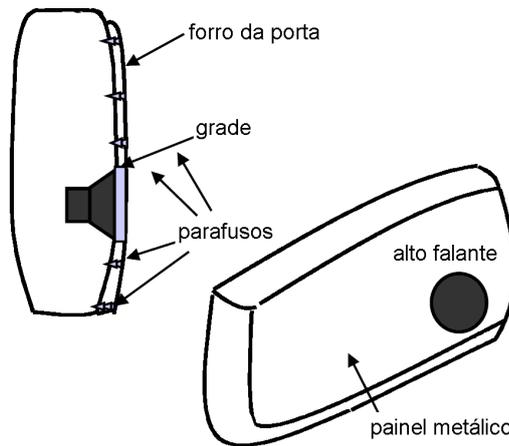


Figura 3.11: Ilustração de uma porta automotiva típica (adaptado de [11]).

O forro da porta poderia servir como painel acústico (*baffle*), porém não costuma ser rígido o suficiente. Em alguns casos o forro da porta atua de maneira contrária a um painel rígido e passa a vibrar junto com o alto-falante e, conseqüentemente, a consumir parte da energia que deveria ser convertida em intensidade sonora [11]. Os elementos de fixação do forro à porta (parafusos ou rebites) também podem vibrar e gerar ruído se não estiverem presos adequadamente.

Na Figura 3.12 é apresentada a comparação entre as curvas de NPS obtidas com e sem a grade do alto-falante (veículo *hatchback*). A primeira diferença é o NPS entre 20 Hz e 30 Hz, que caiu aproximadamente 6 dB com a retirada da grade. Isso indica a existência de uma melhoria no acoplamento vibroacústico causado pela grade nessa faixa de frequências. Outra diferença notável (aproximadamente 14 dB) ocorre na frequência de 34 Hz, onde a pressão sonora sem a grade tem amplitude maior. Contudo, na frequência de 68 Hz, ou seja, no primeiro múltiplo inteiro da frequência anterior, as posições se invertem e a pressão sonora é maior com a grade instalada (aproximadamente 8 dB de diferença). Essa região do espectro pode ser de menor importância durante a reprodução sonora pelas baixas frequências envolvidas, porém é interessante pontuar o fenômeno observado experimentalmente.

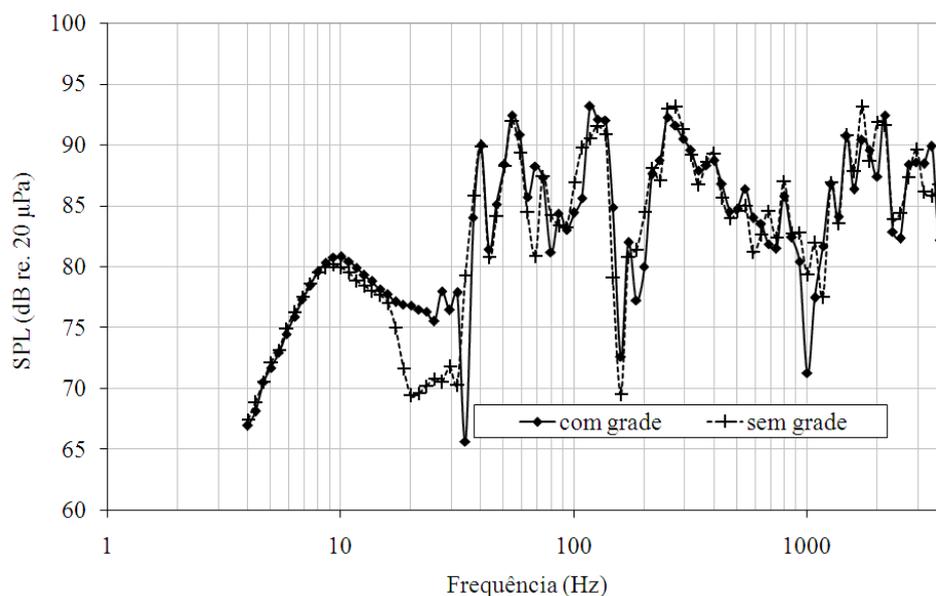


Figura 3.12: NPS em função da frequência na posição do motorista com e sem a grade protetora do altofalante (veículo *hatchback*).

## 3.4 Conclusões do capítulo

Um automóvel apresenta características elétricas e acústicas que tendem a limitar o desempenho de um sistema de sonorização embarcado. O ambiente veicular pode ser considerado como bastante severo para componentes eletroeletrônicos, em comparação a aplicações residenciais ou a dispositivos portáteis. Assim, muitas vezes o projeto de um componente do sistema de áudio é orientado à durabilidade e confiabilidade, mesmo que seja em detrimento da qualidade de áudio.

### 3.4.1 Conclusões sobre o sistema elétrico de potência automotivo

A arquitetura do SEP-A favorece o surgimento de vários problemas relacionados à qualidade da energia elétrica, como por exemplo: a) queda de tensão (regulação de carga) devido à impedância dos cabos; b) *ripple* e regulação de linha em função da velocidade angular do motor

de combustão interna; c) distúrbios de natureza pulsante ou intermitentes oriundos de motores CC.

Isso leva cada componente eletrônico embarcado a possuir um esquema de filtragem e estabilização da tensão de alimentação, assim como foi discutido no Capítulo 2 para o caso do autorrádio.

### 3.4.2 Conclusões sobre a acústica do habitáculo e a instalação dos alto-falantes

As curvas de NPS em função da frequência refletem o desempenho do alto-falante associado ao caminho acústico do som até o ouvinte. Como foi mostrado a partir das medições em veículos de teste, elas são muito mais irregulares do que a resposta de amplificadores de potência típicos.

A função de transferência acústica reflete as características do campo acústico no habitáculo, que se mostrou complexo graças à condição de campo próximo imposta pelas dimensões físicas e à irregularidade das superfícies refletoras dentro do habitáculo.

Além disso, uma variação na posição do usuário implica sensíveis variações no NPS. Nas frequências menores que 200 Hz destacam-se as ondas estacionárias, especialmente no veículo da categoria *minivan*.

Em frequências acima de 500 Hz o problema são as interferências entre os sinais das quatro fontes sonoras (alto-falantes) que chegam à cabeça do motorista. Nesse caso, variações de poucos centímetros na posição da cabeça produzem variações significativas nos níveis de pressão sonora.

A grade de proteção do alto-falante revelou ter influência na radiação sonora, o que se reflete na resposta eletroacústica. De fato, parece haver potencial para otimização das portas de um veículo a fim de melhorar o acoplamento vibroacústico e a radiação. No Capítulo 5 será

apresentado um método para medir a eficiência da transdução eletroacústica e o caso da grade de proteção do alto-falante será novamente discutido.

Ainda sobre a instalação nas portas, foi visto que o NPS apresenta um decaimento constante a partir de 1 kHz (-20 dB/década), na região das frequências denominadas médias e altas. Esse comportamento é resultado do direcionamento inadequado dos alto-falantes com relação à posição da cabeça do motorista, aliado à presença de superfícies com capacidade de absorver a energia sonora nessas frequências dentro do habitáculo, como estofamentos e carpetes.

A instalação dos alto-falantes nas portas do veículo é uma prática tradicional e estabelecida devido às exigências da própria estrutura do automóvel e parece improvável que outras soluções possam ser adotadas em sistemas de áudio de baixo custo. Contudo, o desempenho sonoro do sistema de áudio é fortemente impactado por esse cenário desfavorável.

# Capítulo 4

## Estudo sobre o consumo e a eficiência do autorrádio

### 4.1 Introdução

A energia consumida pelo sistema de sonorização veicular é dividida em duas partes: uma consumida pelos circuitos eletrônicos internos do autorrádio que implementam as várias funcionalidades discutidas na Seção 2.2. A outra parte é entregue aos alto-falantes para a conversão eletroacústica e produção de som no habitáculo.

O objetivo deste capítulo é identificar e classificar os principais elementos consumidores de energia do autorrádio. Além disso, também são investigadas as perdas de potência e os circuitos que as originam.

## 4.2 Consumo do autorrádio

Parte da energia consumida pelo autorrádio é enviada aos alto-falantes para ser convertida em intensidade sonora. Desconsiderando essa parcela, a energia é dividida entre os seguintes circuitos eletrônicos que compõem o autorrádio:

- a) Interface de usuário: o painel frontal do autorrádio, com seus *displays*, interruptores, potenciômetros ou *rotary encoders*, é a interface pela qual o usuário opera e configura o componente. A energia aqui é consumida principalmente pelos *displays* e pelas lâmpadas utilizadas para iluminar o painel.
- b) Mecanismo de leitura de discos óticos: a leitura dos dados contidos num disco ótico (CD ou DVD) demanda potência que é aplicada nos circuitos de acionamento e controle dos servomotores que movimentam o disco e o canhão de raios LASER. Em alguns casos, os circuitos de decodificação do sinal de áudio digital lido nos discos também são incorporados ao mecanismo de leitura, o que ocasiona consumo extra.
- c) Circuitos de tratamento de sinais e microprocessadores: nesse grupo estão incluídos os circuitos de processamento do sinal de áudio, circuitos de demodulação de sinais de rádio frequência e os microprocessadores com seus periféricos (memórias, portas lógicas) que tratam da interface do usuário e da comunicação com as mídias de armazenamento de sinais de áudio, além de outros comandos.
- d) Amplificador de potência: os circuitos de amplificação em potência dos sinais de áudio (classe AB) consomem certa quantidade de corrente quiescente a fim de manter os transistores polarizados.

A Figura 4.1 apresenta os resultados de um trabalho de caracterização do consumo de um lote

de seis autorrádios de diferentes marcas e categorias [24]. É possível perceber que cada amostra apresenta um padrão de consumo, exceto pelo amplificador de potência, cujo consumo é praticamente igual entre as amostras. A amostra A apresentou menor consumo quiescente porque só possui dois canais de amplificação, diferentemente de todas as outras, que possuem quatro canais.

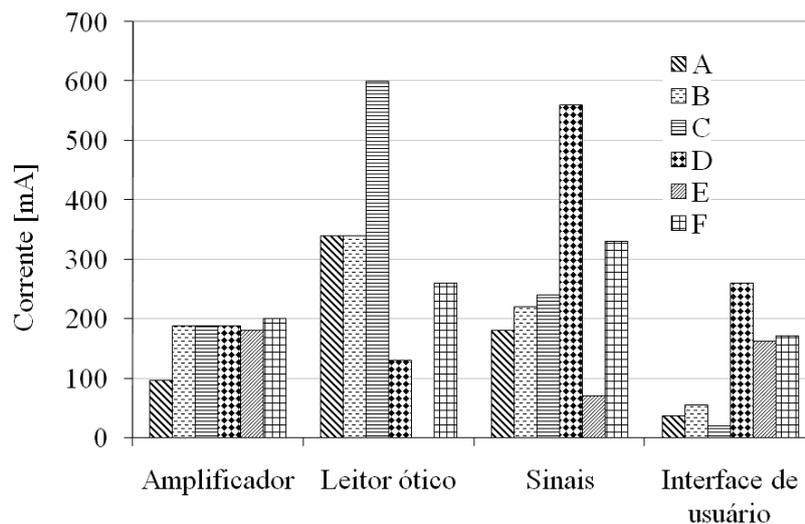


Figura 4.1: Consumo energético de seis autorrádios (A a F) dividido por funcionalidades [24].

A Figura 4.2 mostra o consumo total de cada uma das amostras. Há um destaque na amostra E pelo baixo consumo relativo que se explica pela ausência do leitor de discos óticos. Outra característica interessante desta amostra é a alocação do microprocessador de sinais (DSP) no painel frontal, junto com os circuitos de interface.

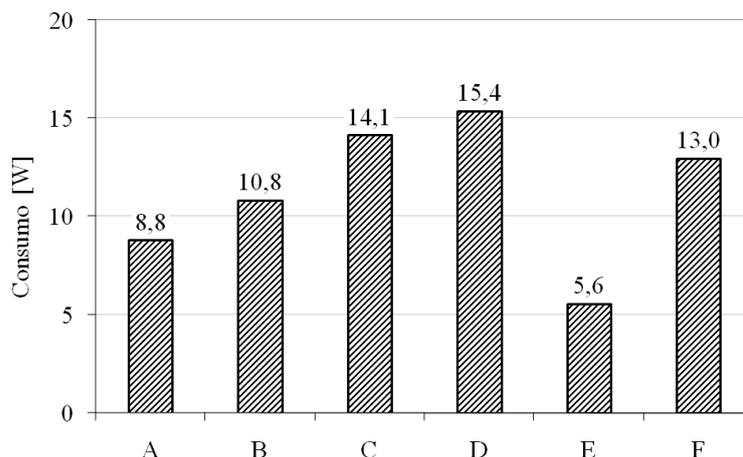


Figura 4.2: Consumo de cada amostra de autorrádio [24].

A Figura 4.3 apresenta a média de potência de todo o lote de amostras em função das quatro funcionalidades. Juntos, os circuitos de sinais e o leitor ótico respondem por quase dois terços da potência consumida pelo autorrádio. É possível perceber também que, em média, o amplificador de potência consome mais de um quinto de toda corrente enviada ao autorrádio (21%). Esse consumo no amplificador é necessário para a polarização dos transistores nos amplificadores classe AB, que é a topologia presente em todas as amostras. Os amplificadores classe D se apresentam como uma alternativa de menor consumo, pois os transistores operam apenas nos estados de corte e saturação [3].

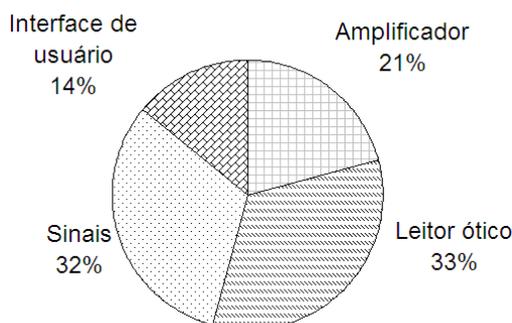


Figura 4.3: Consumo médio de cada funcionalidade [24].

Os circuitos de sinais são aqueles responsáveis pelo processamento dos sinais de áudio, o que inclui: a) o tratamento e a demodulação dos sinais de radio frequência recebidos pela antena; b) a decodificação de sinais de áudio comprimidos; c) a equalização (filtragem) dos sinais de áudio; d) o processamento de sinais de fala a fim de reduzir os ecos em chamadas telefônicas. Todas essas funcionalidades podem ser executadas em *software* se os sinais de áudio estiverem representados na forma digital. Isso significa que algum dos outros sistemas microprocessados embarcados (por exemplo: quadro de instrumentos ou computador de bordo) pode incorporar essas funcionalidades e o consumo energético relativo a elas desaparece. A interface de usuário também pode ser compartilhada com painéis de comando de outros sistemas eletrônicos como, por exemplo, o ar condicionado, o navegador ou o quadro de instrumentos.

### 4.3 Estudo das perdas no amplificador de potência

Muitos amplificadores para aplicação automotiva pertencem à classe B (ou à classe AB, de maior fidelidade [25]). A Figura 4.4 mostra um circuito simplificado no qual cada transistor fornece corrente para o alto-falante durante metade do ciclo, operando na sua região ativa. Como os transistores estão submetidos à tensão da fonte de alimentação durante o tempo todo, ocorrem significativas perdas por condução.

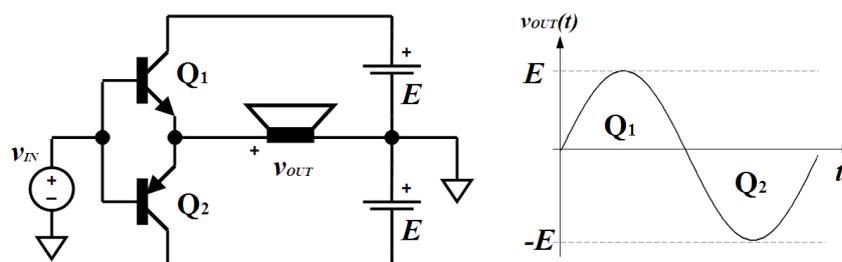


Figura 4.4: Circuito simplificado do amplificador classe B ideal.

Um amplificador para autorrádios típico incorpora quatro amplificadores classe AB em ponte completa, além de circuitos para comando e proteção do amplificador. Na Figura 4.5 é mostrado um diagrama de blocos e na Figura 4.6 são mostrados encapsulamentos típicos em que os amplificadores são comercializados. É importante observar que os encapsulamentos são concebidos para que sejam instalados num radiador de calor, que normalmente é uma das paredes internas do autorrádio.

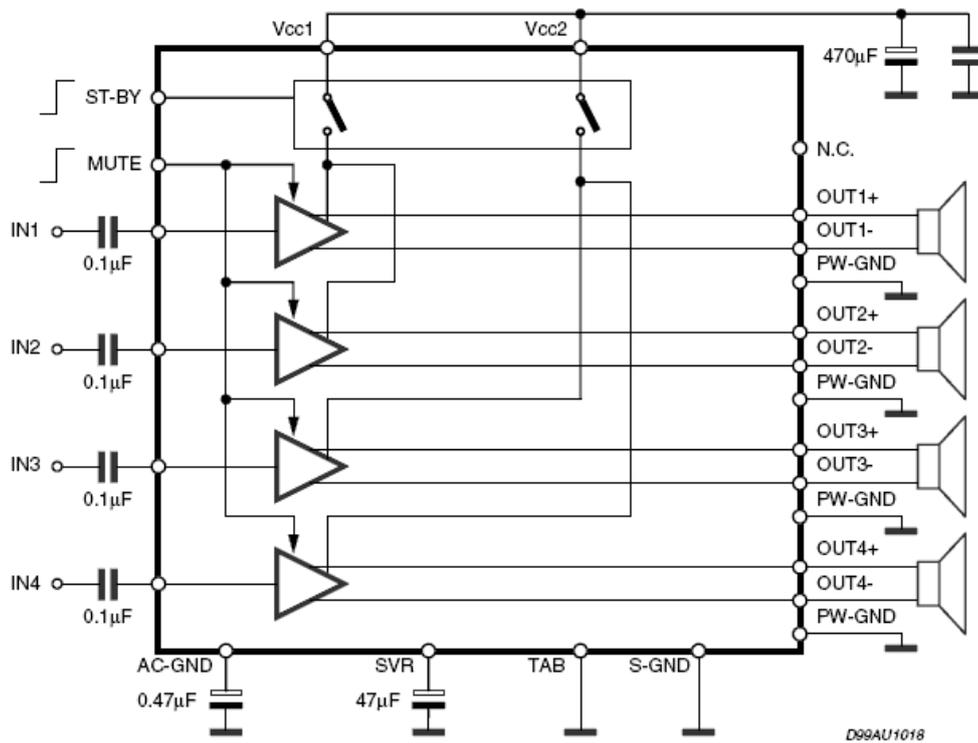


Figura 4.5: Diagrama de blocos de um amplificador para autorrádio. [26]

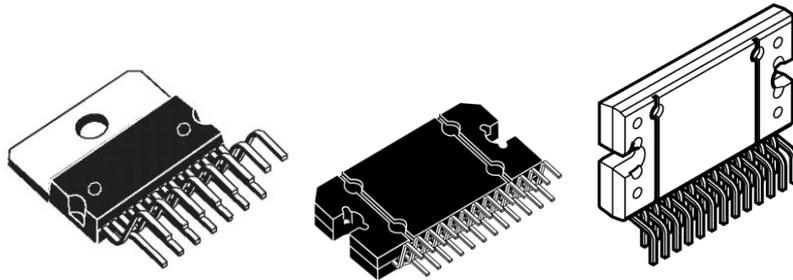


Figura 4.6: Encapsulamentos típicos de amplificadores de potência para autorrádios.

Um amplificador de potência classe B (ou AB) possui normalmente três etapas de ganho [27]. A primeira etapa é um amplificador de transcondutância que consome pouca energia. A segunda é um amplificador de transimpedância que provê a maior parte do ganho de tensão e também consome relativamente pouco. A última etapa, ou etapa de potência, é um amplificador de ganho de tensão unitário responsável por entregar a potência de que o alto-falante necessita. É na terceira etapa onde ocorre a maior dissipação de potência do amplificador classe B, pois os transistores operam na região linear com correntes elevadas e estão submetidos à tensão da alimentação.

Na Figura 4.7 são apresentadas as formas de onda simuladas da tensão e potência de saída ( $v$  e  $p$ ), juntamente com a tensão entre coletor e emissor ( $v_{ce}$ ) e a potência dissipada ( $p_{ce}$ ) em um dos transistores de um amplificador classe B ideal. Nessa simulação o amplificador alimenta uma carga resistiva unitária com tensão de pico ( $v_{pico}$ ) de saída também unitária, assim como a tensão de alimentação. A forma de onda da corrente de saída, então, coincide exatamente com a forma de onda da tensão de saída.

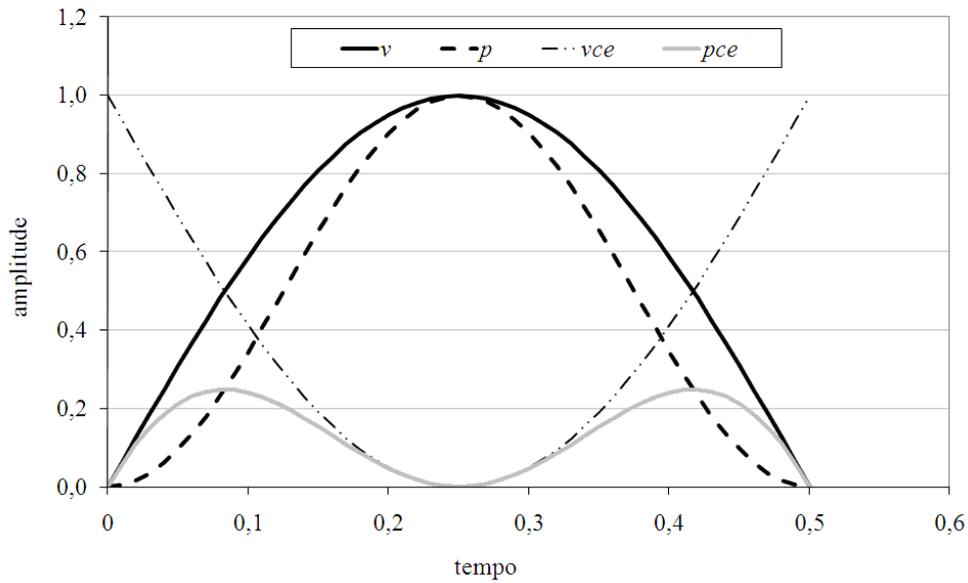


Figura 4.7: Grandezas elétricas à saída de um amplificador classe B ideal ( $v_{pico} = 1 \text{ V}$ ).

É possível observar que a potência instantânea dissipada no transistor ( $p_{ce}$ ) apresenta dois máximos dentro do intervalo considerado. Além disso, a  $p_{ce}$  tende a valores mínimos quando a tensão de saída se aproxima do valor máximo, pois a tensão no transistor ( $v_{ce}$ ) nesse momento também tende a zero.

A potência média dissipada no transistor durante o semicírculo mostrado equivale a 27 % da potência entregue à carga, ou seja, atinge-se uma eficiência igual a 79 % nesse que é o melhor caso. Se a tensão de saída for menor ( $v_{pico} = 0,3 \text{ V}$ ), a eficiência cai para apenas 24 %, como mostrado na Figura 4.8.

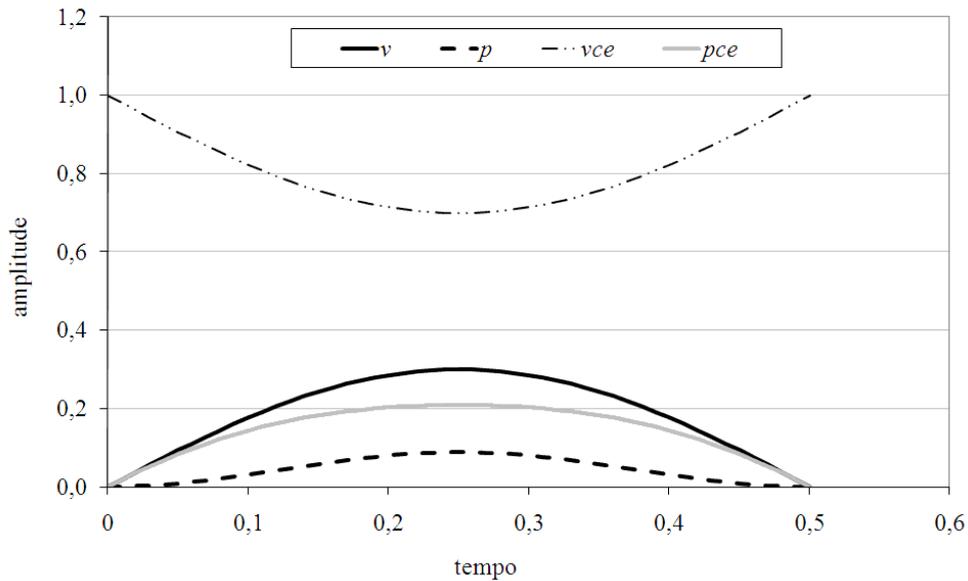


Figura 4.8: Grandezas elétricas que caracterizam a saída de um amplificador classe B ideal ( $v_{pico} = 0,3$  V).

A Figura 4.9 apresenta os gráficos retirados das folhas de dados [18] com informação sobre a dissipação de potência  $P_d$  de um amplificador comercial em função da potência de saída por canal  $P_o$ . A dissipação é definida na própria figura como sendo a diferença entre a potência de entrada ( $V_{cc} \cdot I_{cc}$ ) e a potência de saída dos quatro amplificadores  $4P_o$ . Segundo o gráfico, se cada amplificador enviar 2 W ao seu respectivo alto-falante, a potência dissipada na forma de calor pelos quatro amplificadores juntos é de aproximadamente 30 W (com  $V_{cc} = 14,4$  V), ou seja, uma eficiência pouco maior que 21 %.

Uma dissipação de 30 W num automóvel é significativa, pois é potência suficiente para alimentar outros componentes eletro-eletrônicos como lâmpadas e centrais eletrônicas de controle. Além disso, torna mandatória a utilização de um radiador de calor a fim de manter a temperatura na junção dos transistores menor do que 150 °C. Segundo a folha de dados, para que o radiador seja evitado, a dissipação de potência deve ser menor do que 4 W.

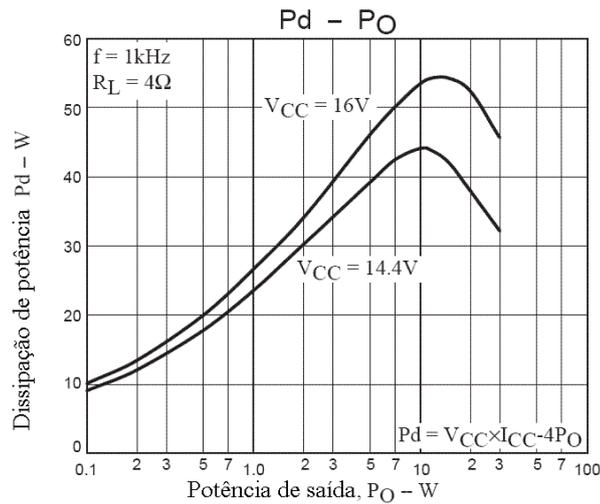


Figura 4.9: Dissipação de potência em função da potência de saída de um amplificador classe AB em ponte. [18]

## 4.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi apresentado um estudo sobre o consumo e as perdas de potência num autorrádio. Como o único elemento ativo do sistema de sonorização veicular, o autorrádio apresenta um consumo quiescente que variou entre 5 W e 15 W nas amostras caracterizadas. Essa potência é utilizada por elementos e circuitos eletrônicos que implementam as diversas funcionalidades de um autorrádio. Foi proposta uma classificação em quatro subsistemas consumidores: circuitos de sinais, interface homem-máquina, leitor ótico de discos e amplificador de potência. Este último responde por 21 % da potência quiescente, na média das amostras, consumo esse que se refere às correntes de polarização dos transistores de saída utilizados nos amplificadores classe B.

Além da potência quiescente, existe outra parte da energia consumida pelo autorrádio que é perdida em forma de calor. Essa parcela refere-se às perdas por condução de corrente elétrica nos transistores de saída dos amplificadores de potência e varia de acordo com o nível de potência

entregue aos alto-falantes.

As perdas por condução têm impacto direto na eficiência de um amplificador. Foi mostrado que a eficiência de um amplificador automotivo típico da classe B é de aproximadamente 21 % quando entrega 2 W a um alto-falante, o que é uma potência elétrica compatível com a potência sonora desejada em situações normais. Esse baixo valor de eficiência significa que o amplificador produz calor ao operar, o que leva à demanda por radiadores de calor e implica maior custo do autorrádio.

# Capítulo 5

## Estudo sobre a eficiência da transdução eletroacústica

### 5.1 Introdução

Nem toda a potência entregue a um alto-falante na forma elétrica é convertida em potência acústica. A eficiência do processo de transdução eletroacústica realizada por um alto-falante depende: a) das suas perdas características, e b) da carga acústica vista por ele, ou seja, da impedância de radiação (Seção 2.4.2).

Quanto menor for a eficiência da transdução, maior será o nível de potência com que o amplificador de potência terá que operar a fim de entregar a potência sonora desejada. Altas potências tendem a aumentar, principalmente: a) o consumo energético do amplificador e, conseqüentemente, do sistema de áudio, b) a dissipação de potência em forma de calor, c) o volume e a massa dos componentes, e d) os custos de produção. Por isso é importante entender os fenômenos que determinam a eficiência de transdução eletroacústica num sistema de

sonorização, assim como obter um método para medi-la ou estimá-la, e compará-la à eficiência dos outros componentes do sistema.

Dado um determinado alto-falante, é possível estimar as suas perdas de potência em baixas frequências, desde que os parâmetros do modelo dinâmico apresentado na Seção 2.4.2 sejam conhecidos. Estes parâmetros podem ser obtidos junto ao fabricante do alto-falante, ou determinados experimentalmente com poucos recursos.

Por outro lado, um modelo para representar a carga acústica acionada pelo alto-falante pode tornar-se muito complexo. Um exemplo é o modelo analítico da impedância de radiação ( $\mathbf{Z}_r$ ) vista por um pistão circular instalado num painel rígido de dimensões infinitas em campo livre de reflexões [4], mostrado na Equação 5.1:

$$\mathbf{Z}_r = \rho_0 c S [R_1(2ka) + jX_1(2ka)] \quad (5.1)$$

onde  $S = \pi a^2$  é a área da superfície do pistão,  $\rho_0 c$  é a impedância acústica característica do ar e  $k$  é o número de onda. As funções  $R_1$  e  $X_1$  são dadas pelas Equações 5.2 e 5.3:

$$R_1(x) = 1 - \frac{2J_1(x)}{x} = \frac{x^2}{2 \cdot 4} - \frac{x^4}{2 \cdot 4^2 \cdot 6} + \frac{x^6}{2 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8} - \dots, \quad (5.2)$$

$$X_1(x) = \frac{2\mathbf{H}_1(x)}{x} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{x}{3} - \frac{x^3}{3^2 \cdot 5} + \frac{x^5}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} - \dots \right), \quad (5.3)$$

onde  $J_1$  é a função de Bessel e  $\mathbf{H}_1$  é função de Struve, ambas de primeira ordem. É importante notar que essa é a impedância de radiação vista apenas pelo lado da frente do pistão.

As impedâncias de radiação de outros arranjos eletroacústicos também podem ser deduzidas analiticamente. Porém, em situações práticas de sonorização as deduções de tais expressões

tornam-se inviáveis, seja por causa da complexidade do radiador, seja pelas características do ambiente acústico.

A impedância de radiação vista por um alto-falante radiando dentro do habitáculo e fixado a uma das portas de um automóvel é um desses casos de complexa abordagem. Como foi discutido na Seção 3.3, um veículo normalmente não é concebido para favorecer o sistema de sonorização, e é de se esperar que a impedância de radiação não seja aquela que maximize a eficiência da transdução eletroacústica.

O objetivo deste capítulo é investigar a impedância de radiação e, conseqüentemente, a eficiência de transdução dos alto-falantes num sistema automotivo. Para tanto, é proposto um método experimental que parte da medição de características elétricas e mecânicas de um alto-falante de forma isolada, a fim de obter os parâmetros do modelo e determinar as suas perdas características. Finalmente, um ensaio com o mesmo alto-falante, dessa vez instalado no veículo, permite estimar a impedância de radiação acústica vista pelo transdutor e a sua eficiência eletroacústica.

Este método foi aplicado na análise dos sistemas de sonorização de dois modelos de automóveis de teste. Também foi investigado o comportamento eletroacústico dos sistemas de som com os forros de porta removidos, a fim de identificar a sua influência na impedância de radiação.

## 5.2 Obtenção da impedância de radiação e da eficiência

No circuito da Figura 5.1,  $Z_{EB}$  é a impedância vista do lado elétrico do alto-falante com o cone bloqueado e o circuito  $RLC$  representa o equivalente paralelo da impedância  $Z_{MOT}$ , de acordo com o modelo discutido na Seção 2.4. Os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  são relacionados a  $Z_{mo}$  (a

impedância vista do lado mecânico com os terminais elétricos em aberto) e a  $Z_r$  (impedância de radiação acústica) a partir das seguintes definições:

$$\begin{aligned} R_M &= \varphi_M^2 / R_m \\ L_M &= \varphi_M^2 / s \\ C_M &= m / \varphi_M^2, \end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned} R_R &= \varphi_r^2 / R_r \\ C_R &= (X_r / \omega) / \varphi_M^2. \end{aligned} \tag{5.5}$$

A resistência  $R$  representa, por sua vez, a associação em paralelo das resistências  $R_M$  e  $R_R$ , assim como  $C$  representa a associação em paralelo de  $C_M$  e  $C_R$ , de acordo com a Equação 5.6:

$$\begin{aligned} R &= \frac{\varphi_M^2}{R_m + R_r} = \frac{1}{1/R_M + 1/R_R} \\ L &= L_M \\ C &= C_M + C_R. \end{aligned} \tag{5.6}$$

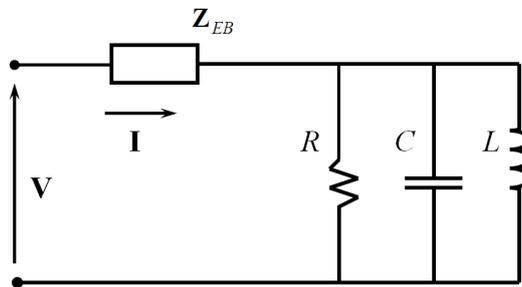


Figura 5.1: Um circuito equivalente alternativo para o alto-falante eletrodinâmico.

Esta forma de abordar o alto-falante sugere que, caso seja possível medir separadamente  $Z_{EB}$  e  $Z_{mo}$ , o equivalente da impedância de radiação pode ser determinado.

A impedância elétrica  $Z_{EB}$  pode ser obtida a partir do alto-falante desmagnetizado, o qual pode ser conseguido junto ao fabricante. Um ensaio com o cone bloqueado é uma alternativa, desde que a bobina seja mantida fixa na sua posição de repouso.

Uma vez que  $Z_{EB}$  é conhecida, a impedância mecânica  $Z_{mo}$  pode ser determinada a partir de um ensaio numa câmara de vácuo. Como a carga acústica é minimizada pelo vácuo, a impedância de radiação pode ser desconsiderada. Assim, o circuito  $RLC$  da Figura 5.1 representa apenas o equivalente das características mecânicas do alto-falante visto do lado elétrico, ou seja,  $R_M$ ,  $L_M$  e  $C_M$ .

Quando o alto-falante é instalado ao seu radiador e posicionado no ambiente acústico ao qual se destina, surge a impedância de radiação acústica  $Z_r$ , cujo equivalente é agregado ao circuito  $RLC$  paralelo, como mostrado na Equação 5.6. Como  $Z_{EB}$  e  $Z_{mo}$  já são conhecidos, o parâmetro  $R_R$  pode ser determinado e utilizado no cálculo da eficiência, que é o último passo deste método.

A eficiência da transdução eletroacústica  $\eta$  é definida como a razão entre a potência de saída  $P_{out}$  e a potência de entrada  $P_{in}$  no alto-falante.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_R}{P_E + P_M + P_R}. \quad (5.7)$$

A potência de saída é aquela dissipada em  $R_R$  e a potência de entrada é a soma das potências dissipadas em  $R_0$ ,  $R_M$  e  $R_R$ . As potências são expressas na Equação 5.8:

$$\begin{aligned}
 P_E &= R_0 I^2, \\
 P_M &= V_M^2 / R_M \text{ e} \\
 P_R &= V_M^2 / R_R,
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

sendo que  $V_M$  é definido como a tensão aplicada somente à impedância móvel ( $Z_{MOT}$ ):

Substituindo estas expressões na Equação 5.7:

$$\eta = \frac{V_M^2 / R_R}{R_0 I^2 + V_M^2 / R_M + V_M^2 / R_R} = \frac{1 / R_R}{R_0 \cdot (I^2 / V_M^2) + 1 / R_M + 1 / R_R}.
 \tag{5.9}$$

O termo  $I^2 / V_M^2$  pode ser substituído a partir da definição de  $V_M$ :

$$\begin{aligned}
 V_M &= V - Z_{EB} \cdot I \\
 \frac{V_M}{I} &= \frac{V}{I} - Z_{EB}.
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

Substituindo a Equação 2.6 na Equação 5.10:

$$\frac{I^2}{V_M^2} = \frac{1}{Z_{MOT}^2}.
 \tag{5.11}$$

A expressão para a eficiência da transdução eletroacústica é então:

$$\boxed{\eta = \frac{1 / R_R}{R_0 \cdot (1 / Z_{MOT}^2) + 1 / R_M + 1 / R_R}}.
 \tag{5.12}$$

A fim de ilustrar o modelamento discutido, foi realizada uma simulação numérica que utilizou os parâmetros apresentados na Tabela 2.1 referentes a um alto-falante comercial [21]. Na

Figura 5.2 são mostradas as curvas de módulo e fase em função da frequência, resultantes da simulação do circuito elétrico equivalente, desconsiderando a impedância de radiação acústica. A Figura 5.3 mostra o resultado da simulação da eficiência deste alto-falante instalado num painel rígido infinito, cuja impedância de radiação é dada pela Equação 5.1.

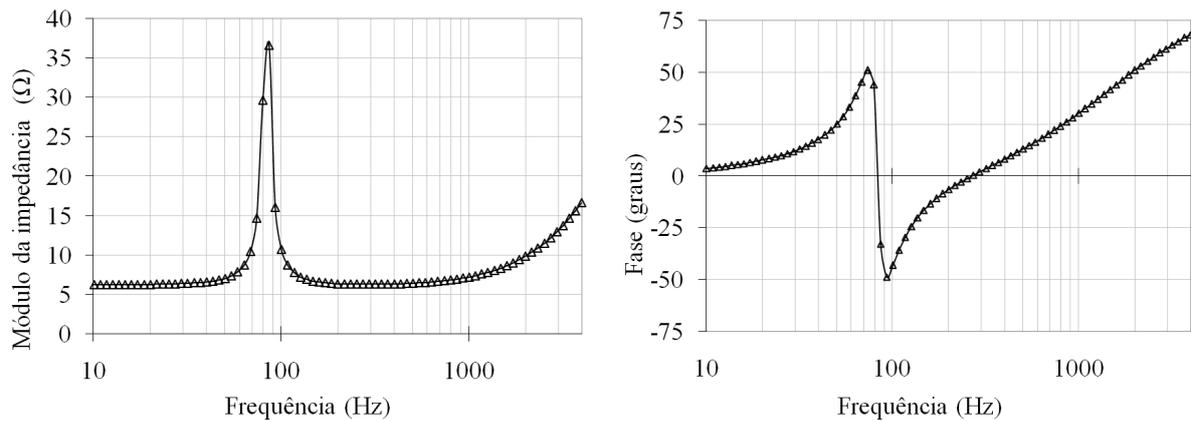


Figura 5.2: Módulo e fase da impedância  $Z_E$  do alto-falante simulado sem considerar a impedância de radiação.

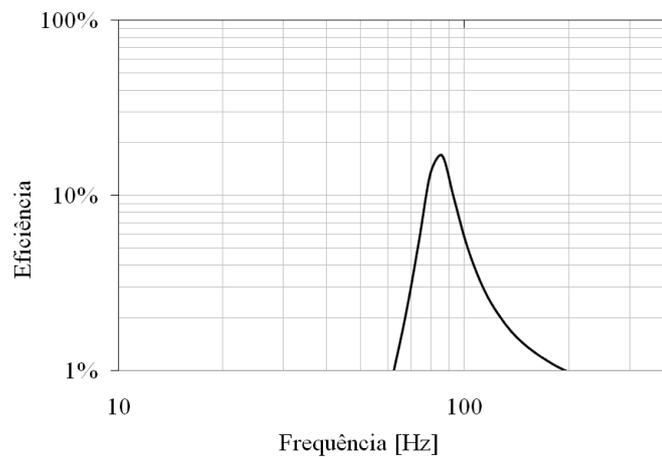


Figura 5.3: Simulação da eficiência de transdução com o alto-falante instalado no painel rígido infinito e em campo livre.

A eficiência da transdução apresenta um pico na frequência de ressonância mecânica do alto-

falante. Todavia, é importante notar que o valor da eficiência nesse pico de eficiência ainda é menor que 20 %, ou seja, bem menor que a eficiência dos amplificadores de potência classe AB em ponte discutidos no Capítulo 4. Nas frequências maiores que 200 Hz a eficiência é menor que 1 %.

### 5.3 Caracterização experimental da eficiência eletroacústica

A metodologia proposta na seção anterior foi aplicada para caracterizar a eficiência da transdução eletroacústica em dois automóveis de baixo custo, categoria *hatchback*, referidos como veículo A e veículo B. Em ambos os veículos o sistema de áudio é composto por quatro alto-falantes instalados nas portas, assim denominados: LF (*left-front*) – anterior esquerdo; RF (*right-front*) – anterior direito; LR (*left-rear*) – posterior esquerdo; RR (*right rear*) – posterior direito. O diâmetro dos alto-falantes posteriores é igual a 152,4 mm e o dos anteriores é igual a 101,6 mm no veículo A. Já no veículo B, o diâmetro é igual a 165 mm nos anteriores e 130 mm nos posteriores. A faixa de operação de todos os alto-falantes é situada entre 20 Hz e 20000 Hz.

Todas as medições de impedância complexa foram realizadas com o sistema de instrumentação virtual apresentado na Figura A.3 do Apêndice A. Os alto-falantes foram excitados com sinais senoidais de amplitude igual a 1 V (eficaz) e em 80 frequências logaritmicamente espaçadas entre 10 Hz e 4000 Hz. A duração do sinal de excitação é igual a um segundo, a taxa de amostragem é igual a 100000 amostras por segundo e a resolução de cada amostra é igual a 24 bits.

Além de investigar o comportamento da eficiência dos alto-falantes instalados nas portas dos respectivos veículos, também será abordada a eficiência com os painéis de porta removidos, a fim de caracterizar o seu impacto na eficiência da transdução.

### 5.3.1 Medição das Impedâncias Complexas

A Figura 5.4 mostra as impedâncias elétricas  $Z_{EB}$ , medidas com os alto-falantes desmagnetizados. Os quatro alto-falantes do veículo A apresentam valores de impedância bem próximos, pois, apesar da diferença entre os diâmetros dos cones, eles utilizam a mesma bobina em sua construção. Com relação aos alto-falantes do veículo B, é possível perceber que os posteriores utilizam bobinas diferentes dos anteriores.

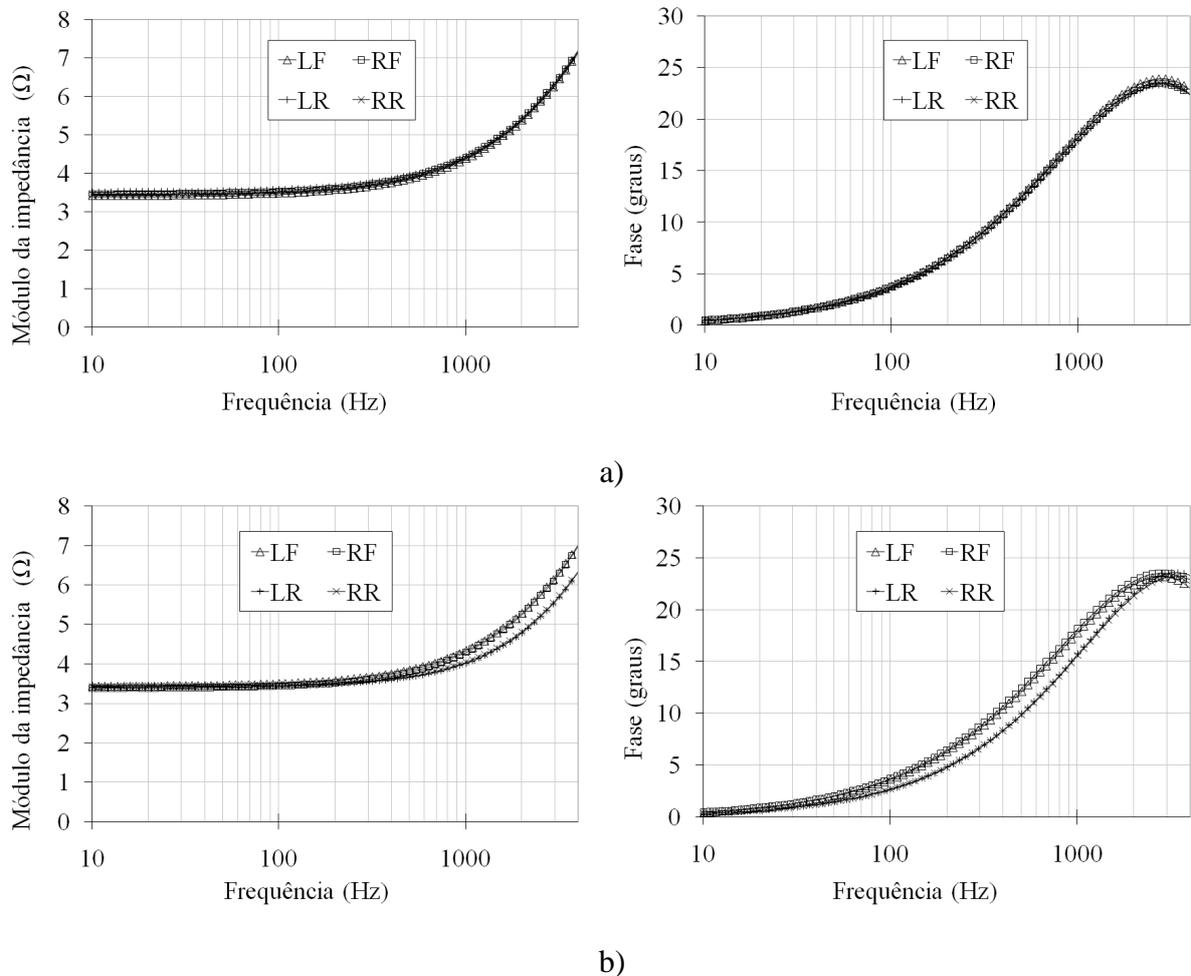


Figura 5.4: Impedância  $Z_{EB}$  medida com o alto-falante desmagnetizado: a) veículo A; b) veículo B.

A Figura 5.5 mostra as impedâncias  $Z_E$  medidas com os alto-falantes dentro de uma câmara de vácuo, após terem sido magnetizados e envelhecidos por duas horas com ruído rosa a um

quarto da potência nominal. No vácuo, a impedância de radiação acústica é minimizada e a impedância vista nos terminais do alto-falante corresponde à impedância de cone bloqueado ( $Z_{EB}$ ) em série com o equivalente da impedância mecânica do alto-falante ( $Z_{MOT}$ ).

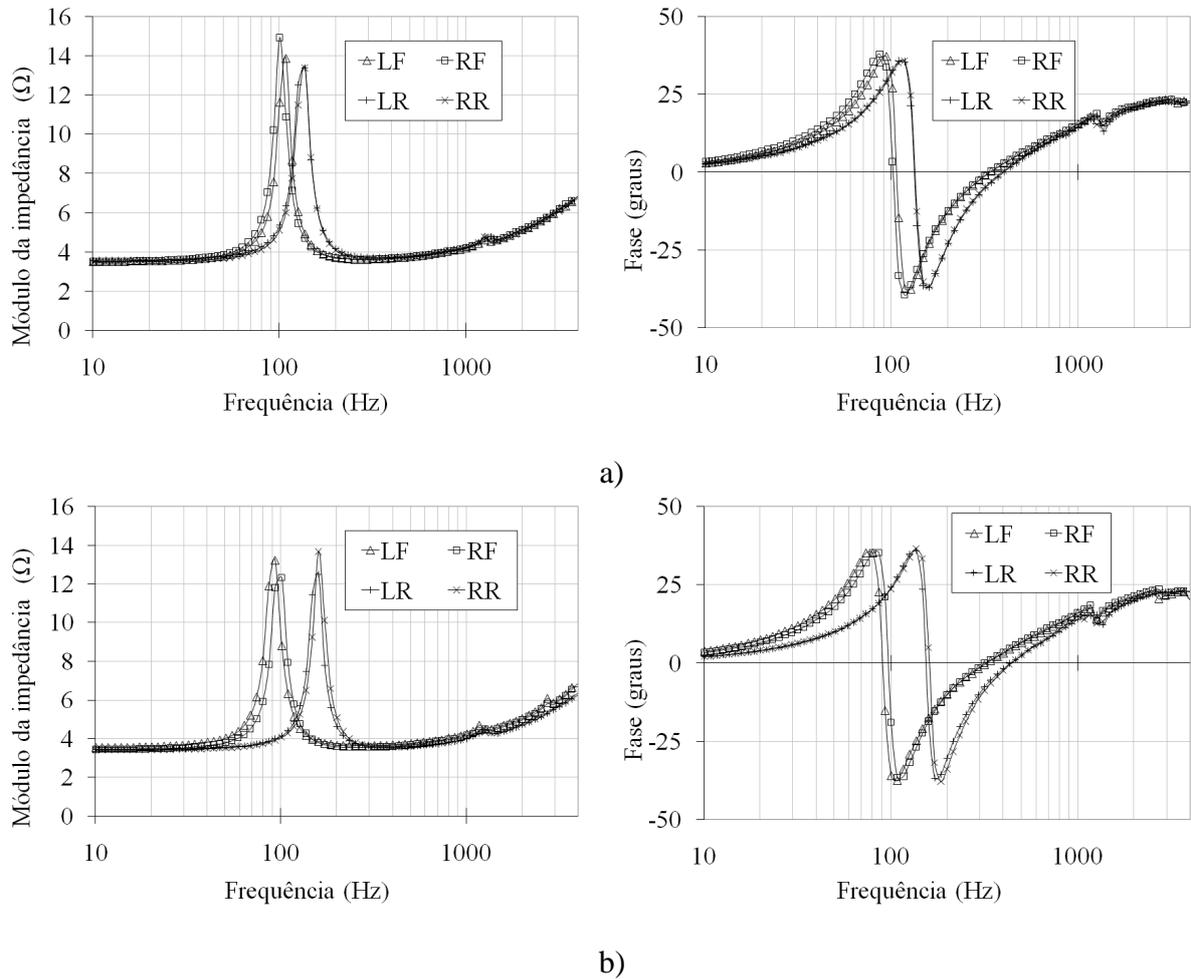


Figura 5.5: Impedância  $Z_E$  medida com o alto-falante no vácuo: a) veículo A; b) veículo B.

Nessa mesma figura é possível perceber a influência das impedâncias de cone bloqueado, que deslocam as curvas dos módulos de  $Z_E$  no sentido vertical. Além disso, também aparecem claramente os picos da ressonância inerente ao oscilador mecânico formado pela massa do cone e a mola da suspensão. A Figura 5.6 apresenta o aparato montado para realizar as medições com os alto-falantes no vácuo.

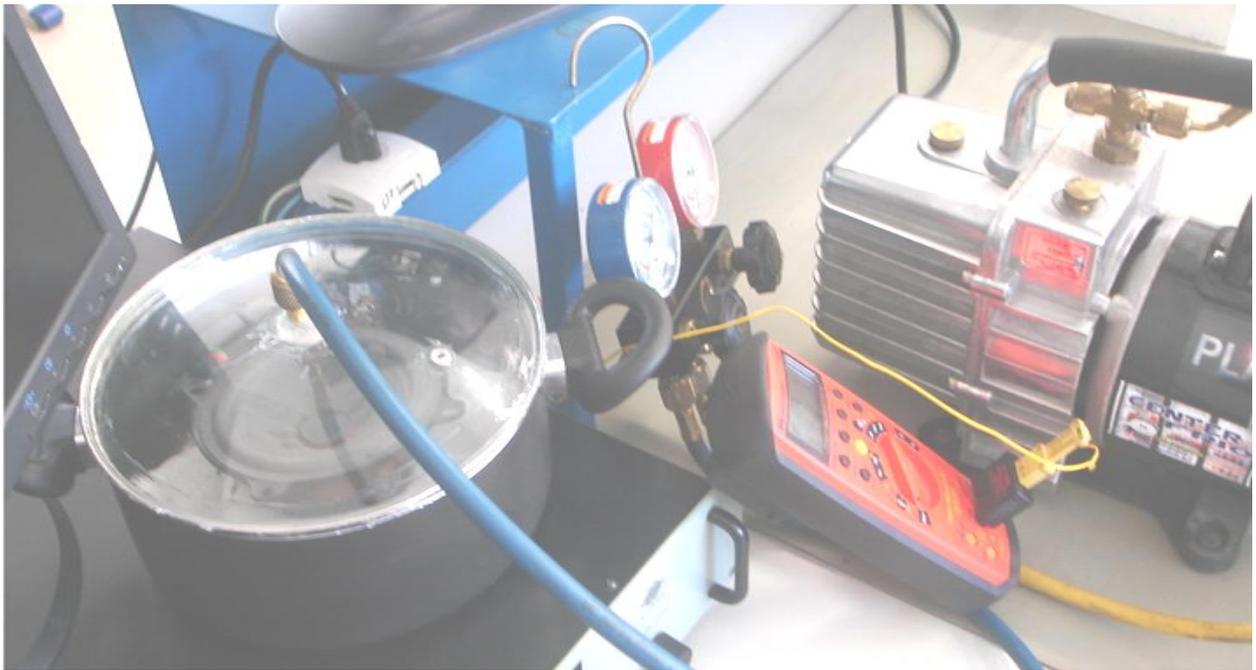


Figura 5.6: Fotografia do aparato para medição do alto-falante no vácuo.

Um fenômeno de origem vibracional pode ser notado em todas as curvas mostradas, na região de frequências entre 1000 e 2000 Hz. São excitados modos de vibração dos cones, que nessa faixa de frequências já não agem mais como membranas rígidas [19]. O resultado é um moderado aumento no módulo da impedância na frequência que excita o modo de vibração, como mostrado. Nos alto-falantes anteriores do veículo B este fenômeno se manifesta novamente na região de frequências próximas a 3000 Hz.

A diferença entre os valores de impedância em cada par de alto-falantes (LF e RF, LR e RR) é maior do que no caso anterior com os alto-falantes desmagnetizados, que representam apenas a impedância da bobina. Isso confirma que as propriedades magnéticas e mecânicas dos alto-falantes são mais sensíveis às variações no processo de fabricação do que as propriedades elétricas (bobina). Além disso, também pode ser considerada a hipótese de que as partes móveis dos alto-falantes sofrem envelhecimento a taxas diferentes, com impacto na impedância, como

mostrado.

Na Figura 5.7 aparecem as impedâncias  $Z_E$  medidas com os alto-falantes instalados nas portas dos veículos A e B. Em todos os casos é possível perceber a diminuição da frequência de ressonância. Esse fenômeno está relacionado à massa de ar enclausurada no habitáculo do veículo que se soma à massa do conjunto móvel do alto-falante. Outra diferença perceptível também relacionada à impedância de radiação é a diminuição do fator de qualidade nas curvas de módulo da impedância, indicado pelo alargamento dos picos de ressonância.

Embora a influência da impedância de radiação possa ser bem notada na Figura 5.7, as curvas mostradas não fornecem muitas informações úteis sobre a natureza de  $Z_r$ , nem tampouco uma correlação com as características vibroacústicas da instalação dos alto-falantes nas portas dos veículos. Ainda assim, é possível calcular  $R_R$  e determinar a eficiência da transdução para cada caso, como mostrado na Figura 5.8 para o veículo A, e na Figura 5.11 para o veículo B.

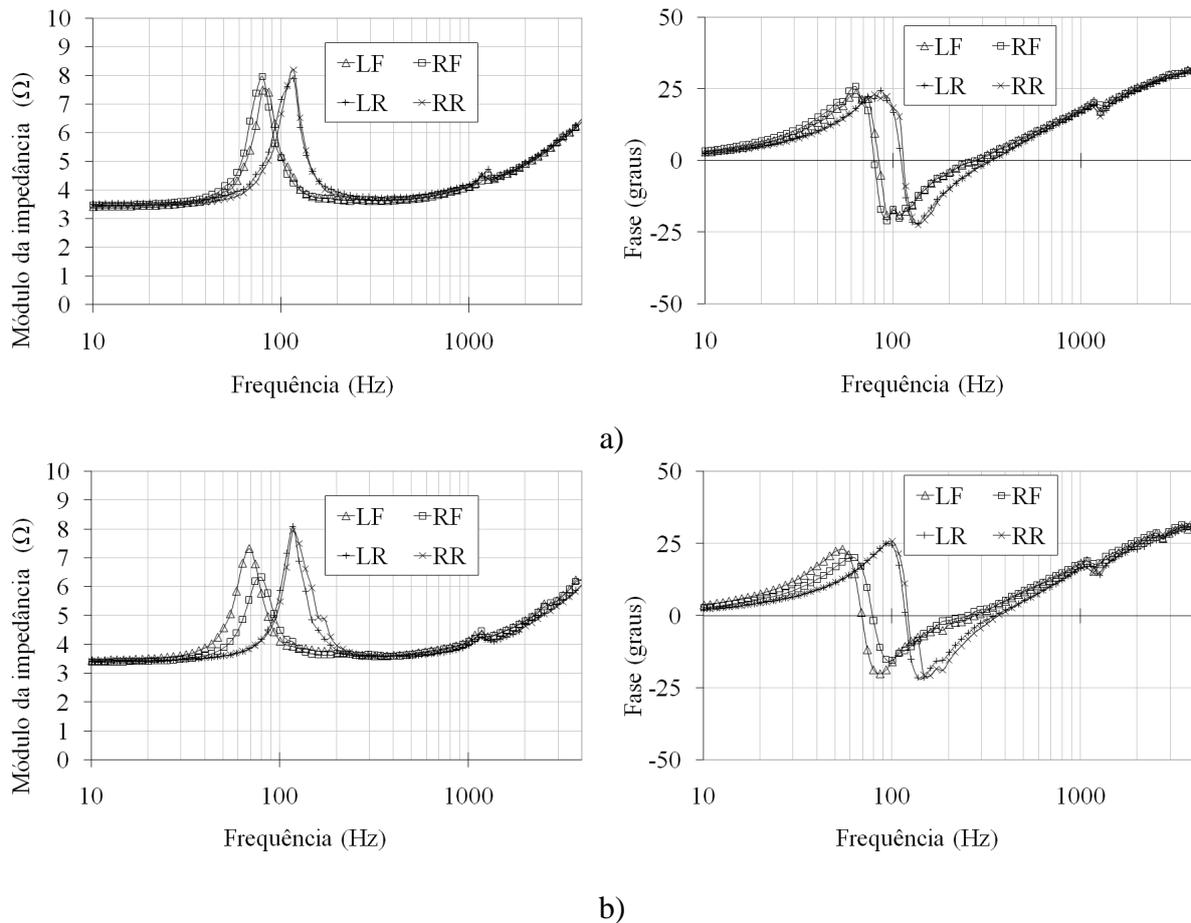
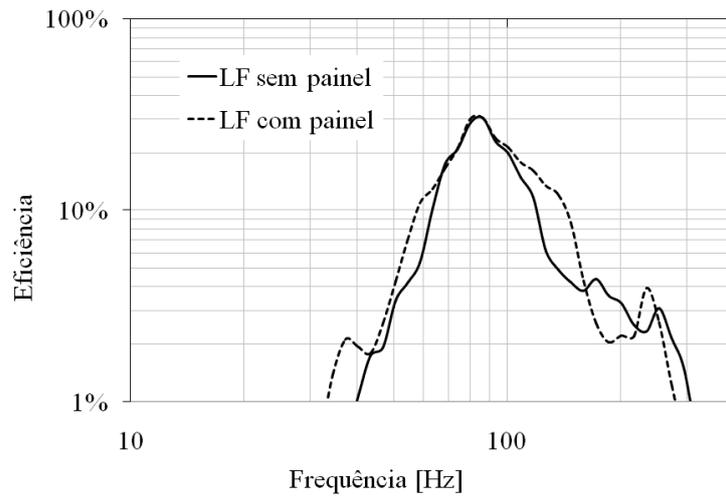


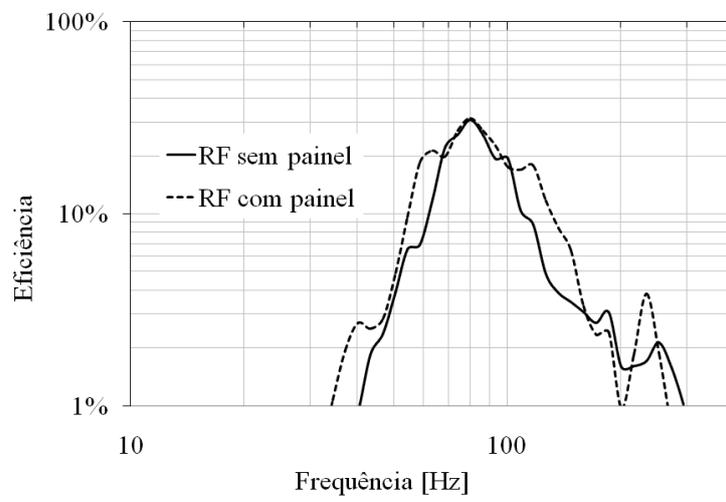
Figura 5.7: Impedância total  $Z_E$  medida com os alto-falantes instalados: a) veículo A; b) veículo B.

As curvas de eficiência dos alto-falantes instalados nos veículos são similares à curva da Figura 5.3, que apresenta o resultado da simulação da eficiência de um pistão circular instalado num painel rígido infinito em campo livre. A principal semelhança é o formato em pico, centrado na frequência de ressonância mecânica do transdutor.

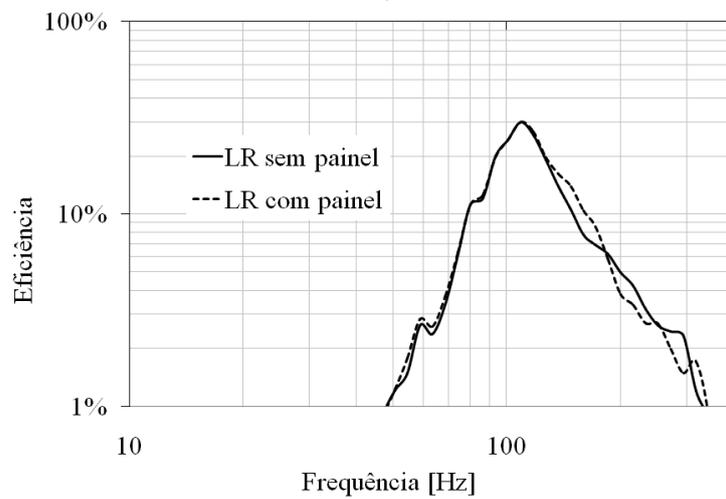
Em termos absolutos, a eficiência não ultrapassa o valor de 32 % em nenhum dos casos analisados. De acordo com a Equação 5.12, a eficiência depende não somente da resistência de radiação vista pelo alto-falante ( $R_r$ ), mas também das perdas de naturezas elétrica e mecânica do transdutor ( $R_0$  e  $R_m$ , respectivamente).



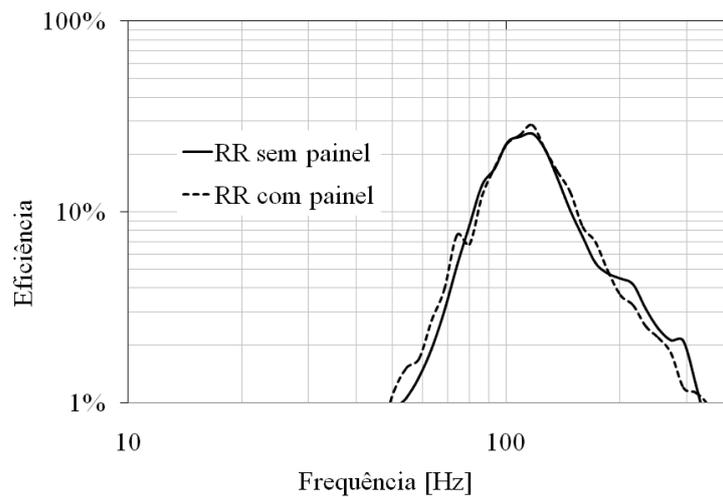
a)



b)



c)



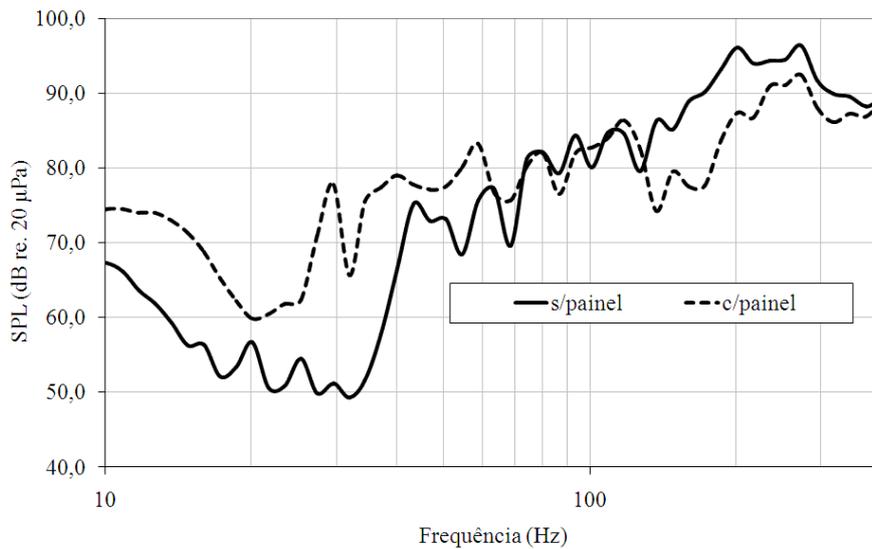
d)

Figura 5.8: Eficiência em função da frequência de cada um dos quatro alto-falantes instalados no veículo A (com e sem o painel de porta).

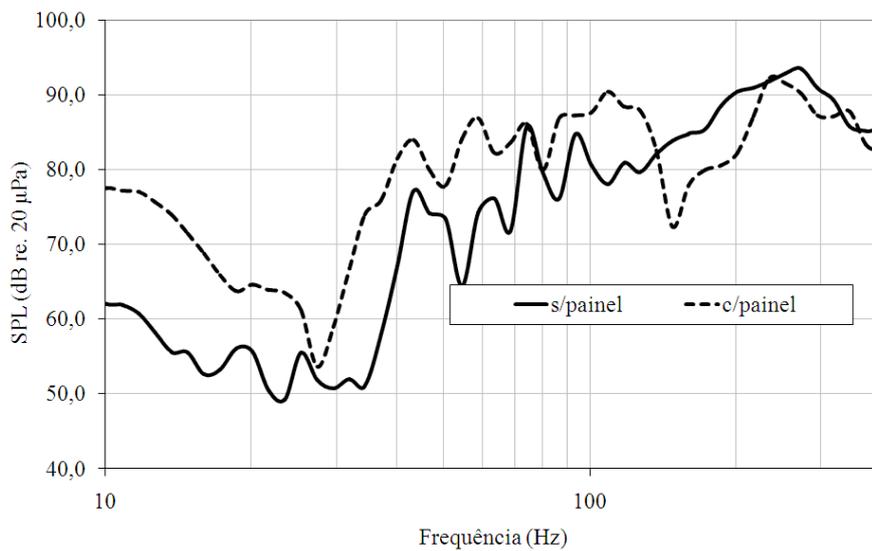
Os alto-falantes anteriores do veículo A (LF e RF) apresentaram diminuição da eficiência de transdução com a remoção do painel de porta, principalmente na vizinhança da frequência de ressonância, como mostrado na Figura 5.8. Na frequência de 60 Hz, por exemplo, a eficiência diminuiu de 20 % para 7 %, aproximadamente, no alto-falante do lado direito (RF). Na frequência de 117 Hz o comportamento desse mesmo alto-falante é parecido, sendo que a eficiência também diminuiu de 18 % para 8 %, aproximadamente.

A Figura 5.9 mostra o nível de pressão sonora em função da frequência dos dois alto-falantes em questão medido com o microfone na posição da cabeça do motorista. Apesar da presença de vales e picos na resposta decorrente das ondas estacionárias que se estabelecem no habitáculo, é possível perceber a maior quantidade de energia acústica nas regiões vizinhas à frequência de ressonância com o painel de porta presente, assim como nos gráficos de eficiência.

Ainda com respeito ao veículo A, as curvas de eficiência dos alto-falantes posteriores (LR e RR) não apresentaram diferenças significativas relacionadas à presença do painel de porta.



a)



b)

Figura 5.9: NPS no veículo A, com e sem o painel de porta: a) LF; b) RF.

No veículo B os alto-falantes são fixados diretamente às chapas metálicas que conformam as portas, diferentemente do veículo A, onde são presos através de espaçadores plásticos a uma distância igual a 12 mm das chapas, como mostrado na Figura 5.10. Esse espaçamento pode ser entendido como um curto circuito acústico, que certamente diminui a eficiência de transdução.

Isso pode explicar a diferença na impedância de radiação observada quando o painel de porta no veículo A é removido.

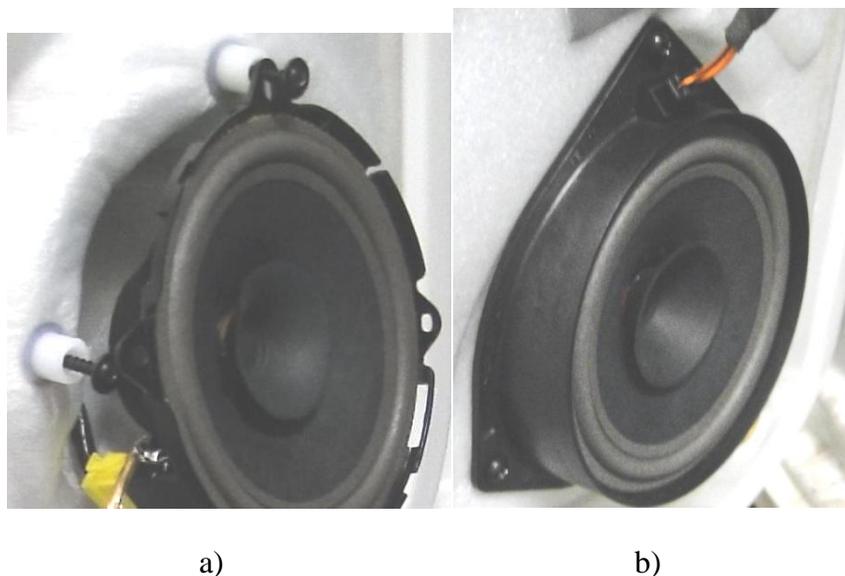
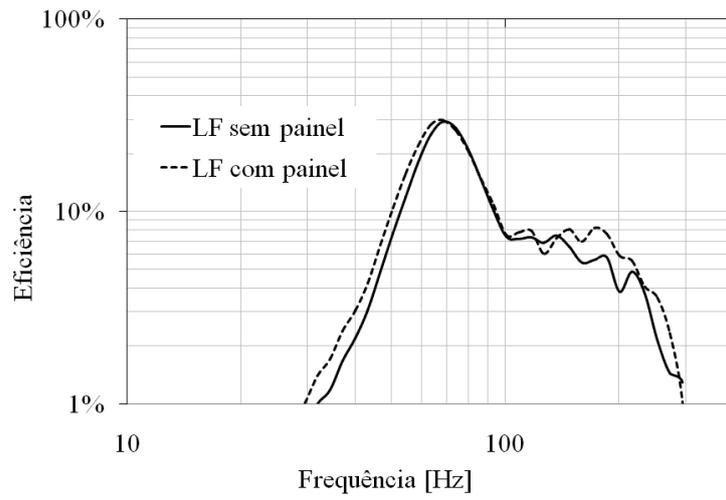


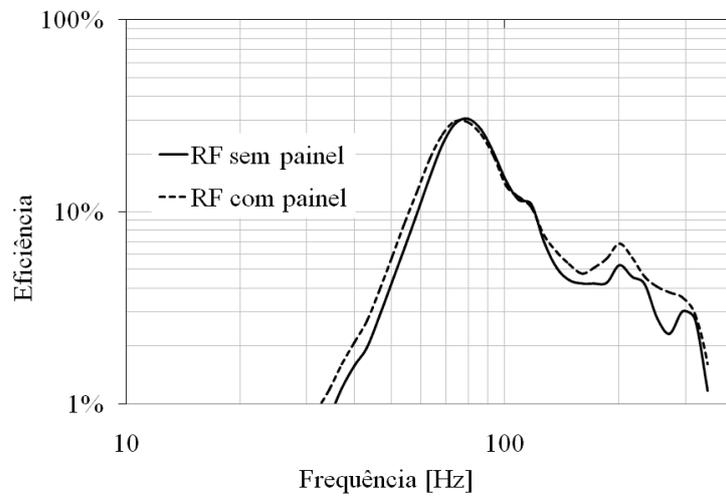
Figura 5.10: Fotografias dos alto-falantes nas portas com detalhe nas fixações: a) veículo A; b) veículo B.

Contudo, tal fenômeno não é observado nos gráficos da eficiência de transdução dos alto-falantes do veículo B, mostrados na Figura 5.11. Nesses casos, a melhoria conseguida com a presença dos painéis de porta é percebida de forma discreta, principalmente nas frequências maiores que 100 Hz.

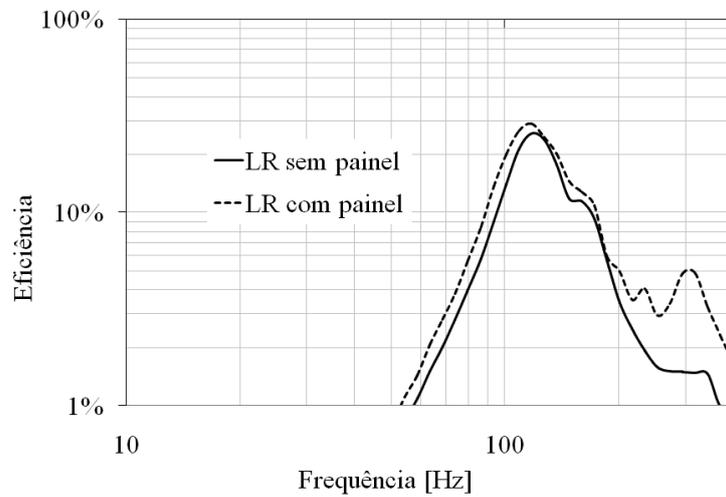
A principal diferença dessas curvas de eficiência com relação às do veículo A ocorre nos alto-falantes anteriores (LF e RF). No veículo B, a eficiência manteve-se maior que 5 % desde 50 Hz, aproximadamente, até frequências pouco maiores que 200 Hz, enquanto no veículo A tal limiar foi atingido ainda na região dos 150 Hz.



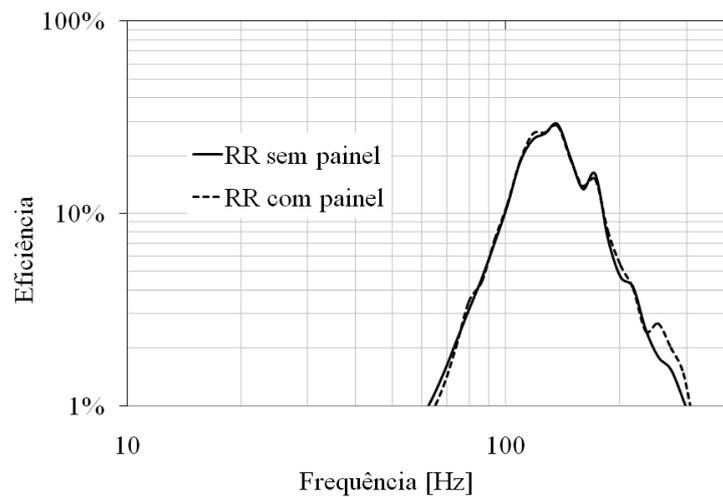
a)



b)



c)



d)

Figura 5.11: Eficiência em função da frequência de cada um dos quatro alto-falantes instalados no veículo B (com e sem o painel de porta).

## 5.4 Conclusões do capítulo

O método apresentado neste Capítulo é baseado num modelo linear do alto-falante, válido para baixas frequências e pequenos sinais, mas ainda assim possibilitou obter uma estimativa de ordem qualitativa sobre a impedância de radiação vista por um alto-falante. A partir da impedância de radiação foi possível estimar também a eficiência da transdução eletroacústica.

O método foi aplicado aos sistemas de sonorização automotiva e revelou que o padrão da eficiência de transdução eletroacústica em função da frequência de um alto-falante instalado na porta de um automóvel apresenta semelhanças ao caso do painel rígido infinito (*infinite baffle*). Contudo, mesmo que a porta, juntamente com o seu painel de forração, atue como um radiador acústico comparável a um *baffle*, também deve ser considerada a contribuição do confinamento acústico dentro do habitáculo para o desempenho do transdutor.

De fato, como já foi discutido anteriormente no Capítulo 3, o ambiente acústico dentro do

automóvel apresenta superfícies reflexivas e quase paralelas, o que possibilita a formação de ondas estacionárias, principalmente nas frequências mais graves (até 500 Hz). Porém, para que fosse possível quantificar separadamente a influência da porta e a influência da acústica do habitáculo na eficiência da transdução, seria necessária uma caracterização específica da porta, enquanto radiador acústico, preferencialmente num ambiente sem reflexões (câmara anecóica).

O método proposto para a estimação da impedância de radiação possibilitou, também, perceber a influência das características da fixação do alto-falante à porta do automóvel, assim como a presença de um painel de porta, no acoplamento vibroacústico e na eficiência de transdução. Em um dos veículos de teste analisados (veículo A), o painel de porta elevou a eficiência de 7 % para 20 % na frequência de 60 Hz, e de 8 % para 18 % em 117 Hz.

# Capítulo 6

## Estudo sobre a inteligibilidade no veículo

### 6.1 Introdução

Recentemente tornou-se significativo o emprego de sistemas de telefonia veicular com recursos para que o motorista atenda às chamadas telefônicas sem tirar as mãos do volante (*hands-free system*). Um microfone instalado em algum ponto do habitáculo capta a voz do motorista, enquanto os alto-falantes do sistema de sonorização do veículo reproduzem a voz do interlocutor na outra ponta da linha telefônica (Figura 6.1).

Além dessa aplicação, a fala vem assumindo outras funções relacionadas à interação entre homem e automóvel através de sistemas de reconhecimento e síntese da fala. Estes podem ser embutidos no autorrádio e utilizados para enviar e receber comandos de voz e informações sobre outros componentes do automóvel. Outra aplicação para sintetizadores de fala é a leitura de mensagens de texto recebidas pelo telefone celular. Não obstante, a voz falada também é um meio para a chegada de informações aos ocupantes do veículo através dos noticiários em canais de rádio AM e FM além de *websites* da Internet.

Nestas aplicações, o acoplamento acústico entre os transdutores e o usuário se diferencia do tradicional gancho dos aparelhos telefônicos. No veículo, as condições acústicas do habitáculo, aliadas aos diversos ruídos presentes durante a sua utilização, têm influência na qualidade percebida pelo usuário durante a comunicação através da fala e, conseqüentemente, na eficiência do sistema de áudio em transmitir a informação.

Um parâmetro para classificar as perdas de um canal de transmissão de sinais de fala é a inteligibilidade, definido como a capacidade de reconhecimento de sons de fala pelo ouvinte [28]. Embora esteja relacionado a uma percepção psicoacústica, e isso implica em subjetivismo, existem métodos objetivos para determiná-lo, ou mesmo para prevê-lo.

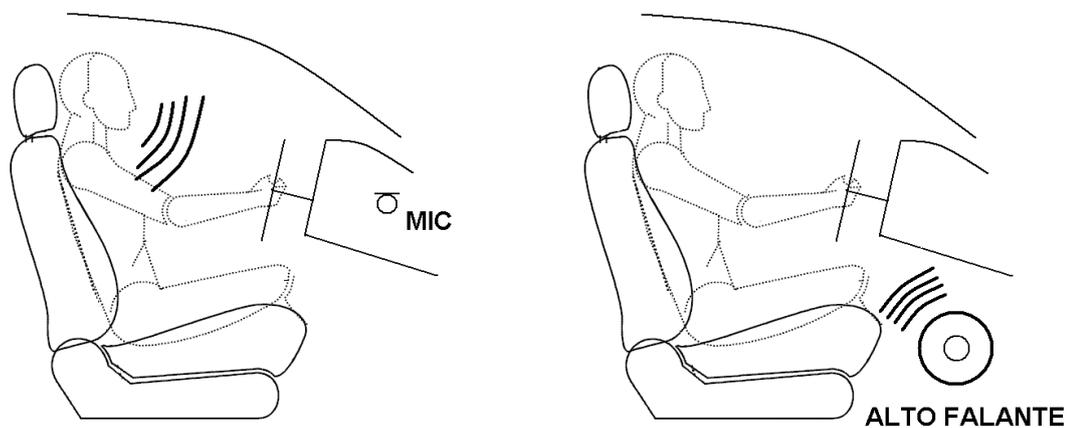


Figura 6.1: Sistema *hands-free* de telefonia veicular.

A inteligibilidade tem impacto no consumo e na eficiência energética de um sistema de sonorização automotiva, pois o usuário normalmente tende a aumentar o ganho do sistema a fim de melhorar a inteligibilidade, como uma primeira reação. Como mostrado nos capítulos anteriores, o consumo do autorrádio e as perdas de potência nos alto-falantes crescem com o aumento do ganho, levando a uma diminuição da eficiência global.

Com o advento do carro elétrico (ou híbrido), a questão do uso racional da energia elétrica tornou-se importante para todos os sistemas eletro-eletrônicos embarcados no automóvel. No caso do sistema de áudio, é amplamente justificável um esforço para entender e quantificar os fenômenos que mais contribuem para a deterioração da inteligibilidade. Isso pode abrir possibilidades para a implementação de melhorias deste parâmetro e, conseqüentemente, redução do consumo energético do sistema.

Nesse capítulo, inicialmente são discutidas as causas físicas da redução de inteligibilidade e alguns dos métodos de caracterizá-la objetivamente propostos na literatura e nas normas internacionais. Posteriormente, o tema da inteligibilidade é estudado no contexto dos sistemas de áudio veiculares, levando em consideração as principais ocorrências e particularidades do ambiente automotivo. Com isso, é proposta a utilização de um dos métodos discutidos a fim de caracterizar experimentalmente a inteligibilidade da fala em veículos de teste. Ao final, são discutidos os resultados de medições realizadas em câmara fonoisolada e também numa pista de testes, e é avaliado o impacto de uma equalização corretiva na inteligibilidade.

## 6.2 Causas de redução da inteligibilidade

A inteligibilidade da fala está relacionada à intensidade e ao tipo dos sons indesejados que se misturam aos sons da fala, atrapalhando a sua percepção e/ou interpretação. Três das principais causas de redução da inteligibilidade são listadas a seguir.

### 6.2.1 Razão sinal-ruído

Dependendo das características do ruído presente na comunicação (NPS e espectro), os sinais de fala podem sofrer mascaramento no sistema auditivo. Dividindo o espectro de frequências

audíveis em bandas (por exemplo, oitavas ou terço de oitavas), tem-se que em cada banda o mascaramento efetivo é relacionado com o limiar inferior da audição e também com a contribuição dos sinais de fala para a inteligibilidade, além das próprias intensidades do ruído e da fala.

### 6.2.2 Fatores eletroacústicos

Os circuitos eletrônicos de tratamento e amplificação dos sinais de fala e os transdutores eletroacústicos (alto-falantes) podem apresentar não-linearidades que levam à distorção do sinal e ao conseqüente aparecimento de artefatos ao longo do espectro de frequências. Esses artefatos misturam-se ao sinal original e podem mascará-lo.

Além disso, os alto-falantes e caixas acústicas utilizados na reprodução da fala são responsáveis por radiar os sons dentro do espaço fechado, e também por determinar as características espaciais e temporais do campo acústico formado, em interação com o ambiente.

Assim, diversos tipos de deficiências no sistema de sonorização podem comprometer a inteligibilidade da fala. A seguir são citados alguns casos relacionados às características do sistema de áudio empregado [28]:

1. Desalinhamento entre os alto-falantes: caixas acústicas desalinhadas reproduzindo o mesmo som criam lóbulos espúrios de radiação sonora que podem atingir paredes reflexivas, aumentando a energia no campo sonoro reverberante;
2. Equalização: o mau uso de circuitos equalizadores e/ou o tratamento acústico inadequado de um ambiente podem realçar ou atenuar certos formantes da fala, ou mesmo levar o sistema à saturação (distorção), comprometendo a inteligibilidade;
3. Cobertura acústica e diretividade das fontes: uma má distribuição de caixas acústicas

pelo ambiente, ou a escolha errada do padrão de radiação destas em função da aplicação, leva aos mesmos problemas do desalinhamento dos transdutores;

4. AGC – controle automático de ganho: este tipo de circuito é usualmente empregado para a proteção do sistema contra saturações, ou para maximizar a energia de um sinal através da compressão de sua faixa dinâmica. O ajuste inadequado dos tempos de ataque e relaxamento do controle de ganho distorce a envoltória do sinal de fala, podendo comprometer a inteligibilidade.

### 6.2.3 Reverberação

O sistema auditivo humano é capaz de distinguir a direção de fontes sonoras independentes e assim separar a fala dos eventuais ruídos que venham de posições diferentes da do locutor. Este fenômeno favorece a inteligibilidade, principalmente em situações de campo acústico livre (sem reflexões). Contudo, em ambientes com excesso de reverberação e/ou ecos a inteligibilidade é fortemente comprometida. De fato, os sons refletidos misturam-se ao som direto da fala, mascarando-o. Além disso, no campo acústico reverberante o ouvinte é atingido por sons vindos de todos os lados, o que dificulta o discernimento espacial entre o locutor e as fontes de ruído.

A Figura 6.2 reproduz os resultados apresentados por Peutz [29] ao relacionar a inteligibilidade com o tempo de reverberação da sala. O parâmetro utilizado é o  $AL_{CONS}$ , ou perda na articulação de consoantes, que será discutido na próxima seção. De acordo com a figura, a partir de uma razão sinal-ruído de 25 dB, a articulação depende apenas do tempo de reverberação da sala.

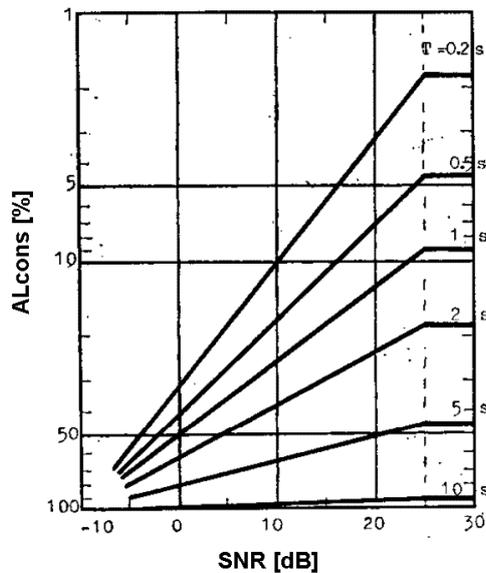


Figura 6.2: Perda na articulação de consoantes em função da razão sinal-ruído SNR e do tempo de reverberação T [29].

Indo além, ele ainda discute a relação entre a intensidade das primeiras reflexões (*early reflections*) e a intensidade do som reverberante. A Figura 6.3 ilustra esse comportamento onde é definida uma região dentro da sala entre o locutor e o ouvinte onde a inteligibilidade varia de acordo com a distância entre ambos. Essa região é delimitada pela distância crítica ( $D_C$ ), a partir da qual a articulação torna-se independente da distância, variando apenas em função do tempo de reverberação.

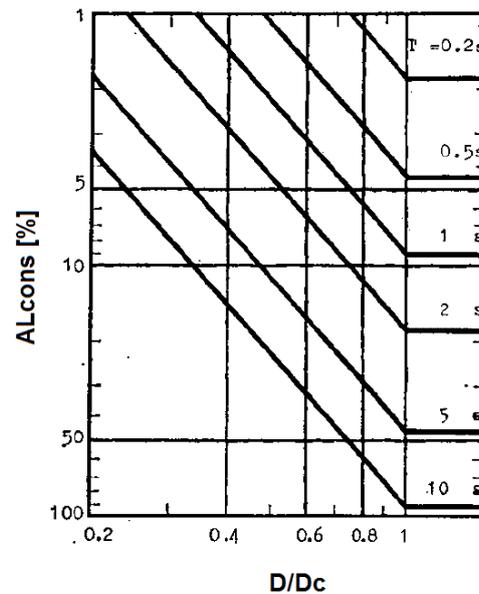


Figura 6.3: Perda na articulação de consoantes em função da distância  $D$  entre o locutor e o ouvinte e do tempo de reverberação  $T$  [29].

### 6.3 Medidas de inteligibilidade

Os métodos subjetivos são os mais diretos e representativos indicadores da inteligibilidade, pois a variável medida é a taxa de acertos de um grupo de ouvintes treinados, ou seja, a capacidade de perceber e interpretar corretamente a informação transmitida pelo canal. Contudo, esses testes devem seguir rigorosos padrões de execução para que os resultados sejam confiáveis.

Por outro lado, existe a situação onde a inteligibilidade precisa ser prevista na etapa de projeto, como no caso de auditórios ou salas de concerto. Também existem os casos onde se deseja medir a inteligibilidade através de analisadores de bancada ou mesmo portáteis. Em ambas as situações, a inteligibilidade deve ser correlacionada, num primeiro momento, com parâmetros físicos mensuráveis (por exemplo: volume da sala, tempo de reverberação, razão sinal-ruído). Entretanto, para que sejam válidos, os métodos objetivos devem necessariamente

apresentar forte correlação com resultados de testes subjetivos.

Devido ao grande número de fatores que podem influenciar a inteligibilidade da fala, o método de medição escolhido deve ser adequado ao canal de comunicação e aos recursos disponíveis (prazo para execução, recursos laboratoriais). A seguir são apresentados alguns dos principais métodos de medição da inteligibilidade e suas aplicações.

### 6.3.1 Métodos subjetivos

Métodos subjetivos de avaliação da inteligibilidade envolvem a reprodução de sinais de fala gravados por locutores profissionais. Estes sinais de teste normalmente são do tipo “consoante-vogal-consoante” (CVC) e devem ser foneticamente balanceados entre palavras sem sentido e palavras com significado. Para se aproximar da situação real de percepção de fala, as palavras de teste podem ser acompanhadas de duas ou mais palavras (antes ou depois), ou estar dentro de uma frase [30, 31].

Os avaliadores escrevem num formulário diretamente o que ouviram. Portanto, a inteligibilidade do canal em teste está relacionada à taxa de acertos dos ouvintes. Avaliadores treinados atingem índices de acerto maiores que a população média, mas os resultados apresentam menor variância, o que se traduz em maior confiabilidade. A classificação dos avaliadores num teste subjetivo leva em consideração não somente o estado de saúde otológica, mas também aspectos psicológicos e culturais dos ouvintes.

Os testes subjetivos são longos e dispendiosos. O treinamento de um conjunto de avaliadores pode levar meses. A compilação dos resultados envolve métodos estatísticos avançados. Os testes devem ser realizados em ambiente laboratorial com equipamentos de alta confiabilidade e precisão. Todos os fatores citados justificam a grande dificuldade inerente à realização de testes

subjetivos, o que os torna inviáveis em vários casos.

### 6.3.2 Métodos objetivos

Métodos objetivos de avaliação da inteligibilidade têm a vantagem de excluir o ouvinte humano e, como consequência, todo o aparato de testes subjetivos e análises estatísticas que consomem tempo e aumentam os custos dos testes.

Diversas metodologias de avaliação objetiva da inteligibilidade da fala foram propostas desde o surgimento da telefonia, e normalmente extraem a informação desejada a partir da análise do campo reverberante e dos ruídos externos que interferem com os sinais de fala. Alguns destes métodos são úteis na simulação do desempenho de um ambiente antes de ele ser construído, enquanto outros são aplicáveis apenas na avaliação de sistemas já implementados. A seguir, alguns dos índices mais frequentes na literatura são apresentados:

a) AI (*articulation index*) – índice de articulação [28]: é baseado na ideia que a resposta de um sistema de comunicação pode ser dividida em 20 bandas críticas de frequência, onde cada banda contribui da mesma forma para a inteligibilidade do sistema. A razão entre o NPS do sinal de fala e o NPS do ruído (SNR) é computada individualmente para cada banda, e então todas são combinadas para se obter o índice de articulação. Os valores variam de 0 (completamente ininteligível) até 1 (perfeitamente inteligível).

b) razão entre sons úteis e prejudiciais (*useful-to-detrimental sound ratio*) [32]: é a razão logarítmica entre a energia do som direto e das primeiras reflexões (até 80 ms após o som direto) e a energia do ruído ambiental somada à energia das últimas reflexões do sinal da fala. Os valores de energia podem ser calculados a partir da resposta impulsiva da sala em questão.

c) AL<sub>CONS</sub> (*articulation loss of consonants*) – perda na articulação de consoantes [29]:

restringe-se à correlação entre a percepção das consoantes e a inteligibilidade. É calculado a partir das razões entre as energias do som direto e do som reverberante, juntamente com o tempo de decaimento das reflexões iniciais. Como não considera a razão entre o NPS do sinal de fala e o NPS do ruído (desde que seja maior que 25 dB), este parâmetro é mais utilizado na avaliação de grandes salas com sistemas de reforço sonoro artificiais. Pode ser estimado na etapa de projeto da sala, pois, na sua forma mais simples, relaciona-se apenas com as dimensões da sala (volume e distância entre a fonte sonora e o ouvinte) e com o tempo de reverberação (RT60). A partir de uma determinada distância crítica entre a fonte sonora e o ouvinte, as perdas na articulação de consoantes se tornam diretamente proporcionais ao tempo de reverberação.

d) STI (*speech transmission index*) – índice de transmissão da fala [33]: a partir da aplicação de sinais de teste modulados em amplitude que simulam as características dinâmicas da fala, é medida a redução na intensidade de modulação no receptor, para cada banda de frequência. Esta redução pode ser causada pela contaminação do sinal por ruído, ou pela reverberação na sala em questão. A partir da redução no índice de modulação é possível calcular a razão sinal-ruído em cada banda de frequência e a inteligibilidade é dada pela soma da contribuição ponderada de cada uma das bandas, assim como no AI.

Bradley [34] mostrou que todos os quatro métodos citados levam a resultados similares, ou seja, as medidas de inteligibilidade podem ser mapeadas umas nas outras a fim de atender a aplicações específicas. Isso porque todas combinam uma medida da razão fala-ruído e uma medida da acústica da sala para qualificar a inteligibilidade da fala. Contudo, ele não conclui qual método conduz a resultados mais correlacionados com os resultados de testes subjetivos.

## 6.4 Inteligibilidade em sistemas automotivos

Dentre os fatores que determinam a inteligibilidade num sistema de áudio veicular (que não estão sob o controle do usuário) destacam-se: a) as funções de transferência acústica entre a fonte sonora e o receptor, tanto da boca do motorista até o microfone no painel, quanto do alto-falante até o ouvido do motorista; b) o mascaramento do sinal de fala por ruídos gerados pelo veículo e no ambiente externo.

### 6.4.1 Funções de transferência no habitáculo

Os caminhos percorridos pelas ondas sonoras no interior do veículo são caracterizados pelas suas funções de transferência acústicas (FT). Na Figura 6.4 é apresentado um diagrama de blocos tendo como fonte de sinal o aparelho fonador do motorista, e como destino final o microfone do sistema de áudio. Na Figura 6.5 tem-se o diagrama de blocos no caso em que as fontes sonoras são os alto-falantes e os destinos são os ouvidos do motorista. Em ambos os casos existe uma fonte simbólica combinando os sinais interferentes (ruídos) que são somados aos sinais de fala no campo acústico do habitáculo. De fato, cada um desses ruídos tem uma FT que caracteriza o seu caminho de propagação. Assim, a intensidade com que cada um dos sinais, fala e ruído, é percebido pelo usuário vai depender não só das características das fontes sonoras mas também das funções de transferência entre as fontes e o usuário.

É importante considerar que dentro do habitáculo as dimensões reduzidas levam à condição acústica de campo próximo. Isso significa que o trato vocal do locutor não pode ser considerado como uma fonte sonora pontual. Na prática, os padrões de radiação do aparelho fonador são bastante complexos [35], o que traz grande variabilidade na sua captação pelo microfone do sistema *hands-free*. Isso significa que ao mexer com a cabeça durante a fala, o usuário varia a FT

entre sua boca e o microfone, o que pode levar a variações da inteligibilidade.

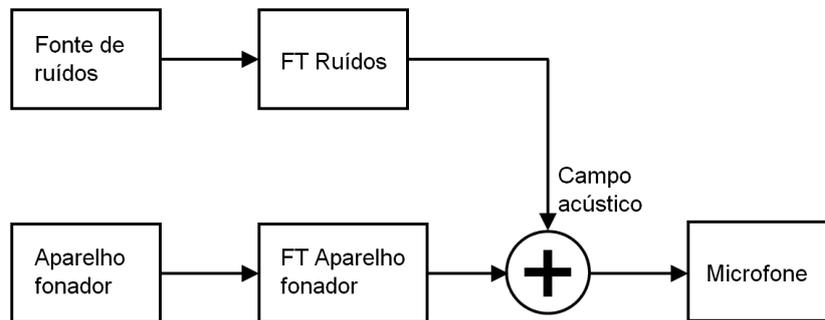


Figura 6.4: Diagrama de blocos mostrando as funções de transferência no caminho entre o locutor e o microfone do sistema *hands-free*.

Dentro do veículo existem reflexões sonoras, mas que não caracterizam a formação de um campo acústico reverberante, muito menos de ecos [36]. O principal impacto das superfícies reflexivas é o surgimento de modos acústicos normais devido à formação de ondas estacionárias entre os vidros quase paralelos. Estes modos são mais significativos em baixas frequências, até 200 Hz aproximadamente.

Na Figura 3.6 foi apresentado o NPS em função da frequência no habitáculo medida na posição da cabeça do motorista, cujas fontes sonoras são os alto-falantes posteriores. Como frisado anteriormente, as irregularidades na resposta alteram as características espectrais do sinal de fala, tornando-o mais (ou menos) suscetível ao mascaramento devido à interferência dos ruídos e, como consequência, piorando (ou melhorando) a inteligibilidade conseguida dentro do automóvel.

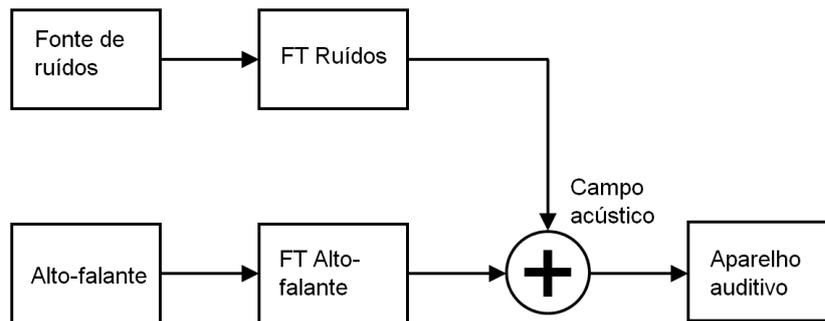


Figura 6.5: Diagrama de blocos mostrando as funções de transferência no caminho entre o alto-falante e o ouvinte.

### 6.4.2 Ruídos no veículo

Os ruídos acústicos presentes no interior do veículo têm influência direta na inteligibilidade percebida pelo usuário ao se comunicar através da fala. Esses ruídos têm diversas fontes, dentre elas: a) interação dos pneus com o pavimento, b) deslocamento do veículo através do ar, c) funcionamento do motor de combustão interna, d) ventiladores de climatização interna e de arrefecimento do motor de combustão interna, e) pequenos motores e bombas elétricas para fluidos do veículo, f) vibração de componentes, principalmente chapas, g) ruído ambiental fora do veículo.

A razão entre do ruído interferente total e o NPS do sinal de fala reproduzido pelos alto-falantes influencia o comportamento do usuário ao longo da conversação (posição da cabeça, intensidade da fala, nível de atenção durante a escuta). Aumentar o ganho do sistema de sonorização melhora a razão sinal-ruído, porém há um limite superior para o NPS dentro do veículo relacionado ao conforto da audição e também à própria capacidade do sistema de som.

### 6.4.3 Modelo da inteligibilidade em sistemas de áudio automotivo

Como no habitáculo a reverberação é desprezível, a inteligibilidade depende principalmente

das funções de transferência acústicas e das características dos ruídos interferentes. O índice de articulação AI é adequado para quantificar a inteligibilidade em aplicações automotivas, pois é fundamentado na razão entre o nível de pressão sonora do sinal de fala  $L_s$  e o nível de pressão sonora do ruído  $L$ , como mostrado na Equação 6.1:

$$SNR(k) = 20 \log \left( \frac{L_s(k)}{L(k)} \right), \quad (6.1)$$

onde  $k$  representa o número de bandas de frequência em que o espectro dos sinais foi dividido.

Uma correção a ser feita na razão sinal ruído  $SNR(k)$  é referente ao efeito psicoacústico do mascaramento entre bandas de frequências adjacentes. Assim, uma fração do NPS de um ruído em determinada banda de frequência  $k$  deve ser somada ao NPS da próxima banda  $k+1$ . Essa fração do NPS é usualmente adotada como sendo igual a  $-35$  dB, no caso de o espectro de frequências ser dividido em intervalos de oitavas [28, 33].

Os valores  $SNR(k)$  agora podem ser normalizados e mapeados linearmente dentro de um intervalo de valores  $R$  nos quais a sua contribuição para a inteligibilidade varia entre 0 e 1 ( $TI(k)$  na Equação 6.2):

$$TI(k) = (SNR(k) - S) / R, \quad (6.2)$$

onde  $S$  é o valor no qual a contribuição daquela banda é mínima, ou nula.

A soma dos valores de  $TI$  (*transmission index*) ponderados de acordo com a contribuição de cada banda para a inteligibilidade resulta no AI (Equação 6.3):

$$AI = \sum_1^k (W(k) \cdot TI(k)), \tag{6.3}$$

onde  $W(k)$  representa o fator de ponderação por banda de frequência, sendo que a soma de todos os  $W(k)$  é unitária. Esta ponderação deve ser determinada empiricamente a partir de testes subjetivos. Na Figura 6.6 são apresentados os valores de utilizados por French e Steinberg [28] para a língua inglesa e por Steeneken e Houtgast [33] para a língua holandesa, uma vez que tais parâmetros não estão disponíveis para o idioma português. No primeiro caso, o valor proposto para  $R$  é igual a 30 e o valor de  $S$  é igual a 12. No segundo caso,  $R$  é igual a 30 e  $S$  é igual a 15. Esses valores foram determinados em ambos os casos através de correlação estatística com resultados de testes subjetivos.

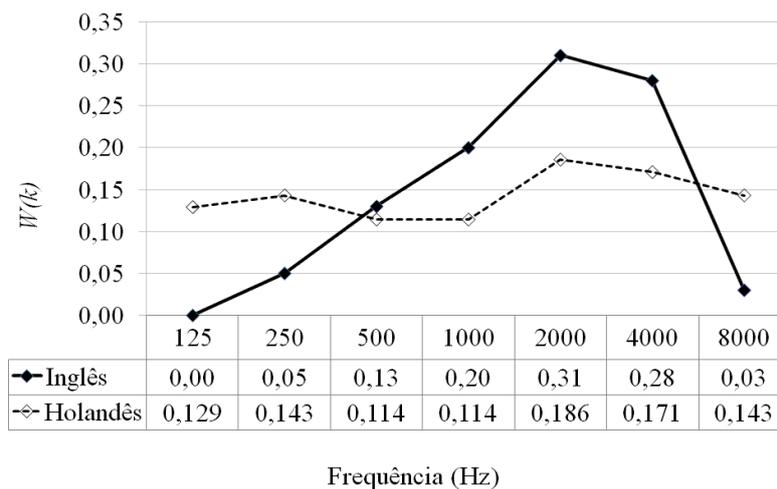


Figura 6.6: Índices de ponderação por banda de oitava para os idiomas inglês e holandês [28, 33].

É possível notar pela Figura 6.6 que a variação do índice entre as oitavas é maior no caso da língua inglesa, sendo que as maiores contribuições ocorrem em 2 kHz e 4 kHz. Na oitava centrada em 125 Hz a contribuição é nula, o que indica que um sistema de áudio para captação ou reprodução de fala (ex.: telefone) não precisa responder a frequências menores ou iguais a

essa. Da mesma forma, a oitava com frequência central mais alta (8 kHz) contribui relativamente pouco para o índice de articulação e pode ser encarada como o limite superior da banda passante de um sistema para tratar com sinais de fala. Indo além, os índices apresentam uma tendência crescente até o pico em 2 kHz, o que sugere que esquemas de compressão de sinais possam se valer de tal comportamento durante a decisão sobre quais faixas de frequências devem priorizar.

Na língua holandesa, ao contrário, a variação entre as oitavas é menor, o que significa que todas contribuem de forma semelhante para a determinação do AI. Nesse caso não é possível concluir de forma similar ao caso da língua inglesa.

## 6.5 Caracterização experimental

A fim de realizar uma caracterização experimental da inteligibilidade da fala em automóveis, foram executadas medições do nível da pressão sonora em veículos de teste com o auxílio de um simulador de cabeça e torso (*head and torso simulator* – HATS), mostrado na Figura 6.7. Os ensaios visaram a caracterizar o impacto de ruídos normalmente presentes durante a utilização do veículo na percepção de um sinal de fala reproduzido pelos alto-falantes do sistema de sonorização do automóvel, como numa chamada telefônica. A instrumentação utilizada é descrita na Seção A.5 do Apêndice A.

Foram utilizados dois veículos de modelos diferentes, referidos como veículo A e veículo B, ambos da categoria *hatchback* de baixo custo. O HATS foi posicionado no assento do passageiro, ao lado do motorista, na posição mais afastada do pára-brisa. As captações dos ruídos dinâmicos (com o veículo em movimento) foram realizadas na pista de testes da montadora Fiat Chrysler Automobiles, em Betim/MG. Na câmara fonoisolada dessa mesma montadora foram medidos ruídos de componentes internos com o veículo estático. Os sinais de fala reproduzidos

pelos sistemas de áudio dos veículos foram captados separadamente, também dentro da câmara fonoisolada.



Figura 6.7: Fotografia do HATS instalado no veículo.

### 6.5.1 Sinais de fala utilizados nos ensaios

Os sinais de fala reproduzidos pelo sistema de áudio dos automóveis para os ensaios são dois trechos de noticiários, um com voz masculina (Figura 6.8 – “*O embaixador Oswaldo Aranha fez o discurso de abertura*”) e o outro com voz feminina (Figura 6.9 – “*Na justiça a AGU defendeu que além de ser indevido o ajuizamento deste*”). A duração de ambos os trechos é igual a quatro segundos. Os sinais foram codificados segundo o padrão MP3, com frequência de amostragem igual a 44,1 kHz, resolução de 16 bits e taxa de transmissão igual a 128 kbits/s. Os arquivos foram copiados do *website* da Empresa Brasil de Comunicação S/A, que produz o programa “A voz do Brasil”.

A Figura 6.10 e a Figura 6.11 mostram os espectros dos sinais acústicos de fala em bandas de oitavas captados nos veículos A e B, respectivamente. Cada espectro é calculado a partir das

médias entre janelas com 8192 amostras e uma sobreposição igual a 95 %. Também são mostradas as médias dos NPS em cada banda das duas vozes, além do ruído de fundo medido dentro dos veículos. É importante notar que, embora o cálculo do índice de articulação considere apenas as bandas de oitavas entre 125 Hz e 8 kHz, nos gráficos são mostradas as bandas entre 31,5 Hz e 16 kHz.

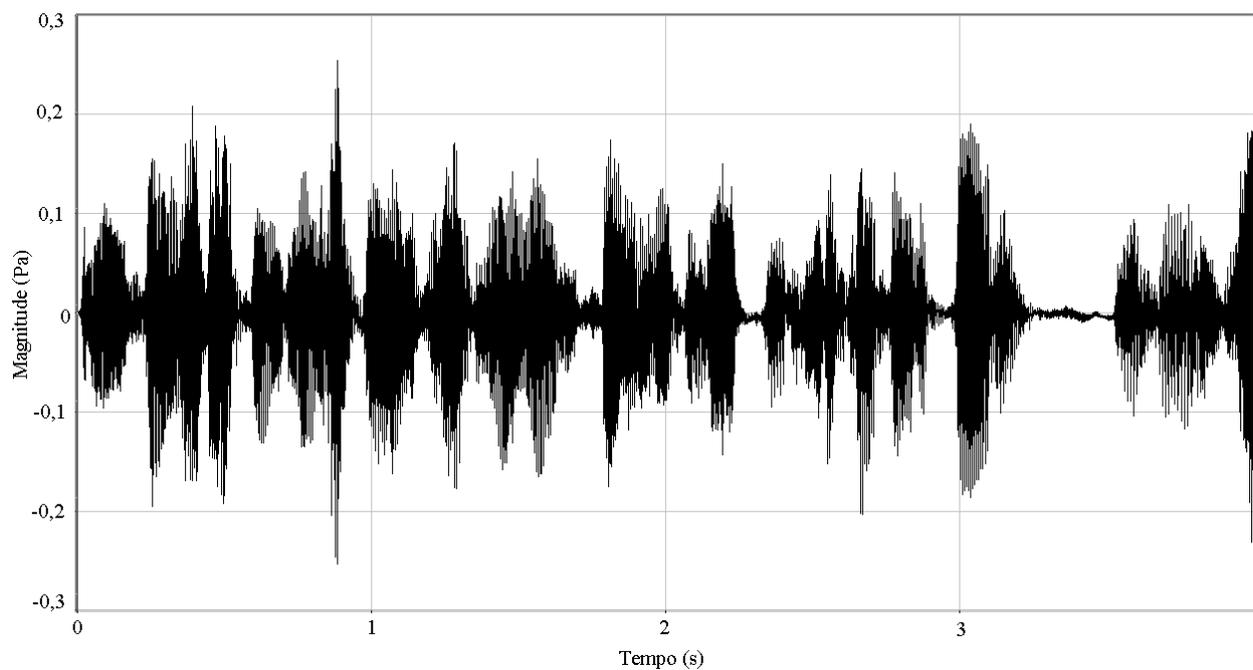


Figura 6.8: Série temporal referente ao trecho de fala (voz masculina).

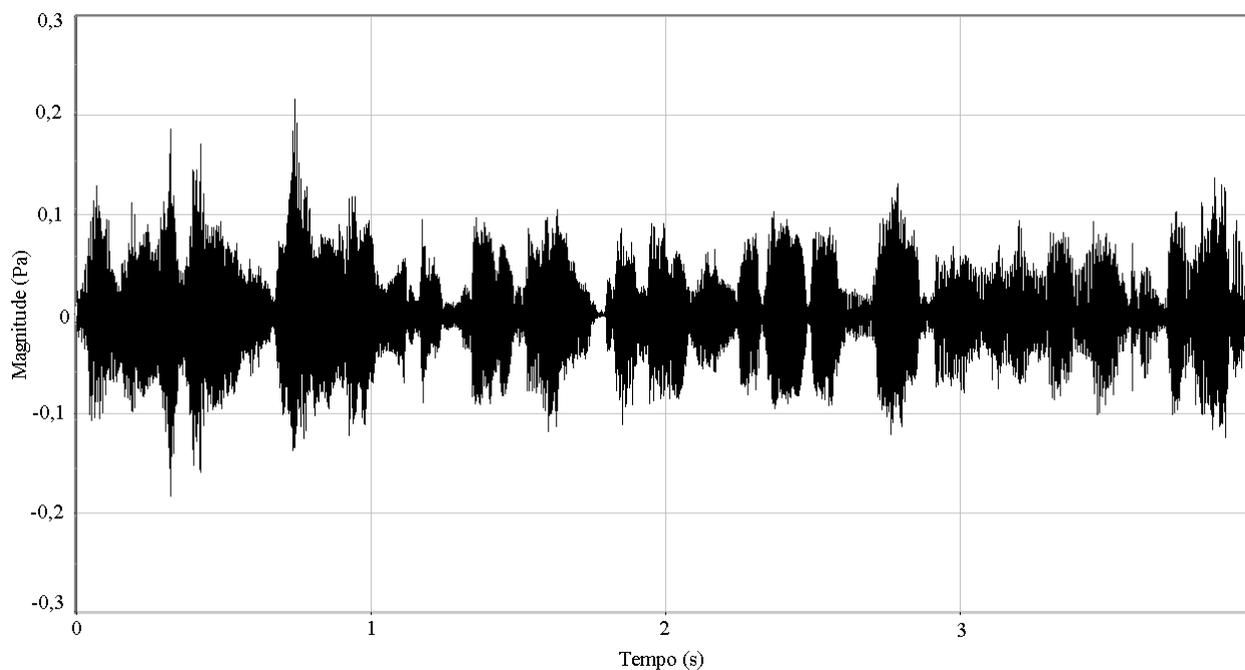


Figura 6.9: Série temporal referente ao trecho de fala (voz feminina).

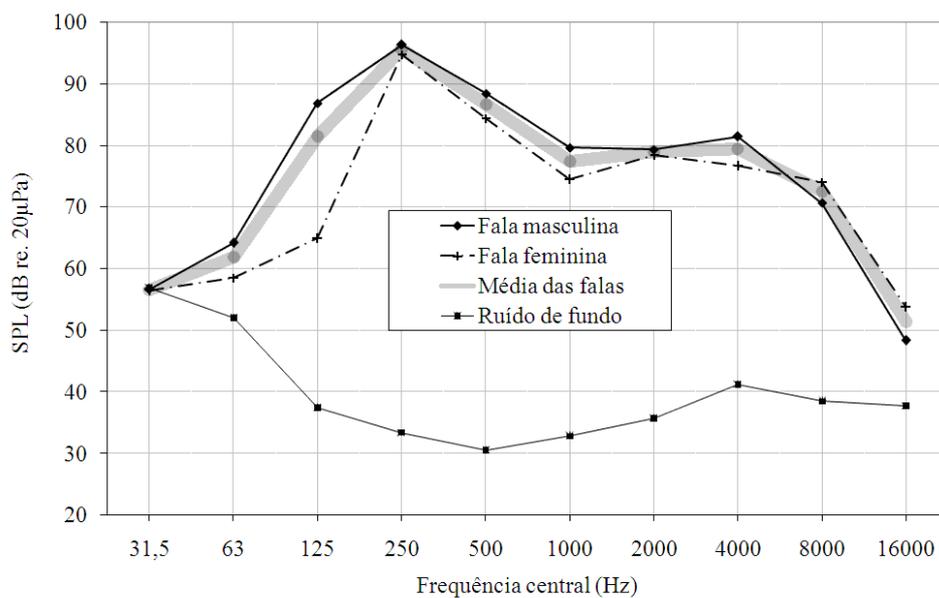


Figura 6.10: Espectro em bandas de oitavas dos sinais de fala reproduzidos no veículo A.

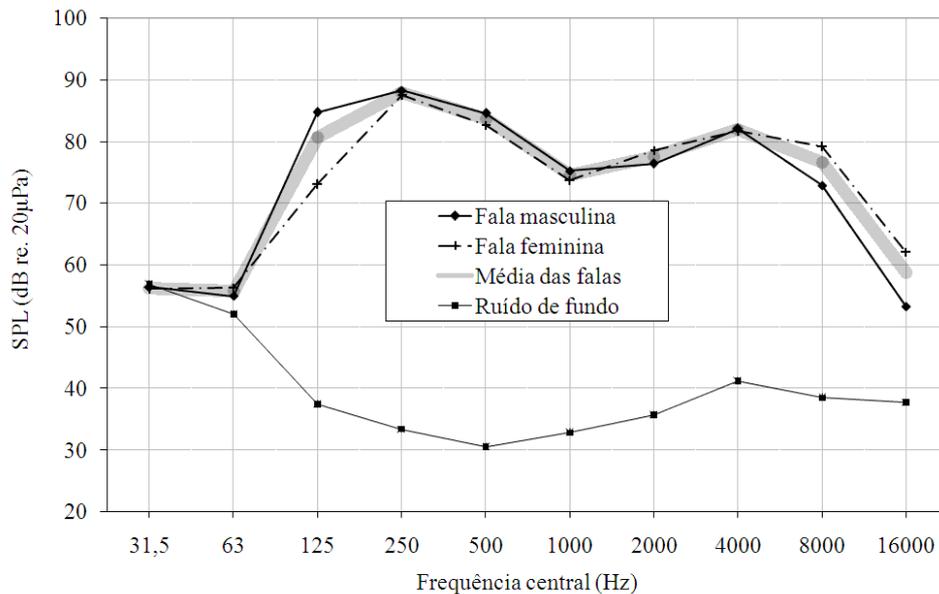


Figura 6.11: Espectro em bandas de oitavas dos sinais de fala reproduzidos no veículo B.

A maior diferença entre a voz masculina e a feminina manifesta-se na banda de oitava com frequência central igual a 125 Hz. No veículo A tal diferença é maior que 20 dB e no veículo B é maior que 12 dB, a favor da voz masculina. Sobre a diferença entre a resposta dos sistemas de som, é possível perceber que no veículo A há mais energia nas bandas centradas em 125, 250 e 500 Hz, nas posições onde as medições foram executadas.

### 6.5.2 Cálculo do índice de articulação

Para calcular o índice de articulação (AI) relacionado a cada um dos tipos de ruído, primeiramente é determinada a razão entre o NPS do sinal de fala e o NPS do ruído captados separadamente, em bandas de oitava  $SNR(k)$ . O próximo passo é aplicar a correção referente ao fenômeno do mascaramento entre frequências. Finalmente, são aplicados os parâmetros de ponderação  $W(k)$  para o idioma inglês (AI EN) e para o idioma holandês (AI NL).

A norma internacional IEC 60268-16 [36] sugere que um valor do STI superior a 0,45 é

considerado adequado, superior a 0,6 é considerado bom, e superior a 0,75 é considerado excelente. Embora seja uma definição aplicável apenas ao método STI, ela pode ser adotada nas atuais análises como uma referência de ordem qualitativa, pois o STI é um método diretamente derivado do AI.

Em todas as medidas foi considerada a média entre os dois sinais captados pelos microfones instalados nas orelhas do HATS. Não foram considerados, então, os mecanismos de processamento biauricular do sistema auditivo humano, que atuam para extrair informações sobre a localização das fontes sonoras e aumentar a capacidade do indivíduo em discernir a fala em ambientes ruidosos. Existem modelos mais recentes para determinar a inteligibilidade que consideram tais mecanismos psicoacústicos [38].

Juntamente com os gráficos do espectro em bandas de oitavas, são apresentados também gráficos do índice de articulação em função da razão sinal-ruído total (SNR) para cada caso. O objetivo é mostrar a variação do AI quando o usuário altera a intensidade da fala ao atuar no ganho do sistema de áudio. A SNR, nesses casos, é determinada pela Equação 6.4:

$$SNR = L_{sinal} - L_{ruído} \quad (6.4)$$

onde os níveis de pressão sonora do sinal de fala e do ruído ( $L_{sinal}$  e  $L_{ruído}$ ) são expressos em ponderados em A a fim de melhor representar a sensação de volume sonoro pelos usuários do veículo.

De acordo com o modelo não linear do índice de articulação, é de se esperar que a curva que representa o AI cresça linearmente até entrar em estado de saturação quando se aproxima da unidade, que é o máximo valor atingível. As duas características dessas curvas que mais interessam para a análise são:

a) a taxa de variação do AI em função da SNR, pois uma taxa de variação elevada significa que um pequeno acréscimo de energia ao sinal de fala conduz a uma significativa melhora no AI. O caso contrário, ou seja, baixa taxa de variação, significa que é preciso fornecer muito mais energia ao sistema de sonorização para atingir uma mesma melhora na inteligibilidade.

b) o valor do AI quando a SNR é igual a 0 dB, ou seja, quando o NPS do ruído é igual ao NPS do sinal de fala. Esse valor é proposto como uma referência para as comparações entre AIs dos diversos ruídos amostrados, pois é uma região onde a maioria deles ainda varia de forma linear com o SNR, como será mostrado.

Também é importante considerar a diferença entre as curvas referentes ao AI calculadas para a língua inglesa e para a língua holandesa a partir de um mesmo tipo de ruído. Devido às diferenças entre os índices de ponderação por banda de oitava de ambos os idiomas, os resultados para os AIs tendem a ter comportamentos diferentes entre si.

### 6.5.3 Ruídos com o veículo em movimento

Da Figura 6.12 até a Figura 6.15 são mostrados os espectros dos ruídos de deslocamento escolhidos para a caracterização da inteligibilidade. Em ambos os veículos de teste foram executadas medidas acústicas nas seguintes situações: a) deslocamento em pavimento asfáltico com velocidade igual a 100 km/h; b) deslocamento em pista de calçamento rochoso poliédrico com velocidade igual a 40 km/h. Todas as janelas e entradas de ar dos veículos foram mantidas fechadas durante as captações. O ventilador de climatização foi mantido inativo, assim como qualquer outra fonte de ruído sob controle do usuário.

As medições dinâmicas de ruído com o veículo A na pista de testes foram executadas com o assento do HATS em três posições diferentes (pos1, pos2 e pos3), com distanciamento

progressivo de 15 cm entre si a partir da posição inicial (mais longe do pára-brisa), no plano horizontal. Essas medições têm como objetivo caracterizar as variações do campo acústico dentro do habitáculo em função da posição de captação. Nas medições com o veículo B o assento com o HATS foi mantido unicamente na sua posição inicial.

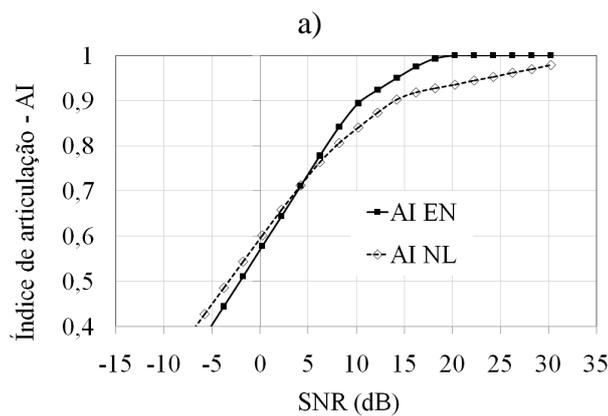
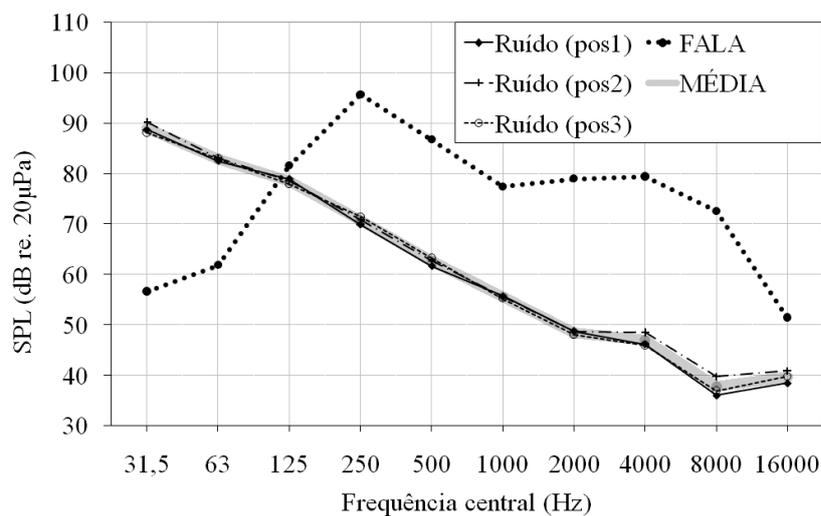


Figura 6.12: Ruídos captados com o veículo A a 100 km/h (asfalto): a) espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR.

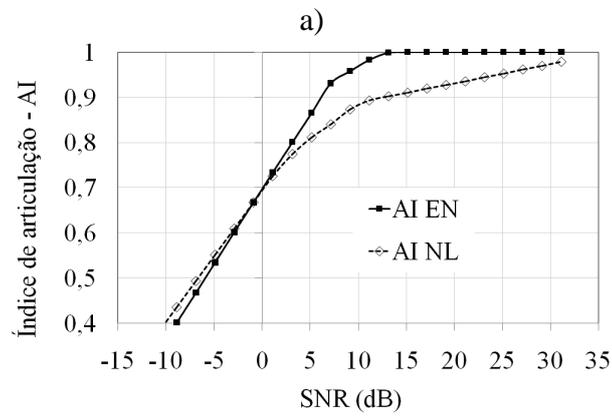
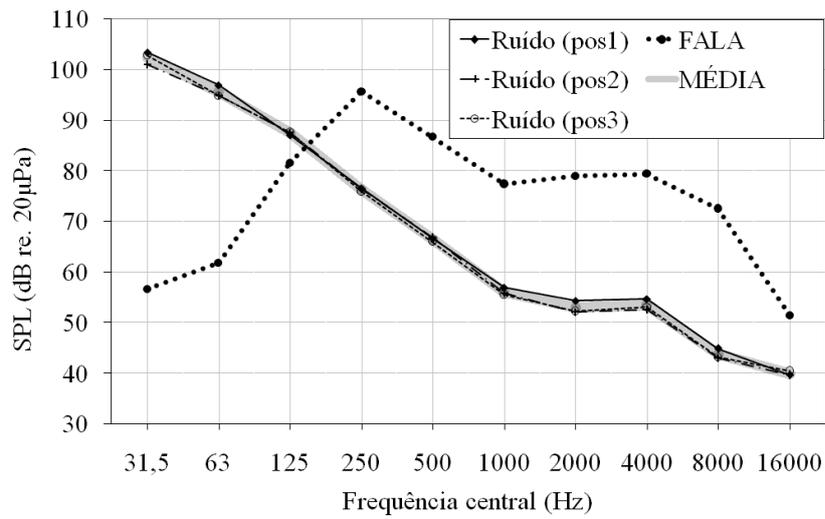
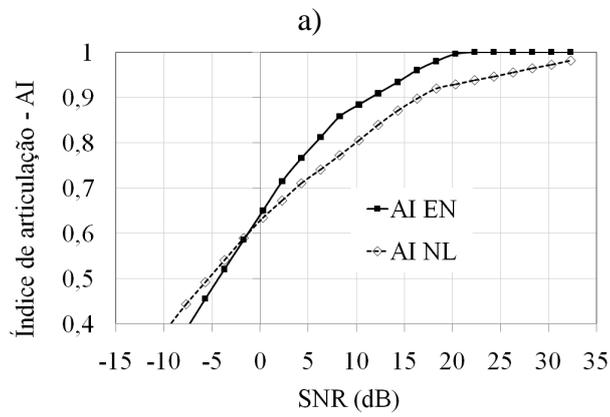
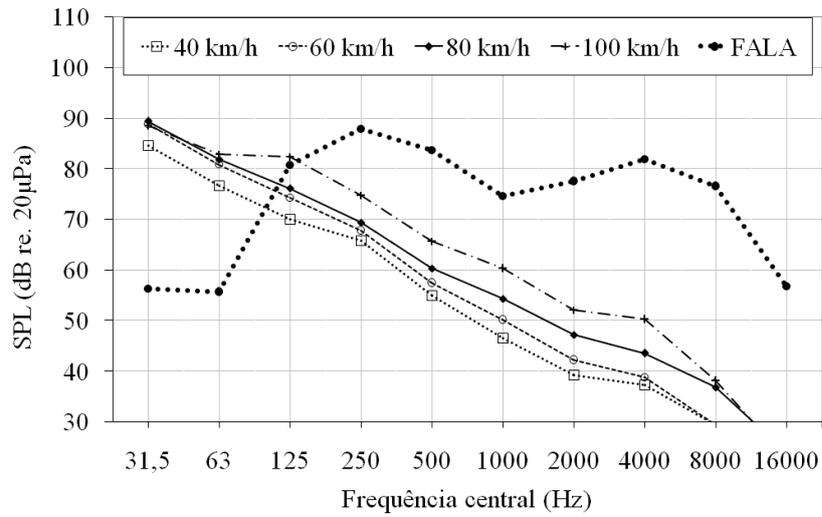


Figura 6.13: Ruídos captados com o veículo A a 40 km/h (calçamento): a) espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR.



b)

Figura 6.14: Ruídos captados com o veículo B no pavimento asfáltico: a) espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR a 100 km/h.

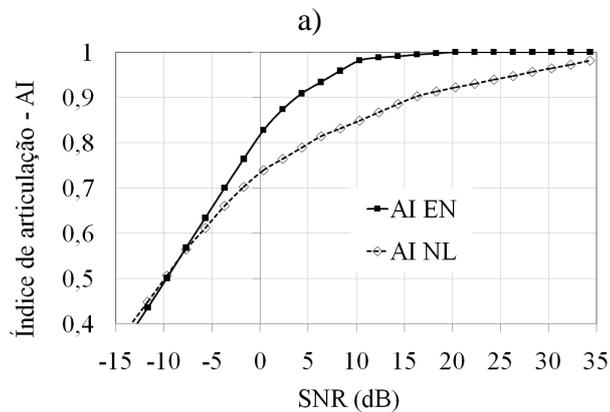
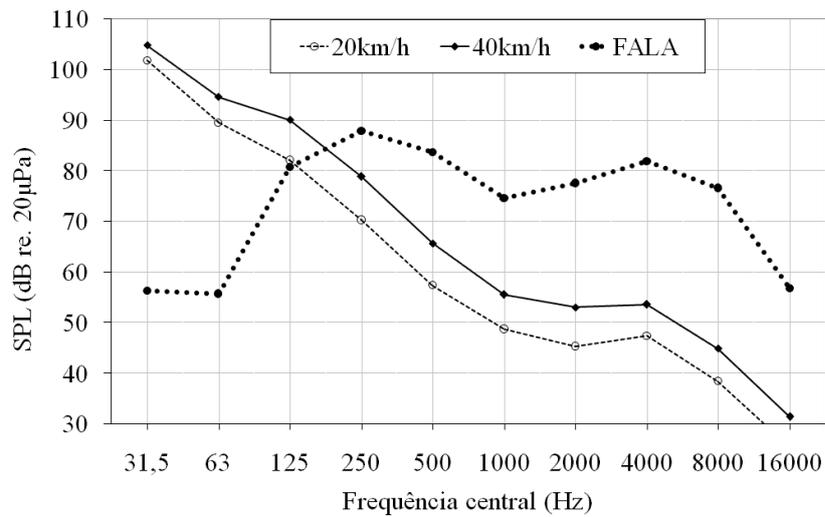


Figura 6.15: Ruídos captados com o veículo B no calçamento poliédrico: a) espectro em bandas de oitava, b) índice de articulação em função da SNR a 40 km/h.

Todos os ruídos de deslocamento apresentaram uma concentração de energia acústica nas baixas frequências (igual ou menor que 125 Hz). Acima de 2000 Hz, por outro lado, a energia é mínima, bem próxima ao ruído de fundo da medição. Assim, o índice de articulação é determinado, principalmente, pela razão sinal ruído nas bandas de frequências médias (250 Hz, 500 Hz e 1kHz).

Os ruídos relativos ao deslocamento em calçamento poliédrico causam o maior desconforto acústico aos usuários, graças às altos níveis de NPS nas bandas de frequências graves que são

produzidos [39]. No veículo B, por exemplo, o nível de pressão sonora da banda de 31,5 Hz alcança 105 dB re. 20  $\mu$ Pa (Figura 6.15). Contudo, é interessante notar que os AIs em função da SNR são menores nos casos do deslocamento em pavimento asfáltico, que apresentam maior quantidade de energia acústica nas bandas de frequências médias.

O pior resultado foi referente ao ruído de deslocamento em pavimento asfáltico com velocidade igual a 100 km/h no veículo A (Figura 6.12), tanto com relação à taxa de variação do AI em função do SNR, quanto em relação ao valor de AI quando a SNR é igual a zero.

Os resultados das medições dos ruídos de deslocamento no veículo A com o HATS em três posições diferentes (Figura 6.12 e Figura 6.13) mostraram que o campo acústico no interior do veículo é razoavelmente uniforme nos pontos medidos. Na maioria dos casos as variações entre as três posições não ultrapassou 3 dB. O cálculo do AI levou em consideração os valores médios entre as três posições de captação, para cada banda de oitava.

Com relação às diferenças de resultados entre os dois idiomas, inglês e holandês, nota-se em todos os casos que o AI EN entra em saturação antes do AI NL, à medida que a SNR cresce. Também a inclinação, ou taxa de variação, nas seções lineares das curvas de AI versus SNR é menor nos cálculos realizados para a língua holandesa.

#### 6.5.4 Medições com o veículo estático

Somente no veículo B foram executadas captações de ruído dentro da câmara fonoisolada com o veículo estático. São elas: a) ruído do ventilador de climatização com apenas a saída de ar do console frontal aberta (saída A); b) ruído do ventilador de climatização com apenas a saída de ar do pára-brisa aberta (saída B); c) ruído do motor de combustão interna com velocidade angular igual a 3000 rpm e com a transmissão desconectada (ponto neutro).

A Figura 6.16 apresenta os espectros de frequências em bandas de oitavas dos três tipos de ruídos medidos. Na Figura 6.17 são mostradas as três curvas do AI em função do SNR. Diferentemente dos resultados das medições dos ruídos de deslocamento, nos casos mostrados não há predominância de energia acústica em baixas frequências.

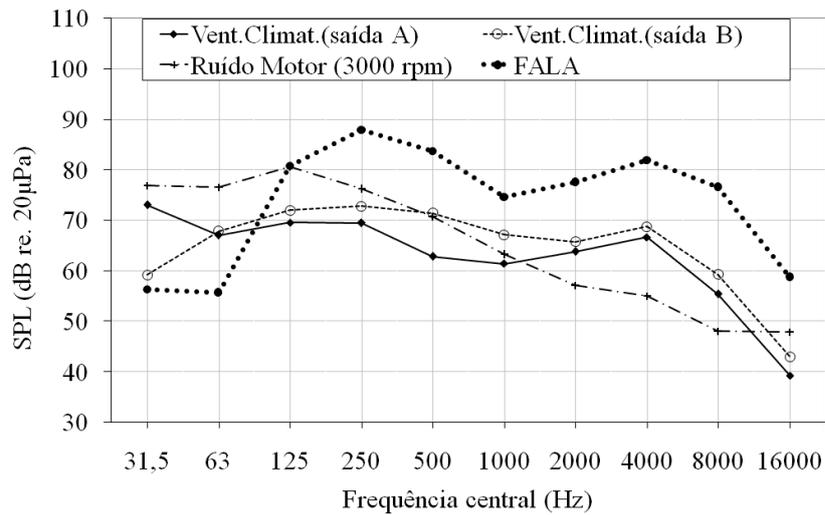


Figura 6.16: Espectro em bandas de oitava dos ruídos captados com o veículo B em condição estática.

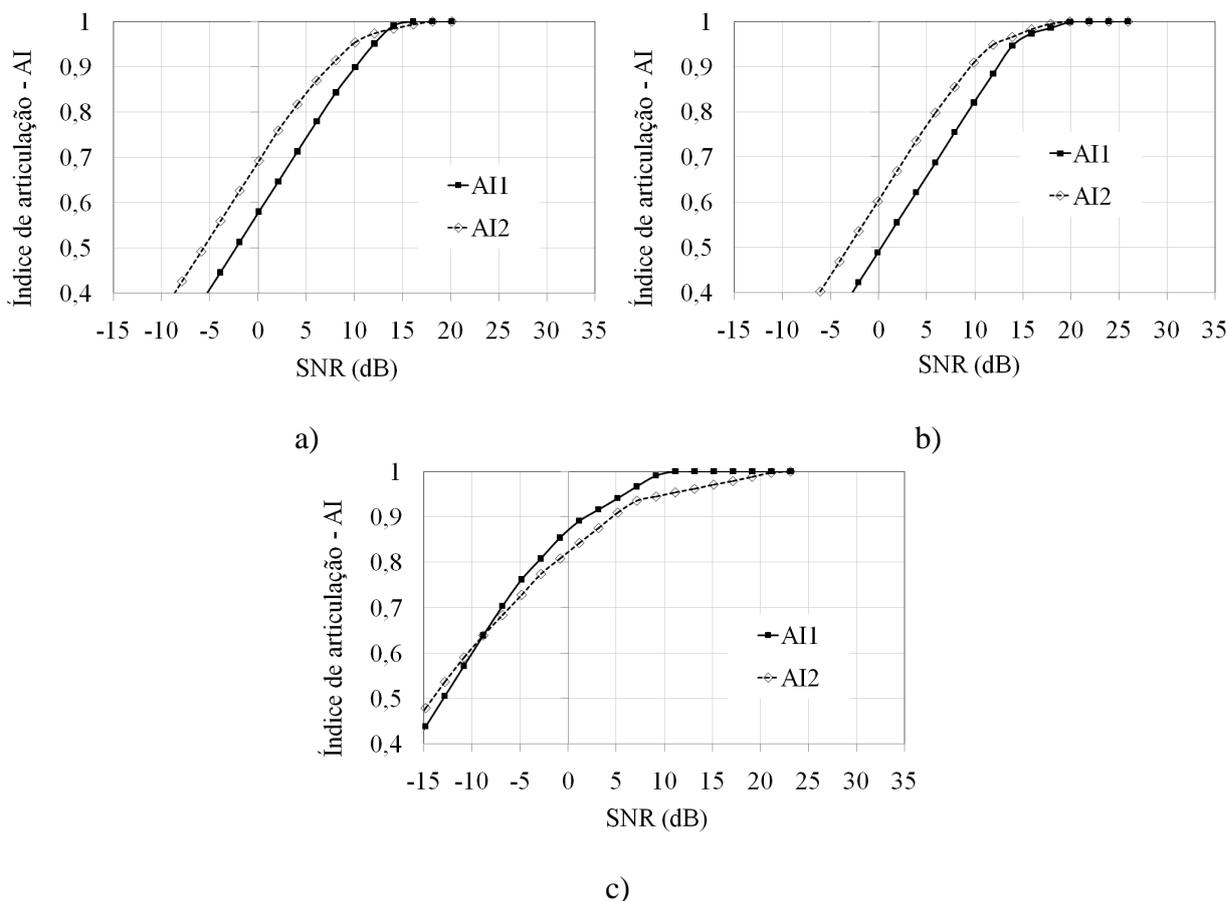


Figura 6.17: Índice de articulação em função da SNR para o veículo B em ensaio estático: a) ruído do ventilador saída A; b) ruído do ventilador saída B; c) ruído do motor a 3000 rpm.

Os melhores resultados para o AI são referentes ao ruído do motor a 3000 rpm (Figura 6.17c). Nesse caso, o valor do AI calculado figura entre 0,8 e 0,9, quando a SNR é igual a zero. Por outro lado, o ruído produzido pelo ventilador de climatização, em ambas as saídas de ar medidas, apresenta consideráveis níveis de pressão sonora nas bandas de frequências médias, entre 500 Hz e 4000 Hz. Isso leva a um valor de AI menor que 0,5 quando a SNR é igual a zero, no caso da saída de ar B, para o idioma inglês (Figura 6.17b).

É interessante notar que, ainda no caso do ruído do ventilador, o índice de articulação apresenta resultados menores para a língua inglesa do que para a língua holandesa, ao contrário de todos os outros ruídos analisados (dinâmicos e estáticos).

### 6.5.5 Equalização

O sinal de fala reproduzido pelo sistema de sonorização veicular pode ter as suas características espectrais propositalmente alteradas através de equalização (filtragem) para que seja alcançada uma melhoria na inteligibilidade. A fim de ilustrar o impacto de uma ação dessas, o índice de articulação foi novamente calculado após os sinais de fala serem equalizados pelo filtro cuja magnitude da resposta em frequência é mostrada na Figura 6.18.

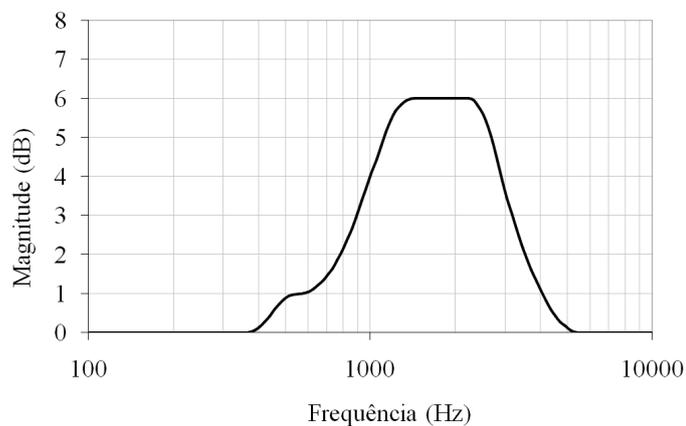


Figura 6.18: Curva da equalização aplicada aos sinais de fala.

O ganho concentrado nas frequências entre 1,3 kHz e 2,4 kHz foi escolhido de acordo com os índices de ponderação  $W(k)$  para a língua inglesa que, nessa faixa de frequências, apresentam maior contribuição para a inteligibilidade. Entretanto, o ganho foi limitado a 6 dB para que não ocorresse a saturação do sistema de áudio veicular, nem tampouco uma adulteração excessiva do equilíbrio tonal percebido. O aumento no NPS total dos sinais de fala (masculina e feminina) ficou menor que 0,5 dB com essa equalização. A Figura 6.19 e a Figura 6.20 mostram os espectros em bandas de oitavas dos sinais de fala equalizados.

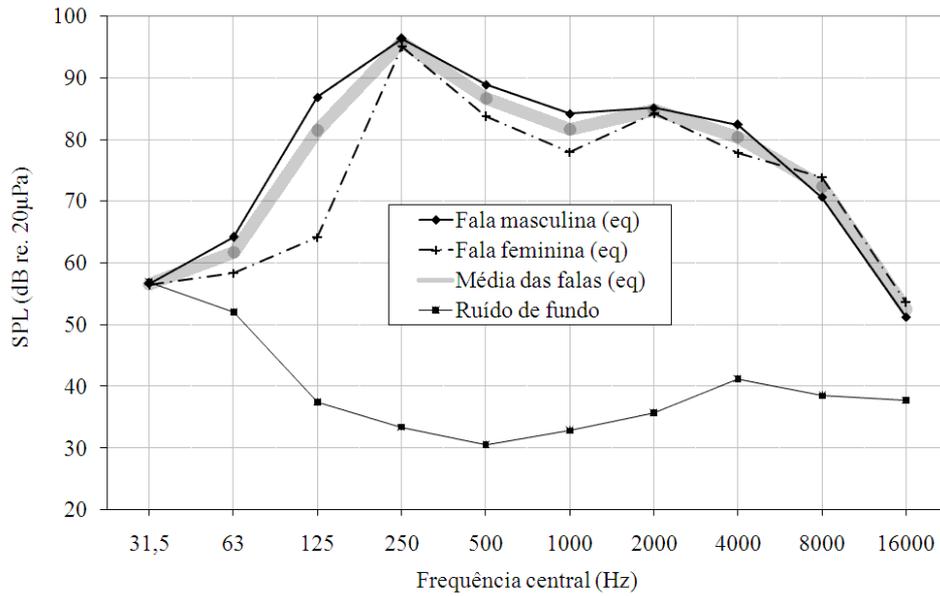


Figura 6.19: Espectro em bandas de oitavas dos sinais de fala do veículo A equalizados.

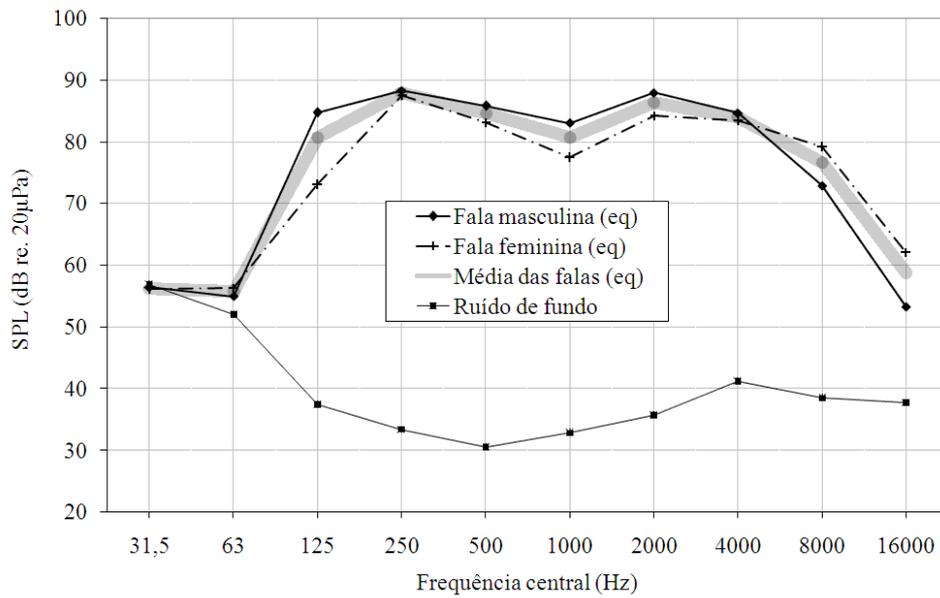


Figura 6.20: Espectro de oitavas dos sinais de fala do veículo B equalizados.

O índice de articulação foi recalculado a partir dos sinais de fala filtrados para os seguintes casos, mostrados na Figura 6.21: a) veículo B a 40 km/h em calçamento poliédrico; b) veículo B a 100 km/h no asfalto; c) veículo B, ventilador de climatização, saída B; d) veículo A a 100 km/h

no asfalto.

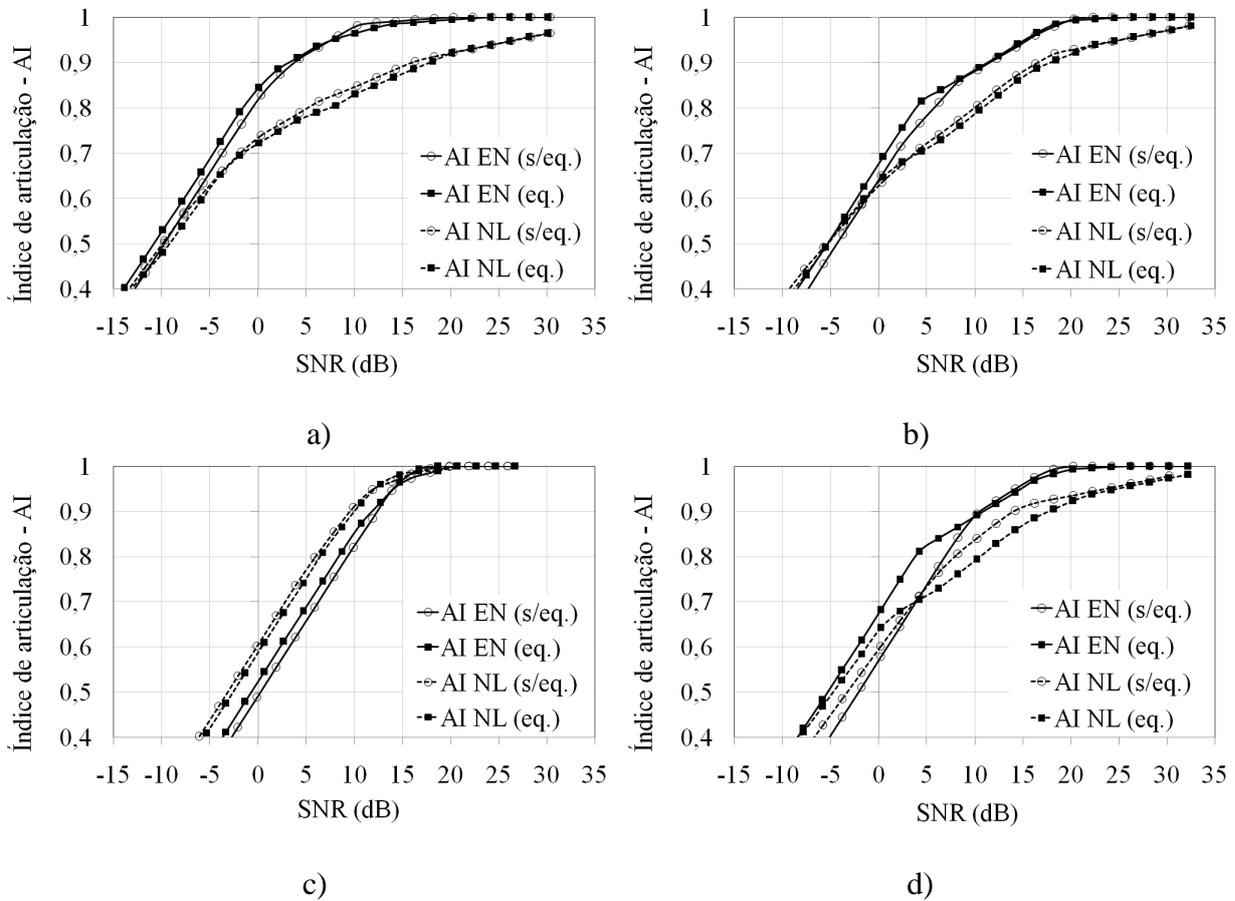


Figura 6.21: Índice de articulação com e sem equalização do sinal de fala: a) veículo B a 40 km/h em calçamento poliédrico; b) veículo B a 100 km/h no asfalto; c) veículo B, ventilador de climatização, saída B; d) veículo A a 100 km/h no asfalto.

O AI para o idioma inglês melhorou em praticamente todos os casos, o que era esperado, já que a curva de equalização foi assim concebida. A melhoria mais significativa pode ser vista no último caso (Figura 6.21d), no qual o AI, para SNR igual a zero, passou de 0,59 para 0,69. Essa melhoria significa que o ganho total do sistema de áudio pode ser diminuído em 3 dB, aproximadamente, sem que haja perda na inteligibilidade. Para o idioma holandês, contudo, a equalização levou a uma diminuição no AI na maioria dos casos.

## 6.6 Conclusões do capítulo

A inteligibilidade dentro de um veículo durante uma comunicação através da fala é uma figura de mérito que tem impacto sobre o consumo e a eficiência energética de sistemas de sonorização veicular. Assim, é importante conhecer os fatores que contribuem para a inteligibilidade nas aplicações automotivas, para que sejam propostas ações que visem tanto maximizar a inteligibilidade, quanto a minimizar o consumo e maximizar a eficiência.

A partir da análise das condições acústicas decorrentes da utilização de um automóvel é possível concluir que a inteligibilidade depende, principalmente, o NPS dos diversos ruídos que interferem na comunicação, pois dentro do automóvel a reverberação é muito baixa.

A medição do nível de pressão sonora de ruídos interferentes em dois veículos diferentes possibilitou identificar aqueles que têm maior impacto na deterioração do índice de articulação (AI). Dentre os ruídos relacionados ao deslocamento do veículo, a captação feita com o veículo a 100 km/h em pavimento asfáltico resultou nos menores AI, apesar de o ruído produzido no deslocamento em calçamento poliédrico causar o maior desconforto aos usuários. Por outro lado, o ruído do ventilador de climatização, medido com o veículo estático, mostrou exercer o maior impacto na inteligibilidade dentro do automóvel.

Uma vez que há pouca margem para melhoria do isolamento acústico de um veículo de baixo custo, uma solução conveniente ao alcance do projetista do sistema de áudio automotivo é a aplicação de uma equalização ao sinal de fala, normalmente implementada pelo autorrádio. Os exemplos mostraram que a equalização pode levar a melhoria no índice de articulação, porém para cada tipo de ruído o AI responde de forma diferente à equalização. Além disso, uma curva de equalização pode representar melhoria no AI para um determinado idioma, mas não para

outros idiomas. Isso mostra a importância em se utilizar os parâmetros de ponderação  $W(k)$  referentes ao idioma a ser praticado pelos usuários do automóvel.

# Capítulo 7

## Projeto de um transdutor eletroacústico ativo de alta eficiência

### 7.1 Introdução

A arquitetura mais comumente encontrada para reforço sonoro em diversas aplicações consiste em implementar separadamente o amplificador de potência e o alto-falante, como dois componentes distintos. Uma desvantagem evidente é a necessidade de utilizar um cabeamento (que pode ser longo) para a transmissão da potência entre estes dois componentes. Nos sistemas automotivos esse cabeamento efetivamente agrega custo ao sistema, além de introduzir perdas no sinal.

Outra limitação encontrada ao separar o amplificador do alto-falante é a obrigatoriedade de ter a impedância nominal do alto-falante fixada em determinados valores (por exemplo:  $4 \Omega$  em sistemas automotivos) para que possa ser compatível com os amplificadores de potência. Tal fato, nos sistemas automotivos, limita a potência máxima para o qual o amplificador pode ser

especificado, pois a tensão de alimentação nominal do barramento é igual a 13,5 V. Num amplificador ideal acionando uma carga com impedância nominal igual a 4  $\Omega$ , a potência máxima de saída sem distorção é igual a 22,8 W na configuração ponte completa (BTL), conforme discutido no Capítulo 2. Assim, dependendo da eficiência da transdução eletroacústica realizada pelo alto-falante, a pressão sonora no ponto receptor pode não ser suficiente, o que muitas vezes conduz à especificação de amplificadores de potência adicionais ao sistema de som (*boosters*).

Uma abordagem mais eficiente é baseada no conceito de transdutores eletroacústicos ativos, ou seja, o amplificador integrado ao alto-falante [39]. Em sistemas automotivos essa solução se mostra vantajosa, embora utilizada apenas em alguns modelos de caixas acústicas para frequências subgraves (*subwoofer boxes*). Uma das vantagens é a possibilidade de especificar os alto-falantes com impedância nominal menor, para que o amplificador possa entregar maior potência a partir da mesma tensão de alimentação. Além disso, o transdutor ativo pode ser otimizado para operar numa banda específica de frequências, aumentando a sua eficiência.

Neste capítulo são discutidos os requisitos e as tecnologias adotadas na concepção de um protótipo de transdutor ativo para aplicação automotiva. O projeto foi denominado CDAA (*Class D Automotive Amplifier*) – amplificador automotivo classe D, e os resultados dos testes de validação realizados em bancada e em veículo comprovam a redução no consumo e o aumento da eficiência que podem ser conseguidos com o conceito proposto.

## 7.2 Proposta de nova arquitetura

Na Figura 7.1 é apresentada a ilustração da arquitetura proposta para o sistema de sonorização automotivo que incorpora o transdutor eletroacústico ativo em sua concepção. Uma

primeira diferença com relação à Figura 2.2 é a ausência dos cabos entre o autorrádio e os quatro alto-falantes. Esses cabos representam um custo significativo ao sistema de áudio, pois a potência a ser transmitida demanda cabos com seção transversal nominal igual a  $1,5 \text{ mm}^2$ . Assim, com a adoção do transdutor ativo, é esperada uma redução no custo global do sistema de áudio devido à redução do diâmetro dos cabos e do número e tamanho dos conectores, pois o sinal de áudio pode ser transmitido ao transdutor ativo por meio de algum protocolo de comunicação digital sem fios como, por exemplo, a WLAN [41], ou através de um cabeamento do tipo par trançado de baixo custo sobre um protocolo digital como, por exemplo, o novo A<sup>2</sup>B Bus do fabricante Analog Devices [42], ou o mais antigo protocolo MOST [43].

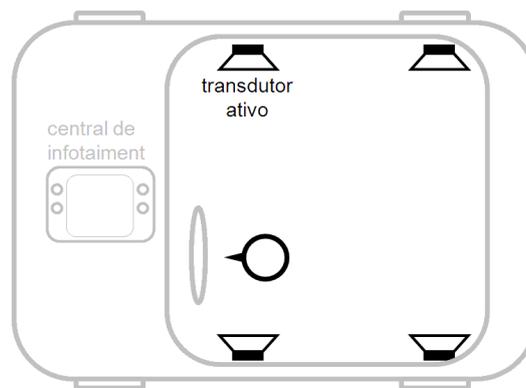


Figura 7.1: Nova arquitetura proposta para o sistema de sonorização automotivo.

Outro impacto importante mostrado na Figura 7.1 é a eliminação do próprio autorrádio do sistema de sonorização. Como foi discutido antes, todas as funcionalidades implementadas pelo autorrádio (exceto a amplificação em potência) podem ser executadas por componentes de *software*. Assim, de acordo com a proposta do transdutor ativo, na qual o amplificador é integrado ao alto-falante, o *hardware* do autorrádio pode ser dispensado e as suas funcionalidades de áudio incorporadas em outra futura central eletrônica de processamento (central de *infotainment*), que reúne outros serviços ligados a conforto, informação e

entretenimento. Como não faz parte do sistema de sonorização, a central de *infotainment* aparece na Figura 7.1 com o traço em cor mais clara.

Dessa forma, a nova arquitetura proposta reduz o sistema de sonorização automotiva aos quatro transdutores ativos. Para implementá-la e submetê-la a uma validação é necessário desenvolver um protótipo de transdutor ativo para a aplicação automotiva. O restante deste capítulo será dedicado a reportar o desenvolvimento do conceito do transdutor ativo, o estudo das tecnologias adotadas, a execução do projeto e os resultados dos testes de validação, visando a uma comprovação sobre o potencial de melhorias em que a nova proposta se sustenta. Antes, porém, é apresentado mais um argumento a favor da proposta, e que parte de uma nova visão sobre a arquitetura do sistema elétrico de potência automotivo, do qual o sistema de áudio faz parte.

### 7.2.1 Novo conceito de SEP Automotivo

A nova arquitetura proposta para o sistema de áudio vem ao encontro do conceito de sistema elétrico de potência automotivo proposto por Kassakian [1], mostrado na Figura 7.2. Nele, um barramento de energia e outro de dados percorrem todo o veículo, provendo alimentação e intercomunicação a todos os componentes eletro-eletrônicos embarcados. Uma vantagem é que estes componentes, instalados em diversos locais do veículo, podem ser conectados aos barramentos de alimentação e dados através de cabos curtos.

A fim de controlar o acionamento da carga, cada componente incorpora um conversor estático de energia, que condiciona a potência e a entrega à sua carga da forma mais adequada às suas demandas, coordenando também a sua proteção. Com isso, abre-se a possibilidade de se fixar o potencial do próprio barramento em outros valores diferentes dos 13,5 V, ou mesmo partir para um SEP em corrente alternada.

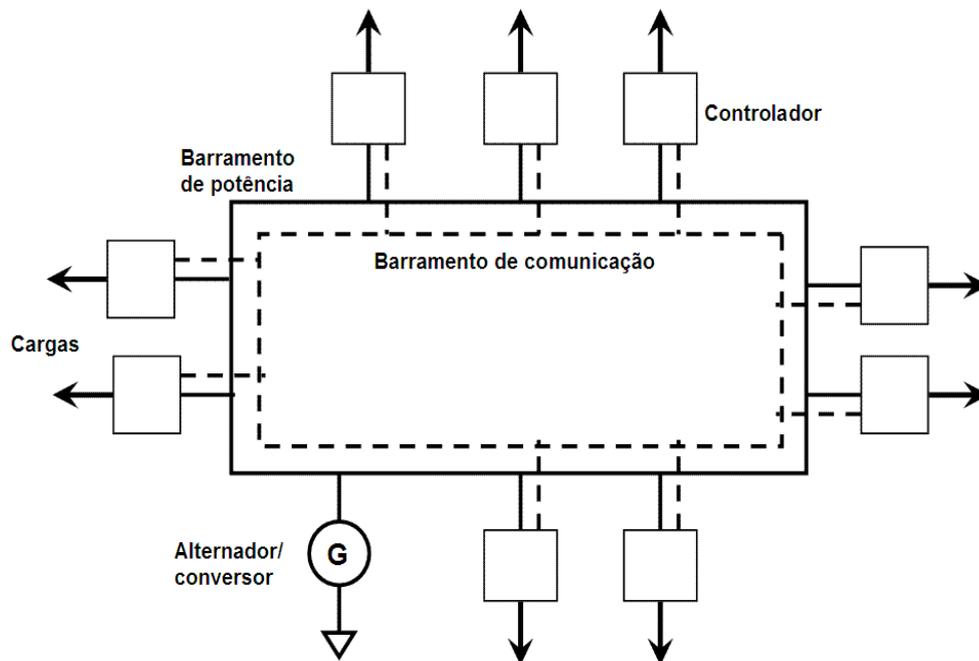


Figura 7.2: Arquitetura elétrica automotiva de alta eficiência. (adaptado de [1])

No caso do sistema de sonorização veicular, os sinais digitais de áudio trafegam pelo barramento de dados até cada um dos transdutores ativos. A alimentação é feita localmente, pois o barramento de potência percorre todo o veículo. O controlador converte o nível de tensão do barramento para um nível adequado ao transdutor ativo, de acordo com a potência requerida pelo amplificador, e também alimenta os circuitos de condicionamento e processamento de sinais.

Além da possibilidade de redução de custos, e da sua compatibilidade com o novo conceito de SEP automotivo, a aplicação do conceito de transdutor ativo em sistemas de áudio veicular ainda abre alternativas para a utilização de novas tecnologias, inviáveis na atual arquitetura, com melhorias significativas no consumo e na eficiência dos circuitos de amplificação em potência dos sinais de áudio. Trata-se dos amplificadores classe D que, em substituição aos amplificadores classe AB, ainda podem contribuir na redução de custos do sistema de áudio, como será mostrado nas próximas seções.

### 7.3 O transdutor eletroacústico ativo para aplicação automotiva

Todo componente eletro-eletrônico automotivo deve buscar executar a sua função da forma mais eficiente possível. Nessa visão, os seguintes pontos devem ser minimizados: a) o consumo energético, b) a dissipação de potência, c) o volume físico ocupado, d) o peso, e) o comprimento e o diâmetro dos cabos e o número e tamanho de conectores elétricos, entre outros. O transdutor ativo proposto nesta tese de doutorado tem essa motivação, que é fundamentada em dois principais conceitos.

O primeiro conceito refere-se à utilização de amplificadores de potência da classe D, pois apresentam maior eficiência energética que a classe AB, que atualmente é a mais utilizada. Porém, a sua aplicação em sistemas automotivos ainda é limitada devido aos problemas com compatibilidade eletromagnética que podem surgir.

O segundo conceito é a eliminação de conversores digital-analógicos (DAC) da cadeia do áudio e a consequente redução no custo do sistema. Atualmente todas as possíveis fontes de áudio para um sistema de sonorização veicular são representadas digitalmente e o ideal seria entregar esse sinal digital diretamente ao amplificador de potência. Porém, isso não é possível com os amplificadores classe AB, pois são genuinamente analógicos e demandam um DAC para cada canal de áudio. Porém, com a classe D, é possível modular o sinal de áudio no domínio digital e realizar a amplificação a partir do sinal digital modulado.

A seguir, é apresentado o princípio de funcionamento dos amplificadores classe D, juntamente com uma comparação entre as classes D e AB feita a partir de figuras de desempenho retiradas das folhas de dados de dois modelos comerciais para aplicação automotiva. Em seguida, é discutida uma arquitetura para o transdutor ativo destinado a implementar os dois

conceitos tecnológicos propostos.

### 7.3.1 O amplificador classe D

Uma técnica para minimizar as perdas por condução em conversores estáticos de energia elétrica consiste em operar as chaves semicondutoras apenas nos estados de saturação, onde a resistência entre os terminais é pequena (da ordem de poucos miliohms), e no estado de corte, onde não há dissipação de potência. No caso de conversores para sinais de áudio, o amplificador aplica pulsos de tensão em alta frequência no alto-falante com a amplitude da fonte de alimentação. Esses pulsos são modulados pelo sinal de áudio (de baixa frequência) que é então reconstruído após passar por um filtro passa-baixas. Esse é o princípio de funcionamento dos amplificadores classe D, cujo circuito simplificado é mostrado na Figura 7.3. Existem diversas técnicas de modulação propostas na literatura, porém a mais comumente utilizada é a modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*). De fato, os amplificadores classe D têm sido muito explorados nos últimos anos graças, principalmente, à significativa redução nas perdas que pode ser atingida, em comparação à classe AB [3, 42, 43, 44, 45, 46].

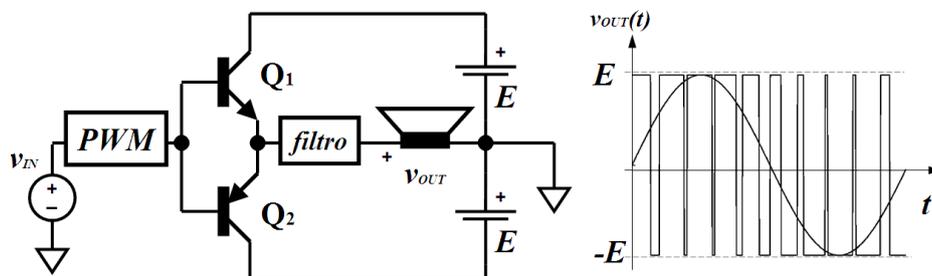


Figura 7.3: Circuito simplificado do amplificador classe D.

A fidelidade do sinal amplificado à saída de um amplificador classe D depende, principalmente, do circuito modulador e do filtro de saída. A qualidade da energia de

alimentação do amplificador também pode comprometer a fidelidade, principalmente quando opera em malha aberta. Há sempre um compromisso entre custo, volume físico, peso, eficiência, complexidade do circuito e a qualidade de áudio no projeto de um amplificador classe D.

### 7.3.2 Consumo e eficiência

Nos amplificadores lineares (classe AB), os circuitos de polarização e acionamento dos transistores de saída consomem potência a uma taxa constante para que a polarização seja mantida estável. Conforme mostrado na Figura 4.1, cada bloco amplificador consome até 25 mA da corrente de entrada do autorrádio. Como são oito blocos presentes, pois são quatro canais, cada canal com dois amplificadores em ponte (BTL), a corrente quiescente total chega a 200 mA, ou 2,7 W. Nos amplificadores chaveados (classe D) os circuitos de acionamento apenas consomem energia durante o chaveamento dos transistores, o que significa uma possível redução no consumo quiescente do amplificador.

Como exemplo, pode ser citado o amplificador classe D Texas Instruments TAS5132. Esse circuito é capaz de fornecer uma potência média de saída igual a 40 W a uma carga de 4  $\Omega$  com uma tensão de alimentação igual a 18 V. Segundo a folha de dados [49], o TAS5132 apresenta um consumo quiescente na sua etapa de potência de apenas 12,6 mA por bloco amplificador, ou seja, quase a metade do LA47202P classe AB [18] visto no Capítulo 2. Porém, o circuito modulador, que não existe na classe AB, também consome uma corrente da mesma ordem de grandeza.

Com relação à eficiência, um parâmetro normalmente fornecido pelos fabricantes de amplificadores integrados é a dissipação de potência ( $P_D$ ) em função da potência de saída ( $P_O$ ). A dissipação de potência pode ser determinada a partir da diferença entre a potência de entrada fornecida pela alimentação ( $V_{CC} \times I_{CC}$ ) e a potência de saída entregue aos alto-falantes. Na

Figura 7.4 é possível comparar as curvas de dissipação de potência de dois amplificadores comerciais automotivos, de acordo com os gráficos retirados das folhas de dados: 1) Sanyo Semiconductor LA47202P, classe AB, e 2) Texas Instruments TAS5424, classe D [50]. No amplificador classe AB, a dissipação é aproximadamente dez vezes maior que a dissipação da classe D, no caso de a potência média de saída ser igual a um watt por canal. Tal diferença tem impacto direto na redução do tamanho, ou mesmo na eliminação, do radiador de calor que normalmente é especificado para dissipar o calor gerado pelo amplificador classe AB. Este radiador ocupa espaço e aumenta o peso e o custo do autorrádio.

Além disso, o calor produzido pelo amplificador classe AB é transportado para outros componentes à sua vizinhança como, por exemplo, os dutos de saída de ar condicionado, ou os cabos elétricos internos ao painel. As montadoras de automóveis normalmente limitam a temperatura máxima que o radiador de calor pode atingir, obrigando os fabricantes de autorrádios a implementar estratégias para o controle da temperatura.

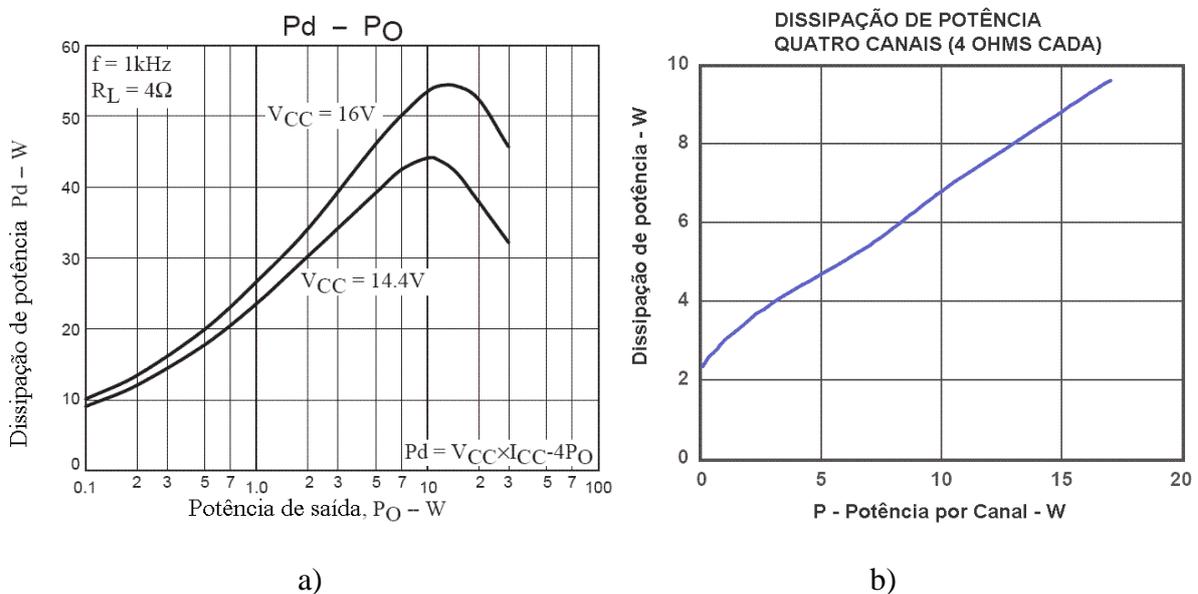


Figura 7.4: Dissipação de potência em função da potência de saída: a) amplificador classe AB em ponte [18]; b) amplificador classe D [50].

### 7.3.3 Qualidade de áudio

Além da comparação com relação ao consumo e à dissipação de potência entre as classes D e AB, é preciso abordar a questão da qualidade de áudio, ou fidelidade, com que os amplificadores operam. A Figura 7.5 mostra os gráficos da THD+ruído em função da potência de saída e também em função da frequência, retirados da folha de dados do amplificador classe D.

No primeiro caso, mostrado na Figura 7.5a, a frequência do sinal de áudio é igual a 1 kHz. Em comparação ao amplificador classe AB mostrado na Figura 2.8a, os valores da THD+ruído comportam-se de maneira similar, ou seja, menores que 0,1 % para todos os valores de potência de saída até o início da saturação, que é identificada por um aumento abrupto deste índice.

No segundo caso (Figura 7.5b), a potência de saída na carga de teste é mantida constante em um watt enquanto a frequência do sinal varia entre 20 Hz e 20 kHz. É possível perceber que a THD+ruído aumenta progressivamente a partir de 500 Hz, aproximadamente, o que não acontece ao amplificador classe AB (Figura 2.8b). Porém, o valor máximo não ultrapassa 0,7 %, o que é maior do que o máximo valor de 0,2 % do amplificador classe AB (em 20 kHz), mas ainda é muito menor do que a distorção de um alto-falante automotivo, que normalmente ultrapassa 10 % na região das baixas frequências. Ainda no mesmo gráfico, acima de 7 kHz os valores de THD+ruído diminuem rapidamente, devido à largura de banda do sistema de medição, que despreza as frequências acima de 20 kHz [51].

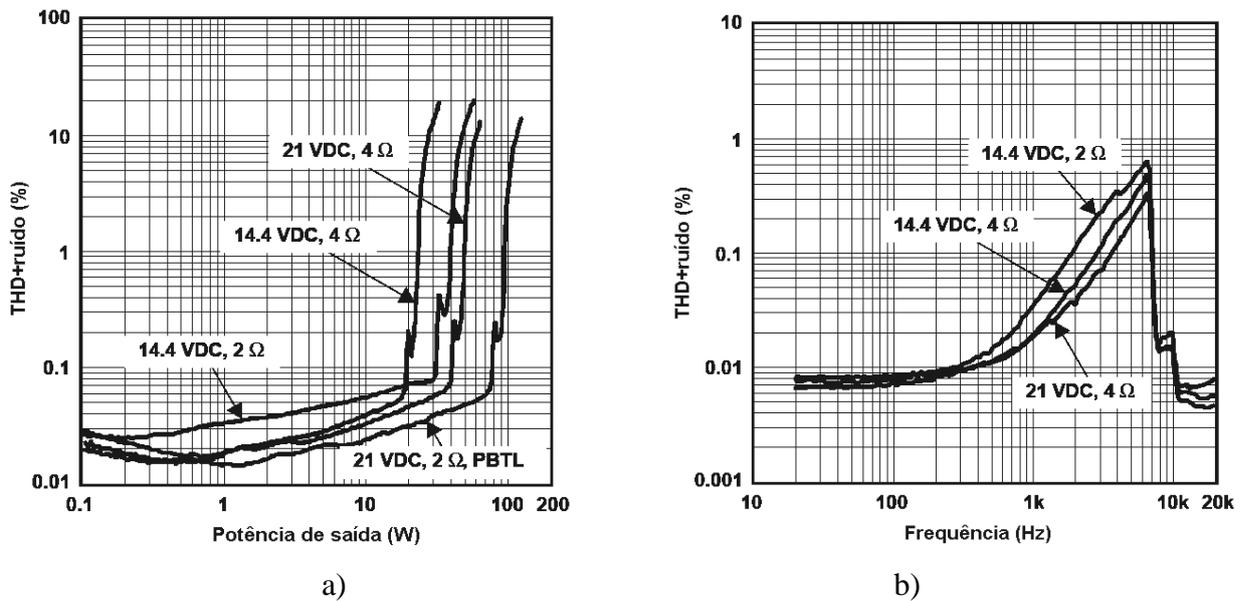


Figura 7.5: Gráficos da distorção harmônica total e ruído em função da a) potência de saída, e b) frequência do amplificador classe D [50].

Devido à sua reduzida dissipação de potência, pode-se concluir que o amplificador classe D abordado apresenta eficiência maior que o amplificador classe AB. Com relação à qualidade de áudio, foi visto que ambos têm comportamentos similares na comparação entre a THD+ruído. Assim, fica evidente o motivo de o amplificador classe D ser aplicado em praticamente todos os sistemas de áudio embarcados, como, por exemplo, em telefones celulares e *notebooks*.

### 7.3.4 Arquitetura de um transdutor ativo

Na Figura 7.6 é apresentado o diagrama de blocos do transdutor ativo, onde é possível identificar o amplificador classe D, o alto-falante, o processador de sinais de áudio digital (DSP – *digital signal processor*) e o bloco denominado *interface* responsável por receber os sinais de áudio transmitidos pela central de *infotainment*. O bloco *interface* e o DSP comunicam-se através do protocolo serial I<sup>2</sup>S (*Integrated Interchip Sound*), e o DSP envia o sinal de áudio modulado DPWM (*Digital PWM*) ao amplificador de potência.

O transdutor é conectado eletricamente ao sistema elétrico automotivo, de onde obtém a alimentação ( $V$  é a tensão e  $I$  é a corrente). A saída do transdutor é um sinal acústico radiado para dentro do habitáculo ( $p$  é a pressão sonora e  $u$  é a velocidade do ar). Na mesma figura também são representadas a impedância elétrica vista pelo amplificador de potência  $Z_{out}$  e a impedância de radiação acústica vista pelo alto-falante  $Z_r$ .

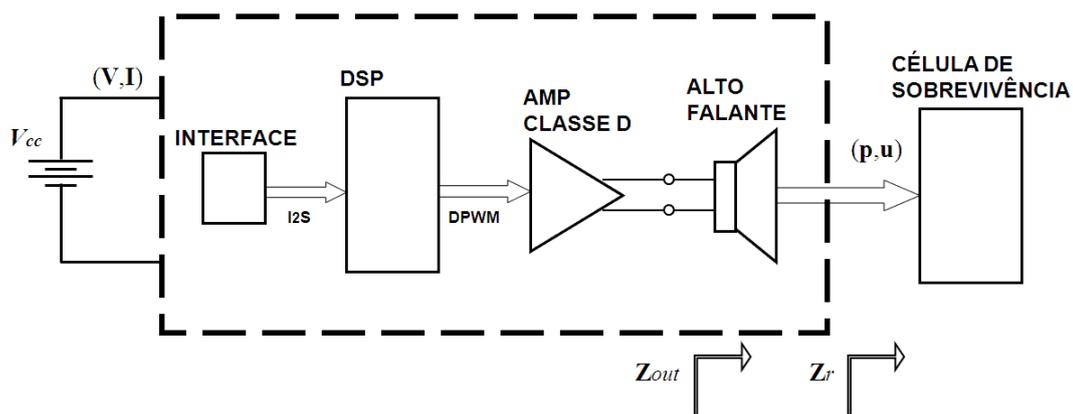


Figura 7.6: Diagrama de blocos do transdutor ativo.

Uma das vantagens da integração é a possibilidade de se escolher a impedância nominal do alto-falante de acordo com a topologia do amplificador e também com o nível da tensão de alimentação. Além disso, o alto-falante pode ser projetado para que a sua impedância complexa atue como parte do filtro de reconstrução necessário na implementação do amplificador classe D [39]. Isso resulta em significativa redução de custo, volume e peso com a eliminação dos capacitores e indutores desse filtro.

Outra vantagem de ter um amplificador dedicado ao alto-falante diz respeito ao dimensionamento da potência e da banda de frequências de atuação do amplificador. No caso da classe D, por exemplo, a frequência de amostragem no modulador digital pode ser menor num transdutor para baixas frequências (*subwoofer*) do que num transdutor de altas frequências

(*tweeter*), o que significa uma redução nas perdas por chaveamento. Ainda na mesma linha, os *tweeters* geralmente são mais eficientes que os *subwoofers* e, portanto, necessitam de um amplificador com menor potência nominal e, conseqüentemente, menores perdas.

Os amplificadores classe D particularmente se beneficiam da integração com o alto-falante nas questões ligadas à compatibilidade eletromagnética (*EMC*) em sistemas automotivos. Os sinais pulsados à saída do amplificador classe D podem interferir em circuitos que operam na faixa de 1 MHz, como por exemplo, um receptor de rádio frequências em amplitude modulada (AM), ou podem ser captados pela antena do veículo. Isso torna complexa a tarefa de implementar um amplificador classe D dentro de um autorrádio convencional. Contudo, num amplificador integrado ao alto-falante os sinais pulsados podem ser confinados dentro do transdutor através de blindagem e/ou filtragem.

## 7.4 Projeto CDAA

A fim de validar o conceito de transdutor ativo proposto nesta tese, foi concebido e executado um projeto de amplificador classe D com entrada de áudio digital para aplicação automotiva, denominado CDAA – *Class D Automotive Amplifier*. O objetivo é comparar o seu desempenho com o amplificador classe AB em ponte completa (BTL), atualmente adotado nos sistemas automotivos.

A Figura 7.7 mostra as conexões entre o CDAA e o automóvel, que são: a) a fonte de sinais de áudio digital, b) o alto-falante, que recebe o sinal amplificado, e c) o barramento de alimentação do veículo.

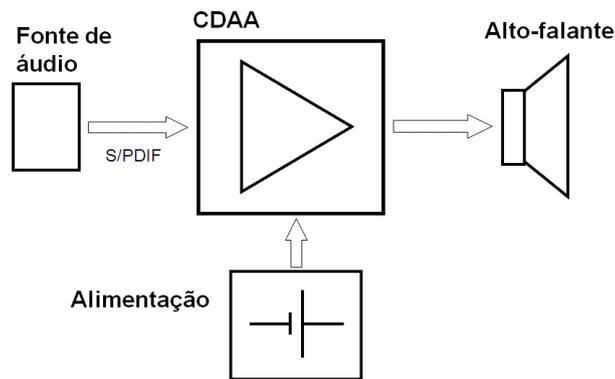


Figura 7.7: Conexões entre o CDAA e outros componentes do automóvel.

A Tabela 7.1 apresenta os principais requisitos de especificação para o projeto CDAA. É interessante notar que a frequência do modulador (384 kHz) é quase vinte vezes maior que a máxima frequência de áudio (20 kHz), o que tem impacto no projeto do filtro de reconstrução e também na qualidade do sinal de áudio à saída do amplificador.

Tabela 7.1: Lista de especificações CDAA implementado

Frequência de modulação	384 kHz
Protocolo de comunicação digital de áudio	S/PDIF
Frequência de amostragem (áudio)	48 kHz
Tamanho da amostra	16 bits
Impedância de saída	4 $\Omega$
Tensão de alimentação	13,5 V
Potência de saída	25 W
Banda passante (-1 dB)	20 a 20000 Hz

Foi escolhido o protocolo de comunicação digital S/PDIF (*Sony Philips Digital Interconnect Format*), pelo qual o sinal de áudio é transmitido serialmente através de um cabo coaxial na

forma elétrica. Este protocolo, que também permite a transmissão dos sinais através de fibra ótica, é largamente utilizado em sistemas de áudio e vídeo domésticos e profissionais. Embora o protocolo S/PDIF possa não ser a solução mais adequada para uma aplicação automotiva, dado o custo do cabo coaxial, ele foi considerado nesta aplicação porque a comunicação digital não é o foco da análise, e trata-se de um protocolo compatível com a instrumentação disponível.

No diagrama da Figura 7.8 aparecem os principais blocos funcionais do CDAA. No mesmo conector principal, de quatro vias, é recebida a potência do sistema elétrico do veículo para alimentar os circuitos eletrônicos e também enviado o sinal de áudio amplificado ao alto-falante.

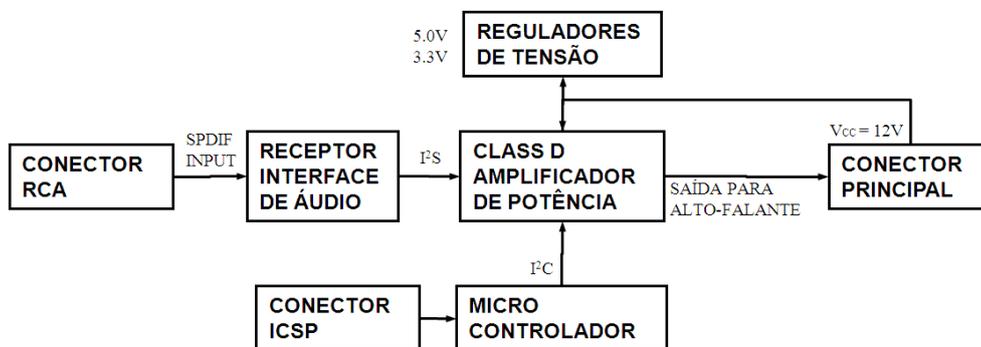


Figura 7.8: Diagrama de blocos do amplificador CDAA.

O conector tipo “RCA” recebe o sinal S/PDIF de áudio digital. O último conector, denominado ICSP, é utilizado apenas para a programação do microcontrolador embarcado no CDAA, e que tem como função configurar os registradores internos do amplificador classe D quando ele é energizado. A comunicação entre o amplificador e o microcontrolador é implementada a partir do protocolo I<sup>2</sup>C serial.

No Apêndice B é apresentado o diagrama esquemático completo do CDAA (Figura B.1 a Figura B.4), juntamente com a lista de materiais (Tabela B.1) e com a placa de circuito impresso desenhada para este projeto (Figura B.5). A Figura 7.9 mostra a fotografia do protótipo

construído para a validação do conceito.

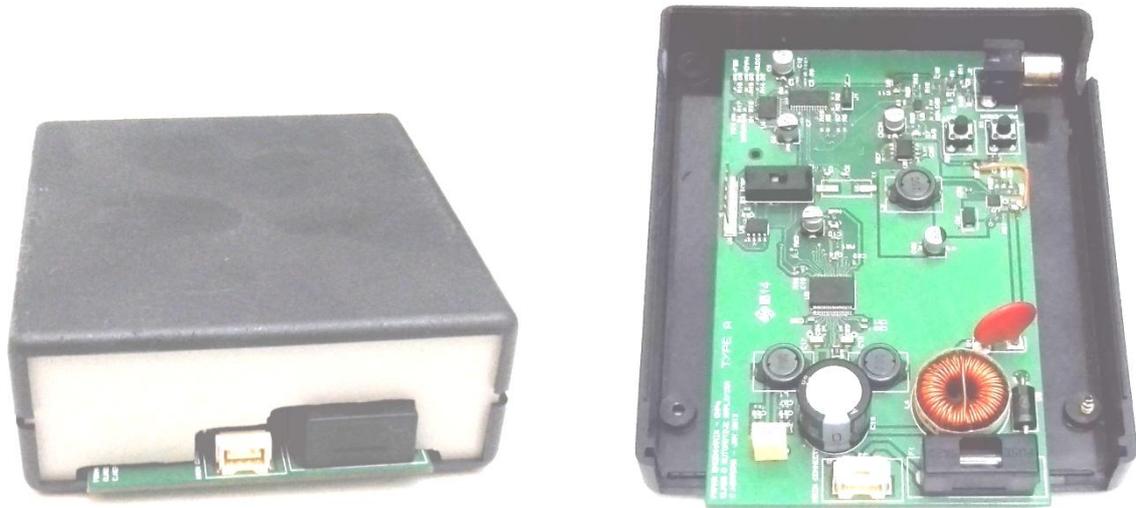


Figura 7.9: Fotografia do protótipo do amplificador CDAA.

## 7.5 Validação e discussão dos resultados

Para validar o projeto do amplificador classe D foram executados ensaios em bancada e em veículo visando avaliar a qualidade de áudio e o consumo energético. O objetivo da validação é comprovar que o CDAA apresenta consumo e perdas de potência menores que os amplificadores classe AB BTL automotivos, e qualidade de áudio comparável dentro das figuras de mérito analisadas.

### 7.5.1 Qualidade de Áudio

Da Figura 7.10 à Figura 7.16 são mostrados resultados da medição do sinal de tensão na saída do amplificador. Essas medições foram feitas em bancada com o sistema de instrumentação virtual descrito na Figura A.6 do Apêndice A.

A Figura 7.10 mostra o espectro da tensão de saída com o amplificador em modo de espera (*powerdown mode*), que é considerado o ruído de fundo da medição. O valor da tensão eficaz medido é menor que  $500\ \mu\text{V}$ . Na mesma figura também aparece o espectro da tensão de saída com um sinal de entrada de amplitude igual a  $-120\ \text{dB FS}$  (*full scale* – fundo de escala) e frequência igual a  $997\ \text{Hz}$ . A tensão eficaz na saída neste caso é igual a  $9,32\ \text{mV}$ , embora a componente de frequência do sinal de entrada não possa ser identificada no espectro devido à sua amplitude. Isso significa um aumento na magnitude do ruído de fundo de quase  $26\ \text{dB}$  causado pela atividade do amplificador.

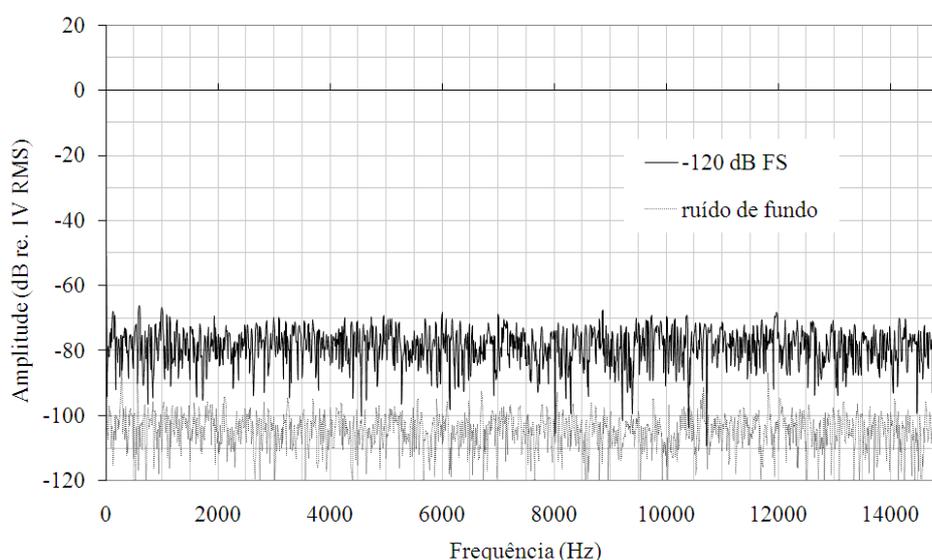


Figura 7.10: Espectro do sinal de tensão de saída do amplificador em modo de espera e com sinal de amplitude de  $-120\ \text{dB FS}$ .

Na Figura 7.11 e na Figura 7.12 são mostrados os espectros dos sinais na saída do amplificador, com sinal de entrada senoidal de amplitude igual a  $-6\ \text{dB FS}$  e  $0\ \text{dB FS}$ , respectivamente. Nessas figuras é possível identificar o componente fundamental de frequência do sinal de entrada ( $997\ \text{Hz}$ ), juntamente com os seus componentes harmônicos introduzidos

pelo amplificador classe D.

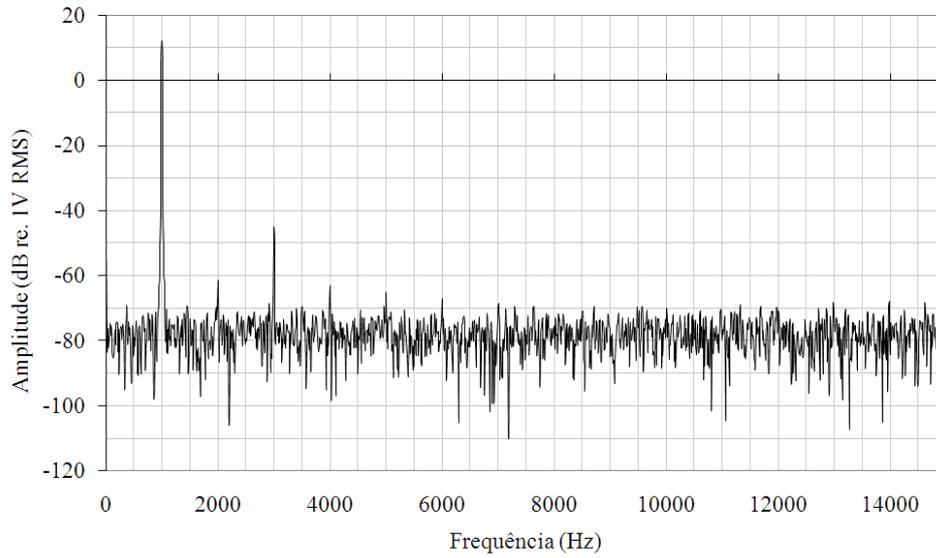


Figura 7.11: Espectro do sinal de tensão de saída do amplificador (-6 dB FS).

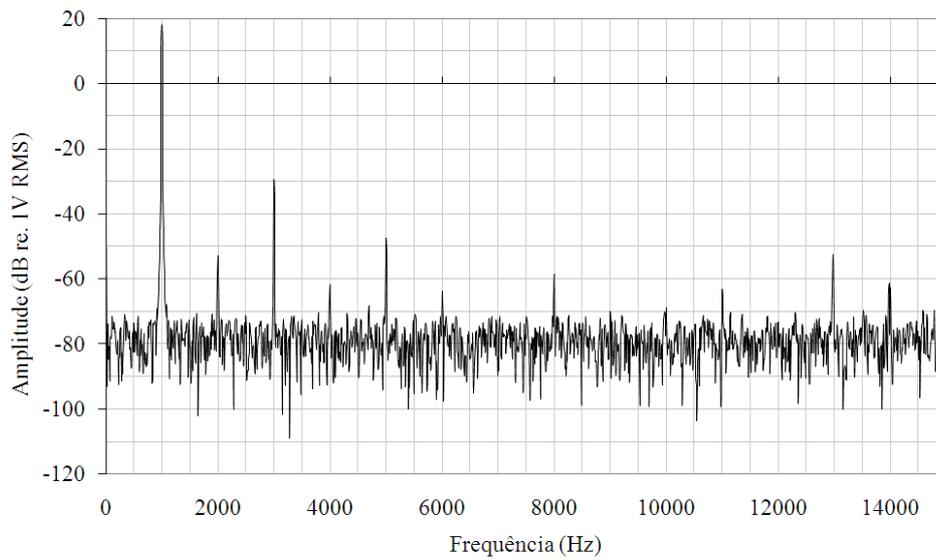


Figura 7.12: Espectro de frequências do sinal de tensão de saída do amplificador (0 dB FS).

A Figura 7.14 e a Figura 7.13 mostram os gráficos da resposta em frequência do amplificador

entre 20 Hz e 20 kHz com sinal de entrada de amplitude igual a 0 dB FS. Foi medida a tensão eficaz do componente fundamental de frequência em 31 valores espaçados de forma logarítmica. A Figura 7.13 mostra também a resposta em frequência referente ao segundo e ao terceiro harmônico, onde é percebida uma maior presença do terceiro harmônico em frequências até 4 kHz, aproximadamente. Ainda assim, a diferença de amplitude entre os harmônicos e a fundamental é, no pior caso, maior que 45 dB.

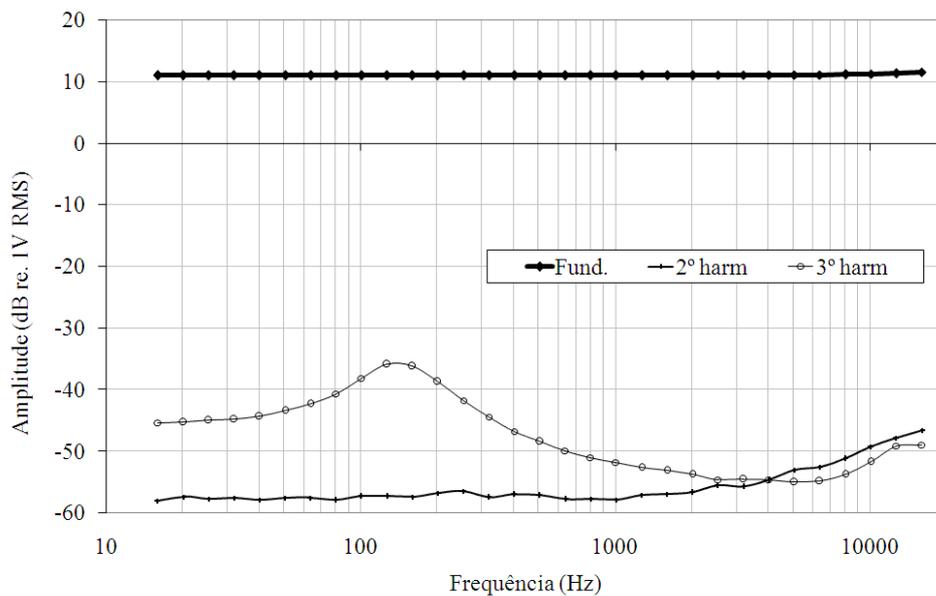


Figura 7.13: Resposta em frequência do amplificador a 0 dB FS (fundamental e harmônicos).

Na Figura 7.14 tem-se uma visão ampliada da resposta em frequência, onde é possível identificar um aumento progressivo na resposta a partir de 1 kHz, que culmina numa diferença de 0,5 dB em 20 kHz.

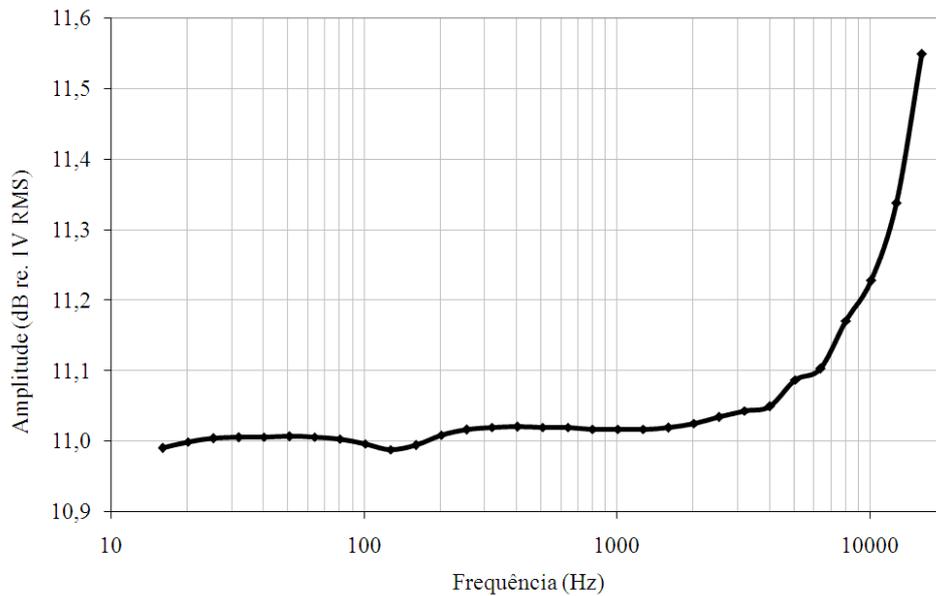


Figura 7.14: Resposta em frequência do amplificador a 0 dB FS (componente fundamental).

Na Figura 7.15 a curva da THD em função da frequência apresenta comportamento muito similar à resposta em frequência do terceiro harmônico mostrado na Figura 7.13. Isso confirma a predominância deste harmônico em relação aos outros considerados no cálculo da THD. Os valores da curva de THD medidos no CDAA não são menores que os valores mostrados na Figura 2.8, referente ao amplificador classe AB. Porém, a diferença é pouco significativa quando se toma como referência a curva de THD medida para os alto-falantes.

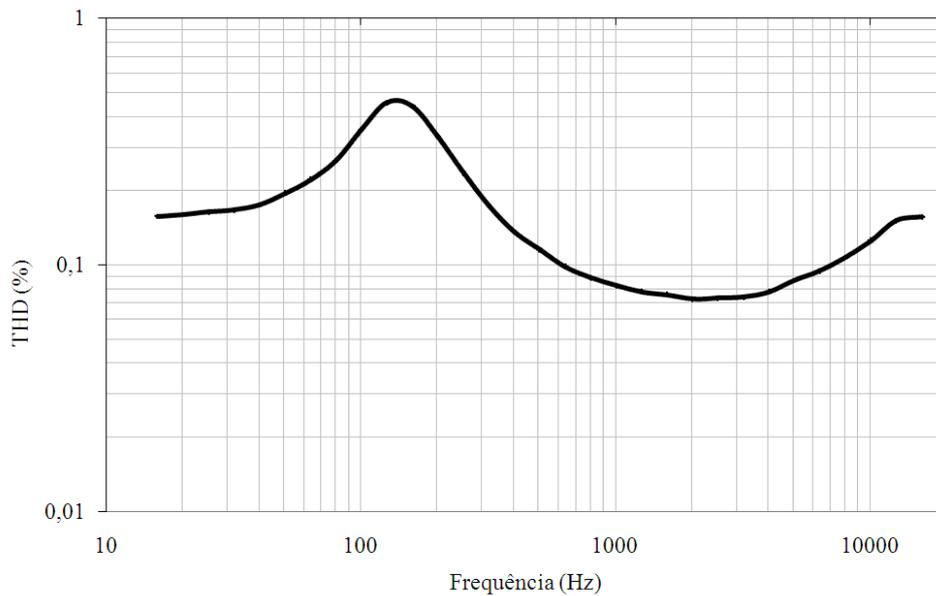


Figura 7.15: Distorção harmônica total em função da frequência.

O gráfico com a curva de THD em função da potência média de saída mostrado na Figura 7.16 revela um padrão coerente com o outro modelo de amplificador classe D analisado anteriormente (Figura 7.5b). A potência máxima medida é igual a 25 W, com carga resistiva de  $4,7 \Omega$  e alimentação igual a 13,5 V. A THD nesse ponto é menor que 0,5 %. O sinal de excitação utilizado é senoidal com frequência igual a 997 Hz.

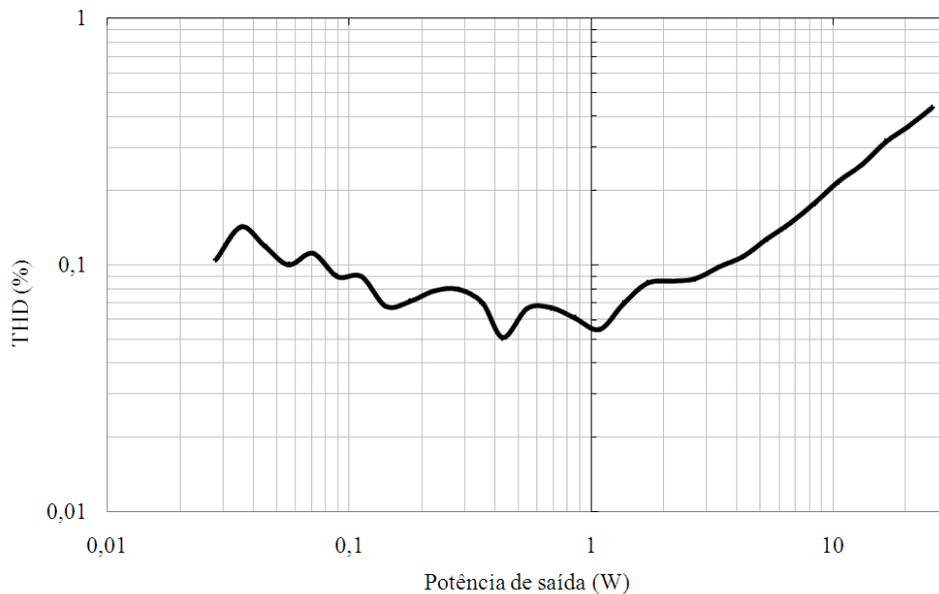


Figura 7.16: Distorção harmônica total (THD) em função da potência de saída.

A Figura 7.17 e a Figura 7.18 mostram os resultados de medições da resposta eletroacústica executadas em veículo, entre 20 Hz e 800 Hz, com sinal de excitação senoidal. Foi utilizado o alto-falante original do sistema de sonorização, e o sinal de pressão sonora é captado a partir de um microfone posicionado no lugar da cabeça do motorista, apontado para frente. O objetivo dessas medições é comparar o desempenho sonoro do transdutor ativo classe D com relação à implementação tradicional, ou seja, o autorrádio com um amplificador classe AB.

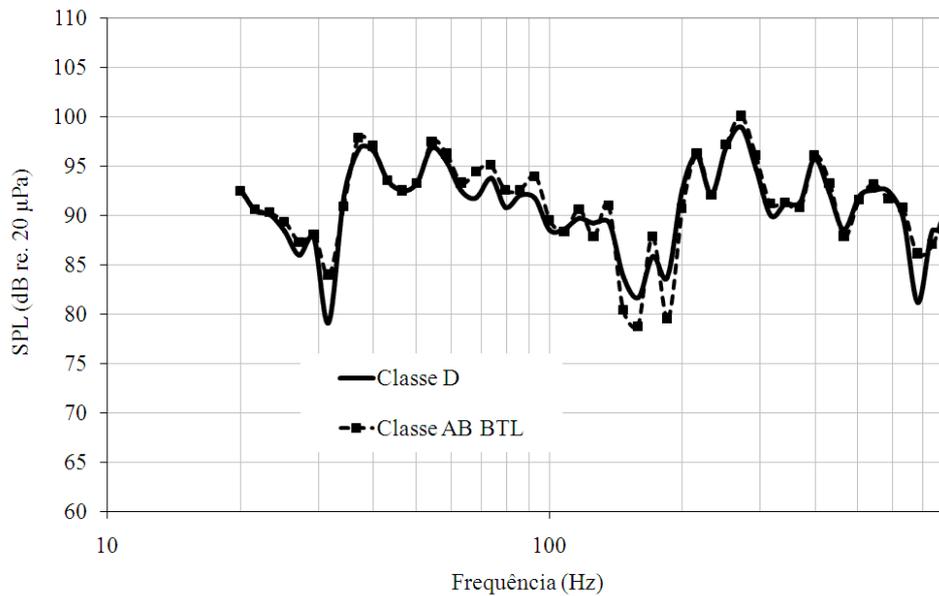


Figura 7.17: Comparação do NPS dentro do veículo (classe D e classe AB).

As curvas de NPS apresentadas na Figura 7.17 não mostram diferenças significativas entre as duas classes de amplificação comparadas. Entre 20 Hz e 800 Hz a diferença de NPS ficou menor que 5 dB. O gráfico da Figura 7.18, que mostra as curvas da THD em função da frequência, também revela um comportamento similar entre os amplificadores. As duas curvas evoluem seguindo a mesma tendência ao longo do eixo das frequências, apesar de pequenas diferenças serem notadas em alguns pontos.

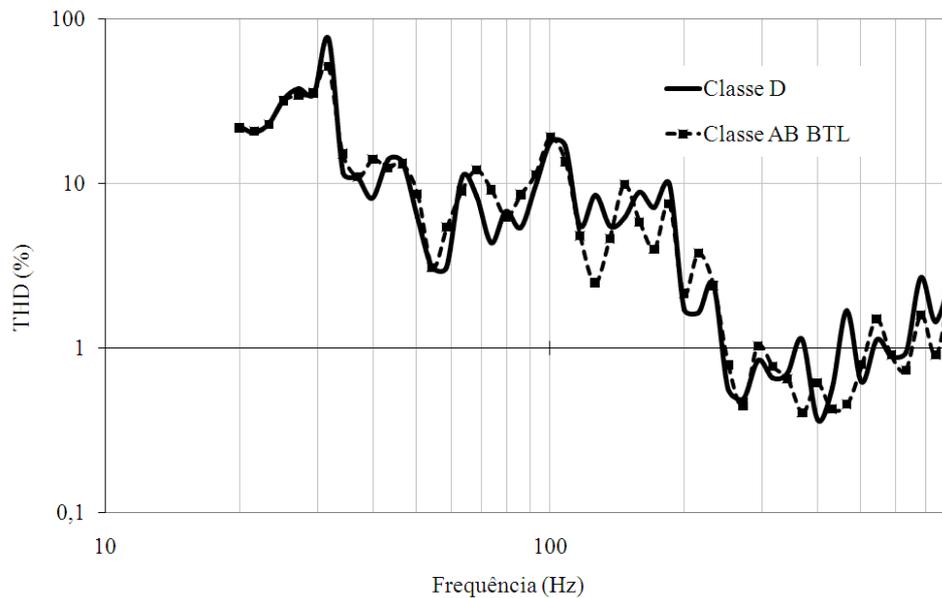


Figura 7.18: THD em função da frequência da resposta eletroacústica (classe D e classe AB).

### 7.5.2 Compatibilidade Eletromagnética

Uma das principais limitações à aplicação do amplificador classe D num automóvel é a produção de distúrbios eletromagnéticos que venham a interferir em outros componentes eletroeletrônicos embarcados. Não figura entre os objetivos deste trabalho a validação completa do transdutor ativo em compatibilidade eletromagnética, que abrange tanto os distúrbios conduzidos quanto os radiados. Porém, a análise do espectro do sinal da corrente de alimentação pode revelar, de forma qualitativa, o potencial do CDAA em causar interferências de forma conduzida pelo sistema elétrico de potência do automóvel.

Como discutido anteriormente, os amplificadores classe D aplicam pulsos de tensão no alto-falante. No CDAA a frequência de modulação é igual a 384 kHz, o que significa que a corrente elétrica consumida pode conter uma componente fundamental nessa frequência, além de seus harmônicos. Em vista disso, o transdutor ativo foi projetado de forma a filtrar este conteúdo espectral e minimizar os possíveis distúrbios na tensão de alimentação.

A Figura 7.19 mostra o circuito da entrada de alimentação do CDAA, onde o elemento de interesse é o indutor de 220  $\mu\text{H}$  (L4), que tem a função de filtrar as altas frequências da corrente de entrada. Os outros elementos mostrados na figura têm função de proteger o transdutor ativo contra sobre-corrente (fusível F1), inversão da polaridade da tensão de alimentação (diodo D8) e surtos de tensão (varistor V1).

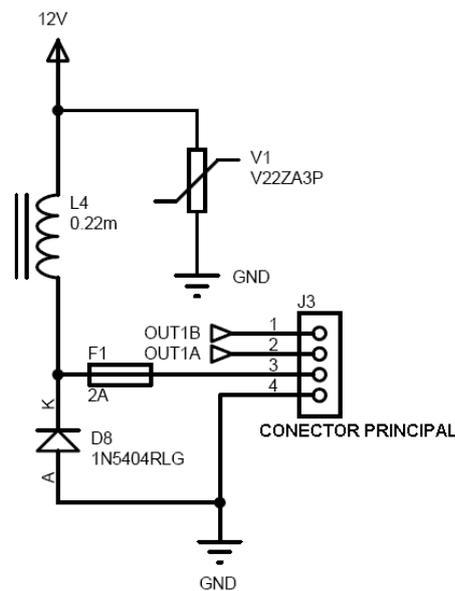


Figura 7.19: Circuito da entrada de alimentação do CDAA.

A Figura 7.20 mostra o espectro do sinal da corrente de alimentação do CDAA sem o indutor L4. É possível identificar significativos componentes de frequência relacionados à modulação do amplificador classe D, em 384 kHz e em frequências múltiplas desse valor. O indutor minimizou estes componentes de frequência ao ser introduzido no circuito, como é possível ver na Figura 7.21.

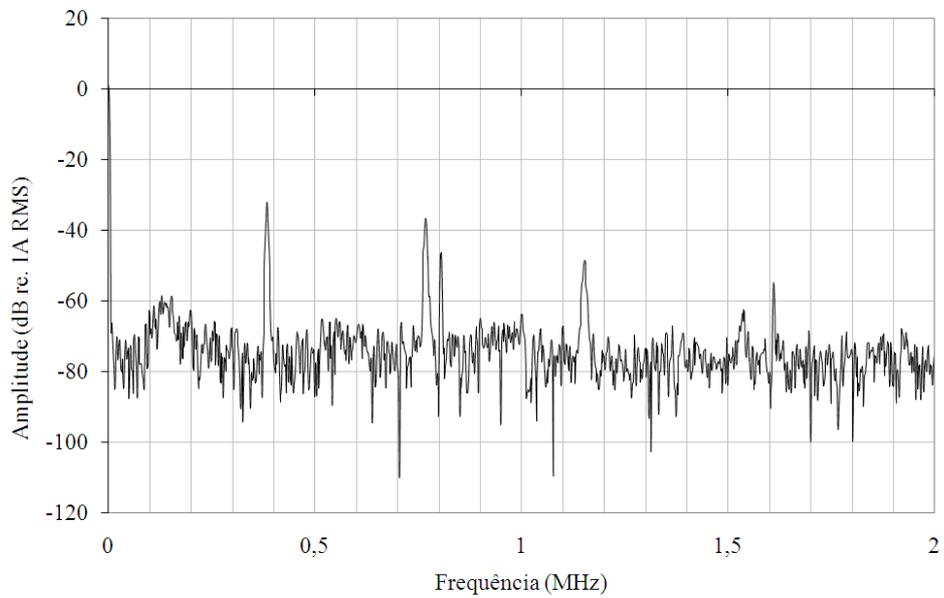


Figura 7.20: Espectro do sinal de corrente da alimentação do amplificador sem o indutor.

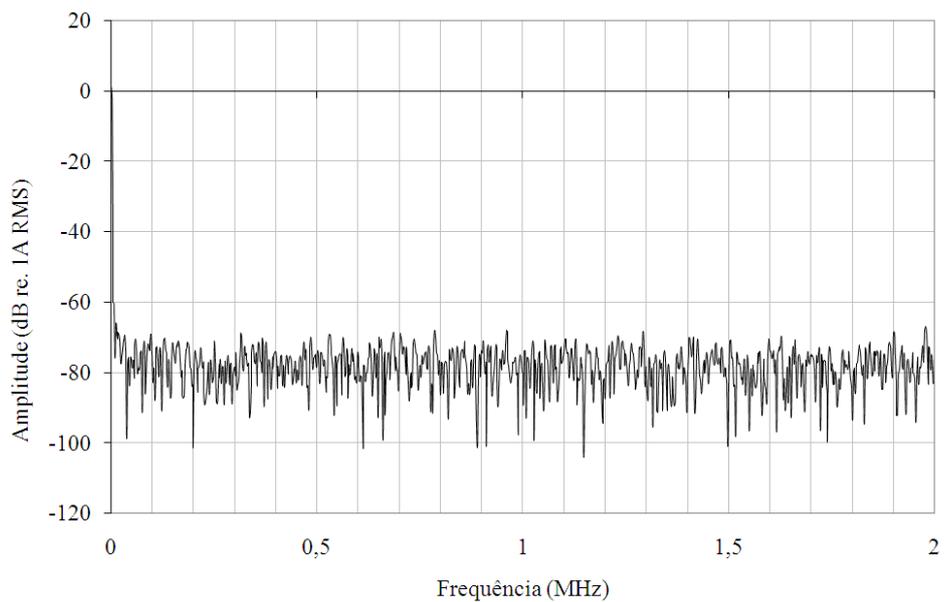


Figura 7.21: Espectro do sinal de corrente da alimentação do amplificador com o indutor.

### 7.5.3 Consumo e eficiência

A Tabela 7.2 mostra uma comparação entre o consumo do CDAA e o amplificador classe AB

LA47202P [18]. O primeiro item é o consumo quiescente de ambos amplificadores, que foi retirado das folhas de dados fornecidas pelos fabricantes. Os valores da corrente quiescente são bem próximos entre si, apenas 4 % de diferença.

Tabela 7.2: Comparação entre o consumo de corrente elétrica e a dissipação de potência

	CDA	LA47202P
Consumo quiescente	52 mA	50 mA
Consumo a 0,5 W	142 mA	321 mA
Dissipação de potência a 0,5 W	1,3 W	3,8 W
Consumo a 1 W	174 mA	442 mA
Dissipação de potência a 1 W	1,4 W	5,0 W
Consumo a 11 W	1,00 A	1,59 A
Dissipação de potência a 11 W	2,5 W	10,5 W

Os outros itens da tabela apresentam os valores da dissipação de potência dos amplificadores operando com uma carga resistiva conectada à saída. O sinal de excitação é senoidal com frequência igual a 997 Hz e a sua amplitude foi ajustada de forma a obter as três magnitudes de potência de saída desejadas (0,5 W, 1 W e 11 W).

A dissipação do amplificador da classe D é uma fração da dissipação do amplificador classe AB: 34 % em 0,5 W, 28 % em 1 W e 24 % em 11 W. Esse comportamento já havia sido anunciado nos gráficos da Figura 7.4.

A Figura 7.22 mostra as curvas de eficiência em função da potência de saída do CDA e do amplificador classe AB. Foi utilizado o sistema de medição descrito no Apêndice A, cuja interface com o usuário é mostrada na Figura A.7. A tensão de alimentação foi fixada em 13,5 V.

Nessa figura é possível verificar a eficiência dos amplificadores em três diferentes frequências do sinal senoidal de excitação: 97 Hz, 997 Hz e 9997 Hz.

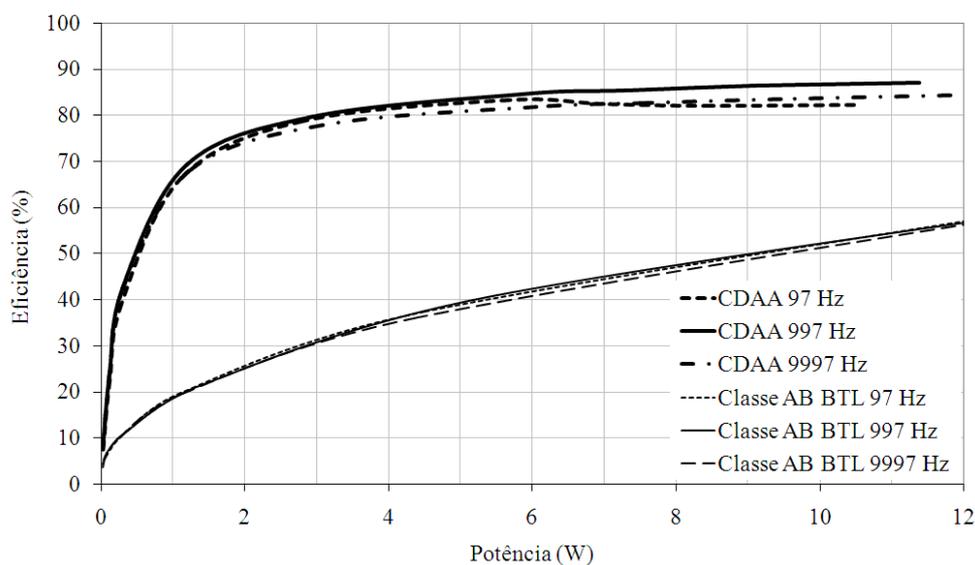


Figura 7.22: Eficiência em função da potência de saída do amplificador.

## 7.6 Conclusões do capítulo

A nova arquitetura apresentada nesse capítulo propõe melhorias no consumo e na eficiência do sistema de sonorização automotivo ao utilizar um transdutor eletroacústico ativo que incorpora um amplificador classe D para acionar o alto-falante. Além do aumento na eficiência, o conceito do transdutor ativo abre possibilidades de redução no custo global do sistema de áudio, com eliminação de cabos e conectores, de conversores digital analógico e, finalmente, do próprio autorrádio, no caso de ter suas funcionalidades implementadas por outra central eletrônica.

Assim, foi construído um protótipo de transdutor ativo automotivo, chamado CDAA. A validação do projeto consistiu na execução de provas em bancada e também em veículo com o

objetivo de comparar o desempenho do CDAA com um amplificador automotivo classe AB típico. Além da redução no consumo e na dissipação de potência, o transdutor ativo projetado não causou deterioração significativa na qualidade de áudio, medida objetivamente. As figuras de mérito consideradas foram: a resposta em frequência e a THD em função da frequência.

Com relação ao consumo energético, o CDAA apresentou uma queda de 66 % da corrente de alimentação consumida para uma potência de saída igual a 0,5 W, e de 71 % em 1 W. Este é um avanço considerável, conseguido a partir de uma nova arquitetura para o sistema de áudio automotivo e também com a adoção de uma tecnologia mais moderna para amplificação em potência.

# Capítulo 8

## Conclusões finais e propostas de continuidade

### 8.1 Conclusões finais

As investigações sobre os sistemas de áudio automotivo apresentadas nessa tese comprovam a possibilidade de melhorar o seu consumo e a sua eficiência energética, que é motivada pelo impacto na autonomia do veículo. A partir da subdivisão do sistema de sonorização em blocos, como elos em uma cadeia, foram identificados os principais consumidores e também as etapas onde ocorrem as maiores perdas de potência.

#### 8.1.1 O alto-falante e a impedância de radiação acústica

A transdução eletroacústica realizada pelo alto-falante no habitáculo de um automóvel é um desses elos na cadeia do áudio cuja eficiência foi investigada. Ela é limitada não somente pelas perdas de potência no próprio alto-falante, mas também pela impedância de radiação acústica

vista por ele. Em situações reais, a fixação dos alto-falantes às portas do veículo não é desenhada para maximizar o acoplamento vibroacústico, e com isso a eficiência da transdução é limitada mais ainda.

Foi desenvolvida uma metodologia para obter experimentalmente a impedância de radiação acústica vista pelo alto-falante e a eficiência do processo de transdução em veículo. Os resultados obtidos a partir de ensaios em dois veículos de teste mostraram a influência do painel de porta no acoplamento vibroacústico. Num dos veículos, foi observado um aumento da eficiência em mais de 10 % nas frequências vizinhas à ressonância com os painéis das portas anteriores instalados, o que foi confirmado qualitativamente pelas curvas medidas da resposta eletroacústica. Esse comportamento era esperado, visto que foi detectado um curto-circuito acústico graças à fixação inadequada do alto-falante à chapa metálica da porta. No outro veículo, o painel de porta mostrou exercer menor influência na eficiência, o que pode ter correlação com a fixação do alto-falante à chapa metálica, nesse caso sem o espaçamento verificado no anterior.

Este método de obtenção da eficiência da transdução pode ser aplicado diretamente na validação de novos projetos de portas, ou quaisquer outros radiadores acústicos nos quais o alto-falante pode ser fixado num sistema automotivo. Indo além, o próprio alto-falante pode ser projetado para que suas características sejam aquelas que maximizem a eficiência, dado um determinado radiador.

### 8.1.2 A inteligibilidade da fala

A capacidade de reconhecimento de sons de fala pelo ouvinte, ou inteligibilidade, num automóvel depende das características do sistema de áudio, e também da pressão sonora e do conteúdo espectral dos diversos ruídos que interferem na fala. A inteligibilidade está relacionada ao consumo energético do sistema de som, pois o usuário tende a aumentar o ganho do sistema

quando a taxa de reconhecimento de fala é insuficiente para a comunicação.

No estudo apresentado nessa tese, foram mostradas as características de alguns dos ruídos típicos medidos no habitáculo de dois veículos de teste. Os ruídos são oriundos do deslocamento do veículo – ruídos aerodinâmicos e rolamento dos pneus na pista, e também ruídos gerados por componentes do veículo – ventilador de climatização e o motor de combustão interna. Além disso, foi medida a resposta eletroacústica dos sistemas de áudio dos veículos de teste, e assim a razão sinal ruído pôde ser computada, em bandas de oitava, entre os diversos ruídos captados e os sinais de fala reproduzidos pelos alto-falantes.

O índice de articulação (AI) foi utilizado para traduzir cada razão sinal ruído numa métrica da inteligibilidade correspondente àquela situação. Os resultados mostram que o ruído que resulta no menor AI é o oriundo do ventilador de climatização. Os ruídos de deslocamento resultam em índices relativamente melhores, apesar de exporem os usuários do veículo a níveis de pressão sonora maiores. Tal fato é explicado pelos índices de ponderação em bandas de oitava utilizados no cálculo do AI, que são determinados experimentalmente para cada idioma, e que refletem a sensibilidade do sistema auditivo. Nos casos estudados, os ruídos de deslocamento concentram a sua energia nas bandas de frequências mais baixas, justamente aquelas que têm pouco peso, ou nem entram, no cálculo do AI. Por outro lado, o ruído do ventilador de climatização apresenta mais energia nas bandas de oitava que têm o maior peso, como a banda centrada em 2 kHz para o idioma inglês, por exemplo.

Foi proposta a aplicação de filtragem seletiva, ou equalização, ao sinal de fala reproduzido pelo sistema de áudio automotivo, como uma alternativa para aumentar o índice de articulação. Foram apresentados os resultados de uma equalização que buscou reforçar as frequências com maior peso, segundo os índices de ponderação por banda de oitava do idioma inglês, em até 6

dB. Apesar da equalização, o nível de potência total do sinal de fala aumentou menos que 0,5 dB. A melhoria do AI conseguida com a equalização é equivalente a um aumento de até 3 dB na razão sinal-ruído, o que significa que o amplificador pode operar com quase metade da potência que operaria sem a equalização.

Esse resultado mostra que a filtragem pode ser utilizada de forma objetiva como uma ferramenta de projeto para o sistema de sonorização automotiva a fim de maximizar a inteligibilidade da fala em um veículo e, como consequência, reduzir o consumo de energia do sistema.

### 8.1.3 Amplificação em potência

Dentre os componentes que conformam o sistema de áudio veicular, o amplificador de potência é aquele que dissipa a maior quantidade de energia em forma de calor. Foi mostrado que a classe AB de amplificadores, que é a mais utilizada, apresenta dissipação de potência dez vezes maior que a classe D. Porém, os amplificadores classe D são pouco empregados nos sistemas automotivos, pois podem causar interferências eletromagnéticas em outros circuitos dentro do autorrádio como, por exemplo, o receptor AM.

Foi projetado e construído um amplificador classe D com entrada digital para ser instalado junto ao alto-falante, na porta do automóvel, dentro do conceito de transdutor ativo. Esse tipo de aplicação não é comum no mercado automotivo, pois leva a uma ruptura com a atual arquitetura dos sistemas de som veiculares, que é centralizada no componente autorrádio. Dessa forma, foi proposta uma nova arquitetura onde o autorrádio é substituído por outra central eletrônica de processamento (central de *infotainment*) que não faz mais parte do sistema de sonorização porque implementa também outras funcionalidades, ligadas a conforto, entretenimento e navegação.

O protótipo de transdutor ativo com amplificador classe D (projeto CDAA) construído mostrou, nos testes de validação, que possui qualidade de áudio comparável aos amplificadores classe AB tradicionais, na figura de mérito THD+ruído e também na resposta em frequência eletroacústica. Contudo, a principal melhoria do CDAA foi relativa à sua dissipação de potência e, conseqüentemente, à sua eficiência. Com uma potência de saída igual a 11 W, a dissipação do CDAA é igual a 2,5 W, contra 10,5 W do amplificador classe AB, ou seja, uma redução de mais de 76 %.

Além da redução na dissipação de potência, que abre também a possibilidade de redução ou eliminação do radiador de calor do amplificador, a nova arquitetura para sistemas de sonorização automotiva propõe a eliminação de circuitos DAC da cadeia do áudio, o que implica em realizar a amplificação em potência do sinal de áudio no domínio digital. Não obstante, a transmissão dos sinais de áudio até os transdutores ativos pode ser implementada sobre protocolos de comunicação digital sem fios, ou através de cabos do tipo par trançado cujo custo é inferior ao dos atuais cabeamentos.

Finalmente, o conceito de transdutor ativo para sistemas de áudio vem ao encontro do conceito sobre o sistema elétrico automotivo apresentado por Kassakian [1] para o futuro próximo, onde todas as cargas do veículo serão alimentadas e controladas localmente a fim de maximizar a eficiência e o desempenho, e que os sinais digitais de controle serão transportados por um barramento de comunicação específico.

## 8.2 Produção científica

Este trabalho resultou até o presente momento nos seguintes artigos:

- *Intelligibility in Low-Cost Automotive Audio Systems* – Journal of the Audio

Engineering Society – maio/2016 [52].

- *Um método para obter experimentalmente a impedância de radiação acústica vista por um alto-falante* – AES Congresso de Engenharia de Áudio – maio/2014 [53].
- *Um estudo sobre o consumo energético e a eficiência de autorrádios* – Congresso Brasileiro de Automática – setembro/2014 [24].

## 8.3 Propostas de continuidade

As propostas de continuidade para complementação deste trabalho são:

### 8.3.1 Integração entre o alto-falante e o amplificador no transdutor ativo

O transdutor ativo pode ser concebido de maneira a eliminar a necessidade de um filtro de reconstrução entre o amplificador classe D e o alto-falante a fim de reduzir custos e volume. Isso significa que o próprio alto-falante pode ser desenhado para atuar como um filtro passa-baixas frente às correntes pulsadas enviadas pelo amplificador classe D.

### 8.3.2 Projeto do radiador acústico de alta eficiência

É possível determinar a impedância de radiação a partir de modelos produzidos através de análise em elementos finitos [54]. Assim, os radiadores acústicos dos alto-falantes, normalmente as portas, podem ser projetados para maximizar o acoplamento vibroacústico e, conseqüentemente, a eficiência da transdução eletroacústica dentro do habitáculo. Indo além, as características dos alto-falantes podem, também, ser sintonizadas ao radiador projetado, contribuindo ainda mais com o aumento da eficiência.

### 8.3.3 Inteligibilidade

O estudo sobre a inteligibilidade mostrado nessa tese não abordou o microfone do sistema viva-voz automotivo, responsável por captar a voz dos ocupantes do veículo. Dessa forma, um estudo similar pode ser conduzido para determinar as posições de instalação do microfone, ou equalizações, que maximizem a inteligibilidade.

Os índices de ponderação do AI por banda de oitava estão no centro da metodologia de determinação da inteligibilidade. Esses índices são calculados a partir dos resultados de testes subjetivos com um grupo de avaliadores treinados, e são válidos apenas para o idioma específico no qual o trabalho foi realizado. Contudo, não foram encontrados na literatura científica os índices de ponderação do AI para a língua portuguesa falada no Brasil, o que abre uma possibilidade para um trabalho de pesquisa.

# Referências bibliográficas

- [1] Kassakian, J. G., H. C. Wolf, J. M. Miller and C. J. Hurton, Automotive Electrical Systems circa 2005, *IEEE Spectrum*, 22–27 , Aug. 1996.
- [2] M. Andersen, Efficient Audio Power Amplification – Challenges, *AES 27th International Conference*, Copenhagen, Denmark, September 2005.
- [3] F. Rumsey, Class D Power Amplification, *Journal of the Audio Engineering Society*, 57(12):1087–1093, 2009.
- [4] L. Kinsler, et al., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, Inc., fourth edition, 2000.
- [5] H.F. Olson, *Acoustical Engineering*, Princeton, NJ: Van Nostrand, 1967.
- [6] R. H. Small, Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis, *Journal of the Audio Engineering Society*, 20(5):383–395, 1972.
- [7] R.H. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems Part 1: Analysis, *Journal of the Audio Engineering Society*, 20(10):798–808, 1972.

- [8] R.H. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems Part 2: Synthesis, *Journal of the Audio Engineering Society*, 21(7):549–554, 1973.
- [9] R.E. Shively, W.N. House, Perceived Boundary Effects in an Automotive Vehicle Interior, *AES 100<sup>th</sup> International Convention*, Copenhagen, Denmark, May 1996.
- [10] R. Shively, Automotive Audio Design (A Tutorial), *AES 109<sup>th</sup> International Convention*, Los Angeles, USA, September 2000.
- [11] R. Shively and J. King, Automotive Doors as Loudspeaker Enclosures, *AES 114<sup>th</sup> International Convention*, Amsterdam, The Netherlands, March 2003.
- [12] AES staff writer, Automotive Audio Quality, *Journal of the Audio Engineering Society*, 53(6): 542–548, June 2005.
- [13] AES staff writer, On the Road to Better Listening: An Update on Automotive Audio, *Journal of the Audio Engineering Society*, 54(5):416–419, May 2006.
- [14] D. Clark, Stereo in Automobiles, *AES 8<sup>th</sup> International Conference*, Washington, D.C., May 1990.
- [15] A. Farina, E. Ugolotti, Spatial equalisation of sound systems in cars by digital inverse filtering, *Proc. of Reproduced Sound*, Bowness on Windermere, United Kingdom, October 1997.
- [16] Farina, A. and Bozzoli, F. Measurement of the Speech Intelligibility Inside Cars, *AES 114<sup>th</sup> International Convention*, Los Angeles, USA, October 2002.
- [17] International Electrotechnical Commission, *IEC-60268-3: Sound System Equipment – Part 3: Amplifiers*, edition 3.0, 2000.

- [18] Datasheet: LA47202P – Four channel BTL power amplifier for car audio systems, Sanyo Semiconductors, 2006.
- [19] W. Klippel, Tutorial: Loudspeaker Nonlinearities — Causes, Parameters, Symptoms, *Journal of the Audio Engineering Society*, 54(10):907–939, October 2006.
- [20] J.D Reiss, et al., Verification of chaotic behavior in an experimental loudspeaker, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124(4):2031–2041, October 2008.
- [21] Datasheet Woofer 8PX, Selenium Pro, 2010.
- [22] E. Granier, M. Kleiner, B. Dalenbäck, P. Svensson, Experimental Auralization of Car Audio Installations, *Journal of the Audio Engineering Society*, 44(10):835–849, October 1996.
- [23] William Neal House, Aspects of the Vehicle Listening Environment, *AES 87<sup>th</sup> International Convention*, New York, October 1989.
- [24] C. G. Herrera, P. F. Donoso-Garcia, P. R. V. Andrade, E. B. Medeiros, R. S. N. Valadão, Um estudo sobre o consumo energético e a eficiência em autorrádios, *Congresso Brasileiro de Automática – CBA*, pp. 3029–3036, Belo Horizonte, Brasil, Setembro de 2014.
- [25] A. Sedra and K. Smith, *Microelectronics Circuits*, Oxford University Press, sixth edition, 2010.
- [26] Datasheet: TDA7388 – Quad Bridge Car Radio Amplifier, STMicroelectronics, 2005.
- [27] D. Self, *Audio Power Amplifier Design Handbook*, Newnes, 3<sup>rd</sup> Edition, 2002.
- [28] French, N. R. and Steinberg, J. C. Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds,

*The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 19(1):90–119, January 1947.

[29] Peutz, V. M. A. Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room, *Journal of the Audio Engineering Society*, 19(11):915–919, December 1971.

[30] International Telecommunication Union, *ITU-T P800 (08/96) Methods for subjective determination of transmission quality*, 1996.

[31] International Organization for Standardization, *ISO 9921:2003(E) Ergonomics: assessment of speech communication*, 2003.

[32] Lochner, J. P. and Burger, J. F., The influence of Reflections on Auditorium Acoustics, *Journal of Sound and Vibrations*, 1(4):426–454, October 1964.

[33] Steeneken, H. J. M., & Houtgast, T., A physical method for measuring speech-transmission quality, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67(1):318–326, January 1980.

[34] Bradley, J. S. Relationships among Measures of Speech Intelligibility in Rooms, *Journal of the Audio Engineering Society*, 46(5):396–405, May 1998.

[35] Dunn, H. K. and White, S. D., Statistical Measurements on Conversational Speech, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 11(3):278–288, January 1940.

[36] S. K. Lee, Measurement of Reverberation Times Using a Wavelet Filter Bank and Application to a Passenger Car, *Journal of the Audio Engineering Society*, 52(5):506–515, May 2004.

[37] International Electrotechnical Commission, *IEC 60268-16 – Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*, 2003.

- [38] van Wijngaarden, S. J. and Drullman, R., Binaural intelligibility prediction based on the speech transmission index, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(6):4514–4523, June 2008.
- [39] C. J. S. Brizon and E. B. Medeiros, “Combining subjective and objective assessments to improve acoustic comfort evaluation of motor cars,” *Applied Acoustics*, vol. 73(9):931–920, September 2012.
- [40] Poulsen, S., Towards Active Transducers, PhD thesis, Technical University of Denmark, 2004.
- [41] N. Tatlas et al., WLAN Technologies for Audio Delivery, *Advances in Multimedia*, 2007.
- [42] Datasheet: AD2410W – Automotive Audio Bus Transceiver, Analog Devices Incorporated, 2014.
- [43] A. Grzempa, *MOST - The Automotive Multimedia Network*, Franzis Verlag GmbH, 2011.
- [44] S. Kaku, Switching-mode absolute-value amplifier and its applications, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 25(1):79–83, March 1976.
- [45] K. Nielsen, High-Fidelity PWM-Based Amplifier Concept for Active Loudspeaker Systems with Very Low Energy Consumption, *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(7/8):554–570, July 1997.
- [46] G. Franceschini et al., TANDEM Digital Audio Amplifier, *AES 116<sup>th</sup> International Convention*, Berlin, Germany, May 2004.
- [47] J. F. Christensen, M. H. Olesen, The Industrial Dynamics of Open Innovation: Evidence

from the Transformation of Sound Amplification from linear solid-state to Class D Technology, *AES 27<sup>th</sup> International Conference*, Copenhagen, Denmark, September 2005.

[48] P Adduci et al., PWM Power Audio Amplifier With Voltage/Current Mixed Feedback for High-Efficiency Speakers, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(2):1141–1149, March 2007.

[49] Datasheet: TAS5132 – Stereo digital amplifier power stage, Texas Instruments Incorporated, 2006.

[50] Datasheet: TAS5424 – Four channel automotive digital amplifier, Texas Instruments Incorporated, 2007.

[51] Audio Engineering Society, Inc., *AES17-1998 – AES standard method for digital audio engineering: Measurement of digital audio equipment*, 1998.

[52] C. G. Herrera, P. F. Donoso-Garcia, E. B. Medeiros, Intelligibility in Low-Cost Automotive Audio Systems, *Journal of the Audio Engineering Society*, 64(5):320-331, May 2016.

[53] C. G. Herrera, P. F. Donoso-Garcia, E. B. Medeiros, Um método para obter experimentalmente a impedância de radiação acústica vista por um alto-falante, *AES Congresso de Engenharia de Áudio*, São Paulo, Brasil, Maio 2014.

[54] J. R. Wright, An Exact Model for Acoustic Radiation in Enclosed Spaces, *Journal of the Audio Engineering Society*, 43(10):813-820, October 1995.

# Apêndice A

## Sistema de Instrumentação Virtual

Nesse Apêndice é descrito o sistema de instrumentação virtual desenvolvido especialmente para os trabalhos de caracterização eletroacústica dos sistemas de sonorização automotiva apresentados nessa tese de doutorado.

A instrumentação virtual é uma metodologia de medição baseada na automatização dos procedimentos de coleta, análise e divulgação de dados. Nela, todos os instrumentos (sensores, atuadores e condicionadores de sinal) são controlados por um sistema de processamento central, que executa um código com a descrição e a sequência dos procedimentos da medição a ser efetuada. O alto grau de repetibilidade conseguido com a automatização é um ponto forte do método, com implicações positivas na confiabilidade dos resultados obtidos.

Quando o dispositivo em teste é um componente de áudio, ou um sistema de sonorização, a instrumentação virtual apresenta vantagens específicas, que levaram à sua adoção na presente pesquisa. Uma dessas vantagens é a possibilidade de se agrupar num mesmo instrumento (virtual) diferentes grandezas físicas, como tensão e corrente elétricas e pressão sonora. Outra vantagem é a facilidade de se incorporar novas medidas ao experimento durante a sua execução,

o que pode não ser valorizado num laboratório de serviços de teste e calibração, mas é certamente desejável num trabalho de pesquisa científica, uma vez que aumenta o potencial de investigação do pesquisador.

Na Tabela A.1 são listados todos os sensores, atuadores, condicionadores e digitalizadores de sinais utilizados nas medições.

Tabela A.1: Lista dos equipamentos do sistema de instrumentação virtual.

Modelo	Fabricante	Descrição
PCI 6221	National Instruments	Placa de aquisição e geração de sinais com 8 canais diferenciais de entrada e 2 canais de saída. Taxa de amostragem: 250.000 amostras/s (dividida entre os canais de entrada) e 740.000 amostras/s por canal de saída. Resolução: 16 bits. Exatidão (faixa de $\pm 10$ V): $\pm 3,1$ mV.
PXI-4462	National Instruments	Placa de aquisição com 4 canais de entrada. Taxa de amostragem máxima: 204.800 amostras/s. Resolução: 24 bits. Exatidão (faixa de $\pm 10$ V): $\pm 38,75$ mV.
PXI-4472B	National Instruments	Placa de aquisição com 8 canais de entrada. Taxa de amostragem máxima: 102.400 amostras/s. Resolução: 24 bits. Exatidão (faixa de $\pm 10$ V): $\pm 234,6$ mV.
PXI-6229	National Instruments	Placa de geração de sinais com 4 canais de saída. Taxa de amostragem máxima: 625.000 amostras/s. Resolução: 16 bits. Exatidão (faixa de $\pm 10$ V): $\pm 3,23$ mV.
USB-9233	National Instruments	Placa de aquisição com 4 canais de entrada. Taxa de amostragem máxima: 50.000 amostras/s. Resolução: 24 bits. Exatidão (faixa de $\pm 5$ V): $\pm 86,8$ mV.

PCI 5114	National Instruments	Placa de aquisição de sinais com 2 canais de entrada. Taxa de amostragem: 250.000.000 amostras/s por canal. Resolução: 8 bits. Exatidão (faixa de $\pm 20$ V): $\pm 300$ mV.
Type 4100	Brüel & Kjær	Simulador de cabeça e torso. Atende aos requisitos dimensionais: ITU-T Rec. P.58, IEC 60318-7 e ANSI S3.36-1985.
40AQ	G.R.A.S.	Microfone capacitivo pré-polarizado com diâmetro igual a $\frac{1}{2}$ polegada, de incidência aleatória.
26CA	G.R.A.S.	Pré-amplificador para microfone capacitivo de $\frac{1}{2}$ polegada.
Type 2732	Brüel & Kjær	Amplificador de potência com capacidade para 120 VA. Resposta em frequência: DC até 150 kHz ( $\pm 3$ dB). Distorção harmônica total menor que 0,2 % (entre 5 Hz e 15 kHz).
TCP305 + TCPA300	Tektronix	Ponta de prova de corrente elétrica com condicionador de sinal. Largura de banda: DC até 50 MHz. Resolução: 5 mA. Fundo de escala: 50 A. Exatidão (faixa de $\pm 10$ A/V): $\pm 300$ mA.
USB-4065	National Instruments	Multímetro digital com resolução de 6 e $\frac{1}{2}$ dígitos.

A Figura A.1 mostra o esquema utilizado para caracterizar o comportamento dinâmico da linha de alimentação do autorrádio, discutido no Capítulo 3. São utilizadas duas placas de aquisição para digitalizar o mesmo sinal de tensão ( $V_{cc}$ ), porém com resolução e taxa de

amostragem diferentes entre si a fim de atender aos requisitos das análises realizadas. O sinal de teste, sintetizado em *software*, é aplicado às entradas auxiliares do autorrádio, que tem as suas quatro saídas de áudio também digitalizadas para a medição das suas amplitudes e análise do conteúdo espectral.

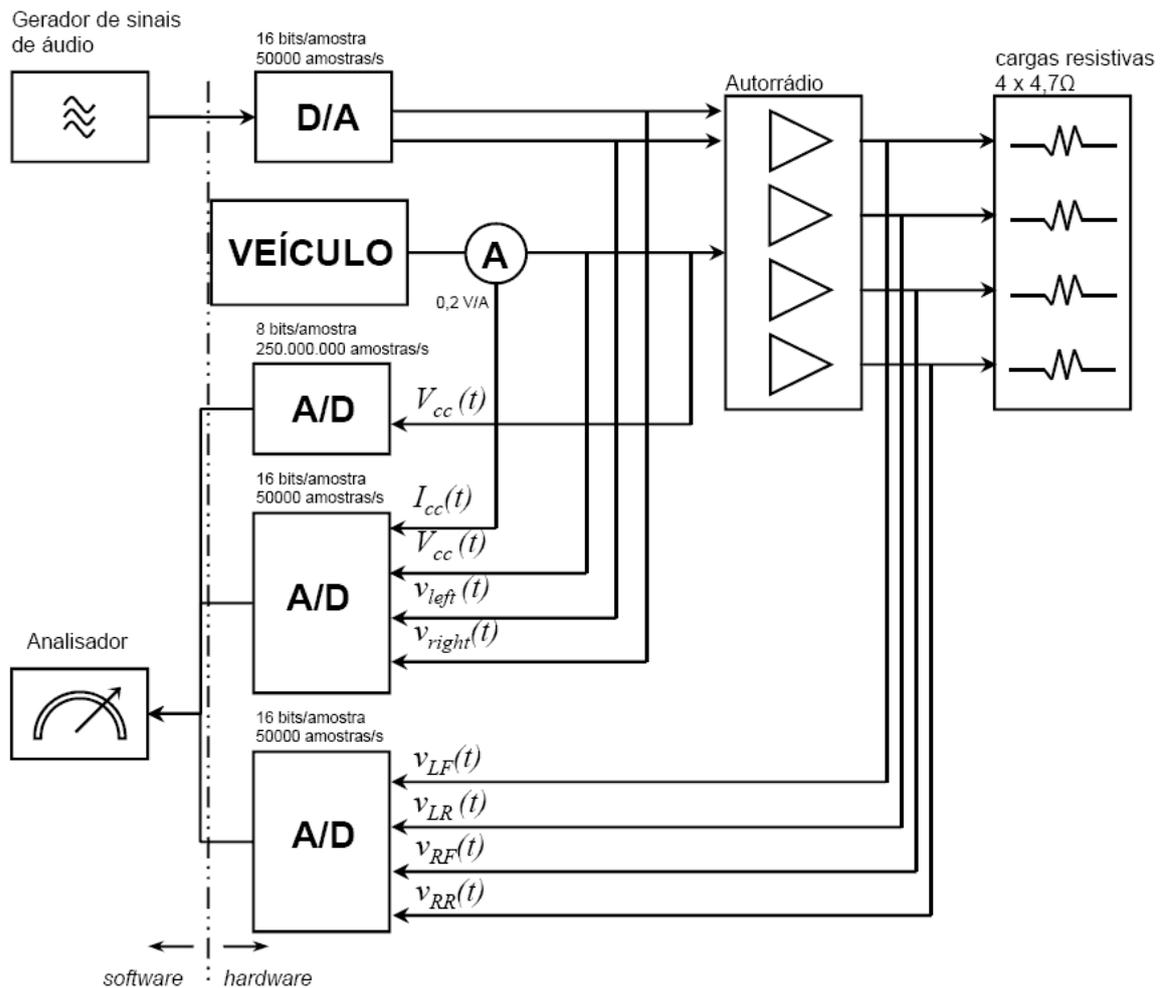


Figura A.1: Esquema de instrumentação para caracterização da linha de alimentação do autorrádio.

Na Figura A.2 é apresentado o diagrama de instrumentação usado para medir a resposta eletroacústica do sistema de áudio automotivo, também abordado no Capítulo 3. O sinal de teste é amplificado e aplicado ao alto-falante para a reprodução sonora no habitáculo. A pressão

sonora é, então, medida pelo microfone em diversas posições do veículo.

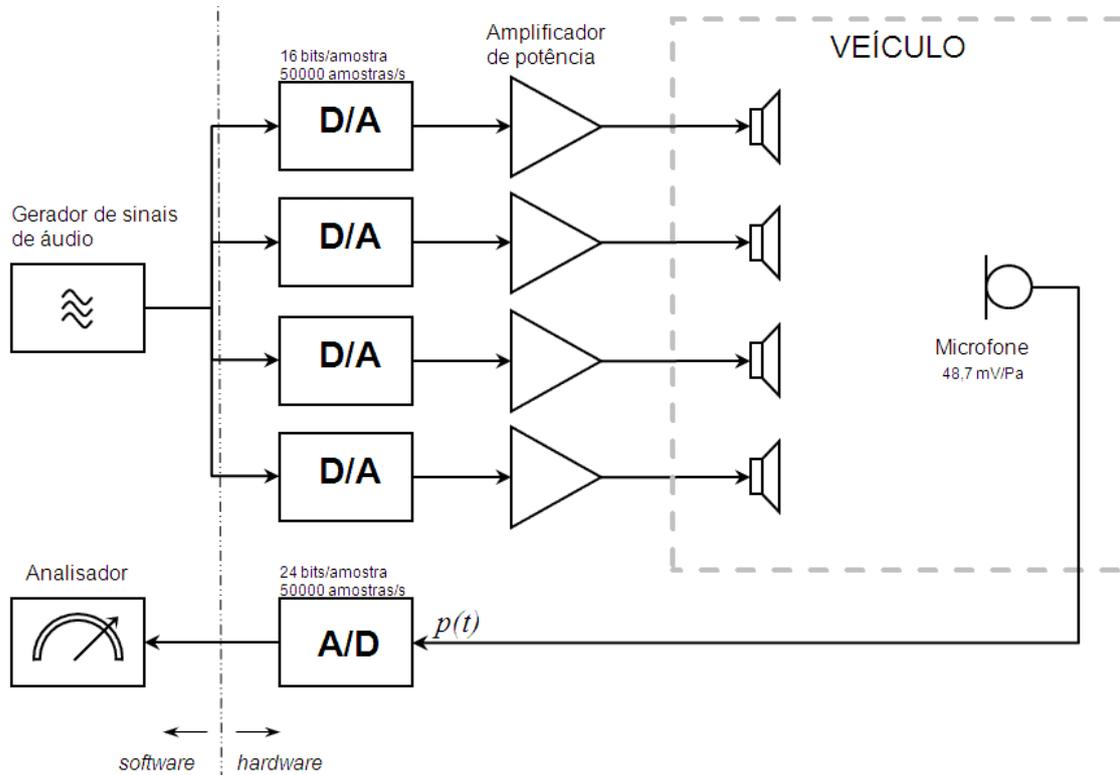


Figura A.2: Esquema de instrumentação para caracterização eletroacústica do sistema de sonorização automotiva.

A Figura A.3 mostra o diagrama em blocos do sistema de medição desenvolvido para a realização dos ensaios de caracterização no alto-falante em bancada, discutidos no Capítulo 5. O próprio amplificador de potência utilizado para acionar o alto-falante fornece os sinais analógicos de tensão e de corrente de saída a serem digitalizados.

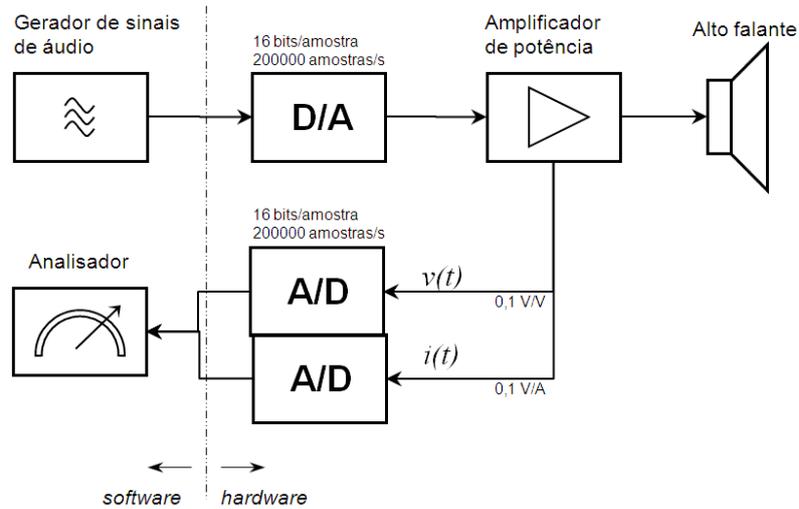


Figura A.3: Diagrama em blocos do sistema de medição da tensão e corrente no alto-falante em bancada.

Ainda com relação aos ensaios sobre alto-falantes, cujos resultados foram discutidos no Capítulo 5, na Figura A.4 é apresentado o diagrama de blocos da instrumentação necessária para a digitalização dos sinais de tensão, corrente e NPS em veículo.

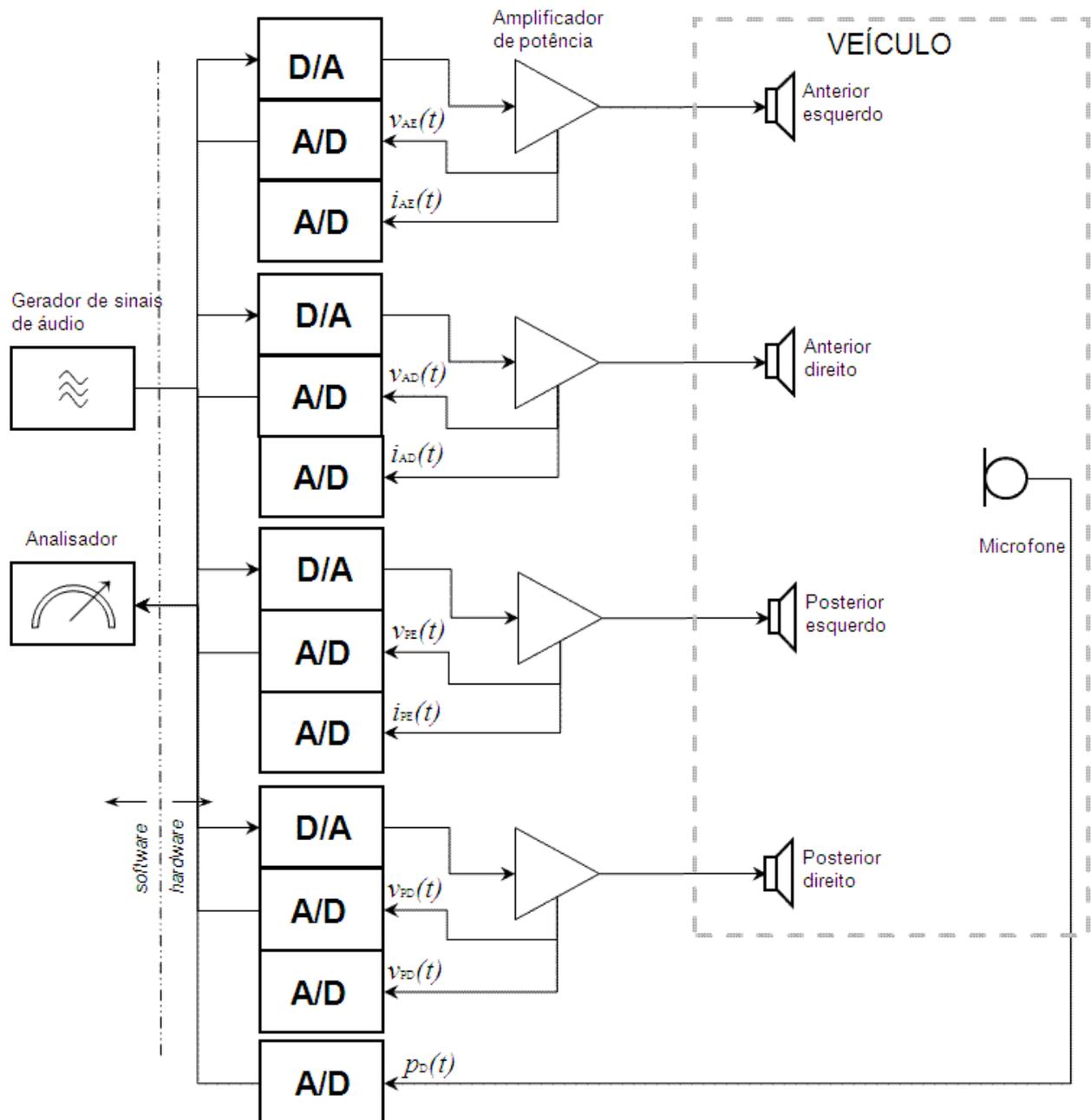


Figura A.4: Diagrama em blocos do sistema de medição da tensão e corrente no alto-falante em veículo.

No Capítulo 6 foram apresentados os resultados da medição biauricular de sinais acústicos no habitáculo, cujo esquema de instrumentação é mostrado na Figura A.5.

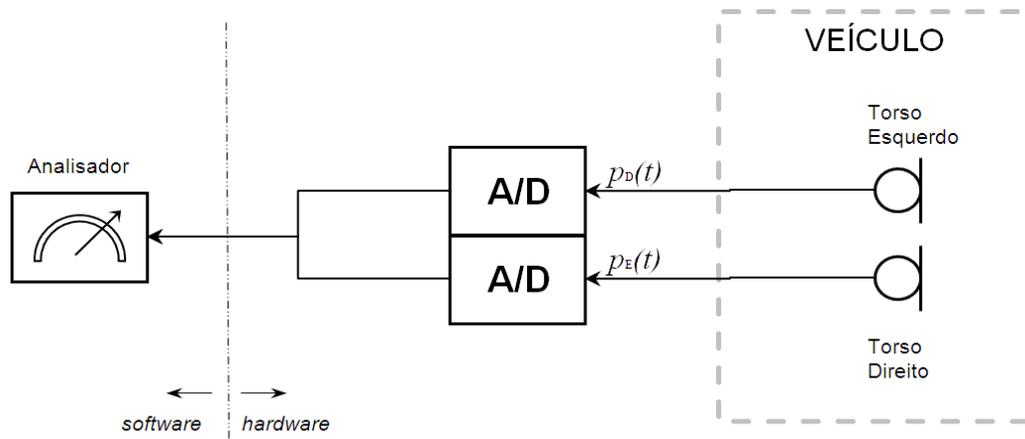


Figura A.5: Diagrama em blocos do sistema de medição biauricular em veículo.

A fim de observar o funcionamento de um amplificador classe D automotivo apresentado no Capítulo 7, e caracterizar o seu consumo e a sua eficiência, foram realizados ensaios com o esquema de instrumentação mostrado na Figura A.6. Uma das placas de aquisição de dados recebe os sinais de tensão e corrente da alimentação do amplificador e a outra placa de aquisição recebe os sinais de áudio à entrada e à saída do amplificador. A partir das séries temporais digitalizadas é possível calcular os valores médios dos sinais da alimentação e o valor eficaz da saída de áudio do amplificador e determinar a eficiência.

Finalmente, na Figura A.7 aparece uma ilustração de um dos painéis virtuais desenvolvidos para o comando e monitoramento dos ensaios descritos nessa tese. Trata-se do módulo de medição da eficiência do amplificador de potência. O botão “PLAY” dispara um ciclo de medição, que consiste na digitalização dos sinais correspondentes à tensão e à corrente de alimentação do amplificador, além do sinal de áudio amplificado entregue à carga resistiva conectada à sua saída. O sinal senoidal digital de teste é sintetizado pelo usuário a partir dos parâmetros: frequência, amplitude, taxa de amostragem e número de pontos.

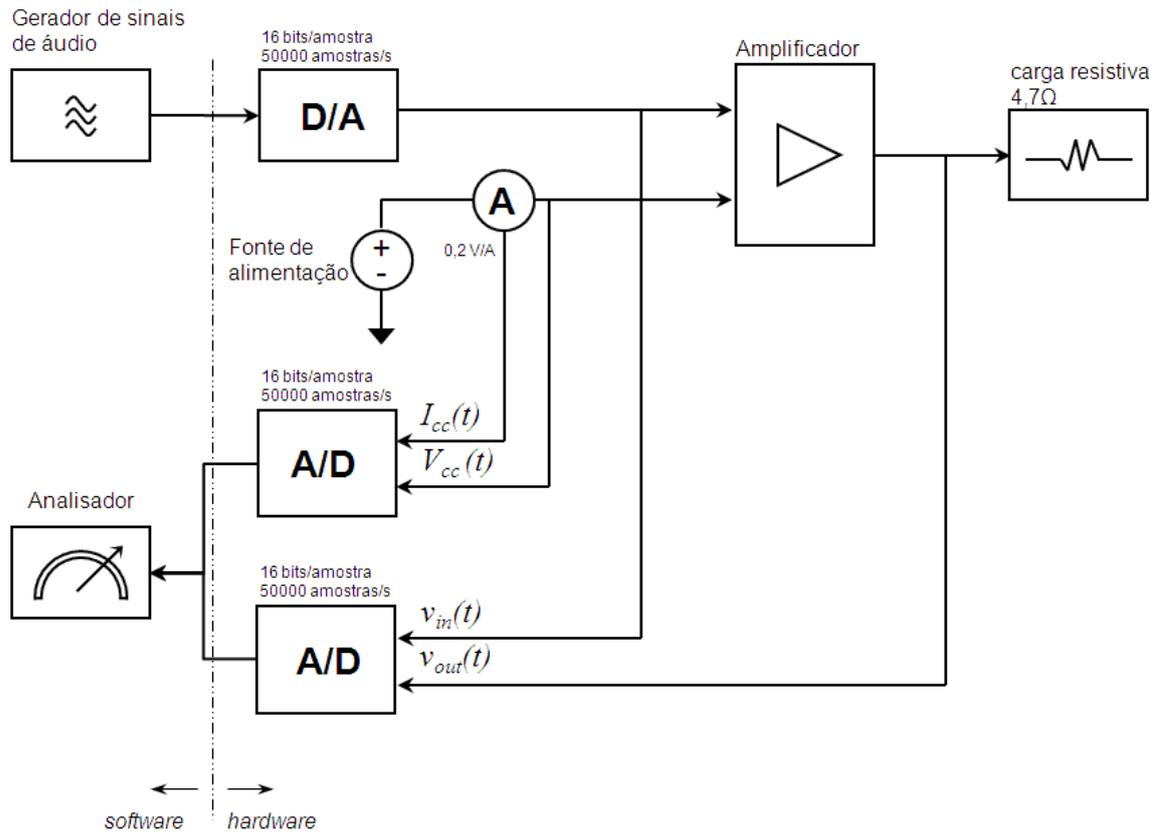


Figura A.6: Esquema de instrumentação para caracterização da eficiência do amplificador em bancada.



Figura A.7: Painel virtual do sistema de instrumentação – módulo de medição da eficiência.

# Apêndice B

## Projeto CDAA – Documentos

Neste Apêndice são apresentados os seguintes documentos do projeto CDAA (*Class D Automotive Amplifier*):

- a) os diagramas esquemáticos (Figura B.1 a Figura B.4),
- b) a lista de componentes (Tabela B.1), e
- c) os desenhos da placa de circuito impresso (Figura B.5).

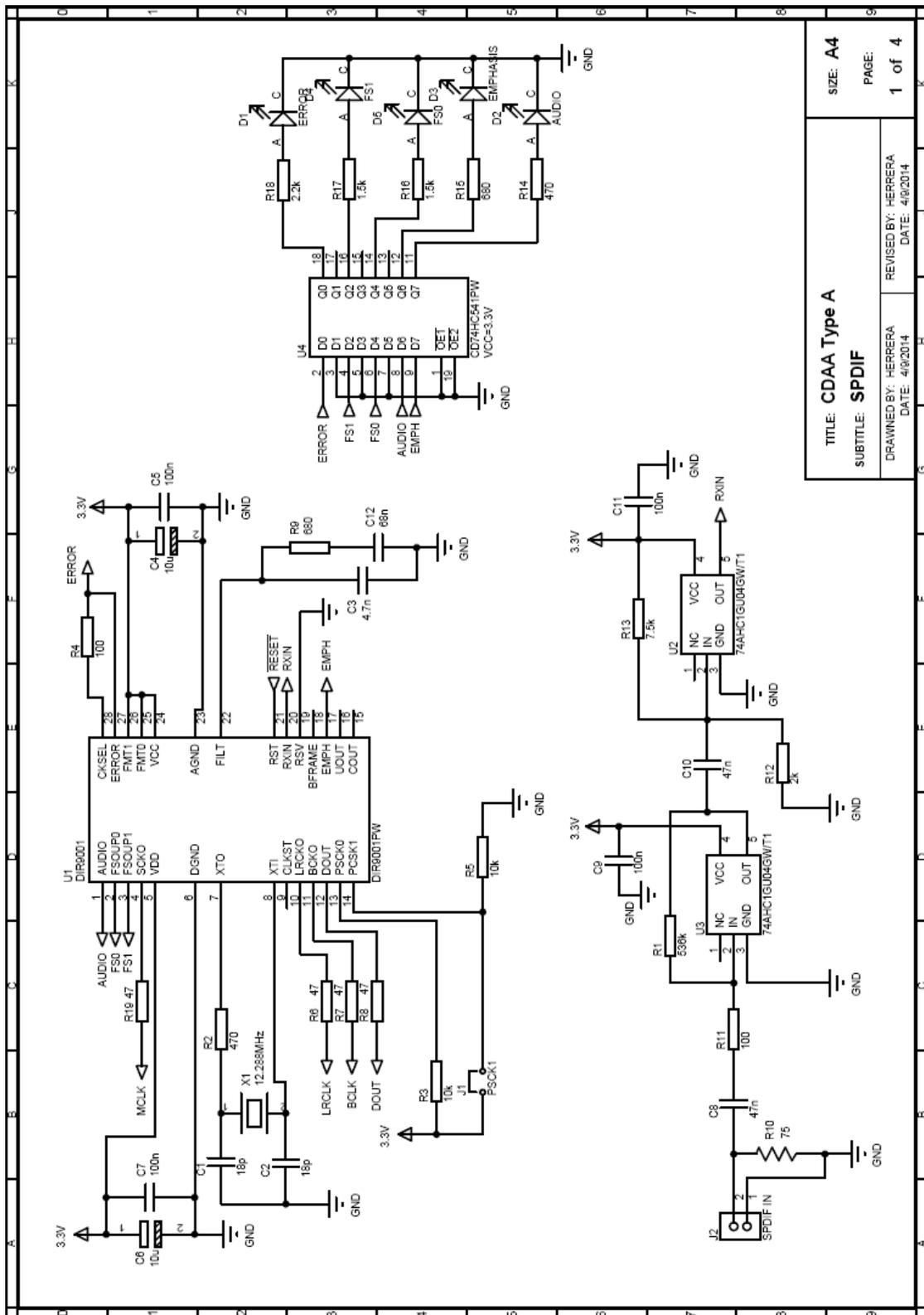
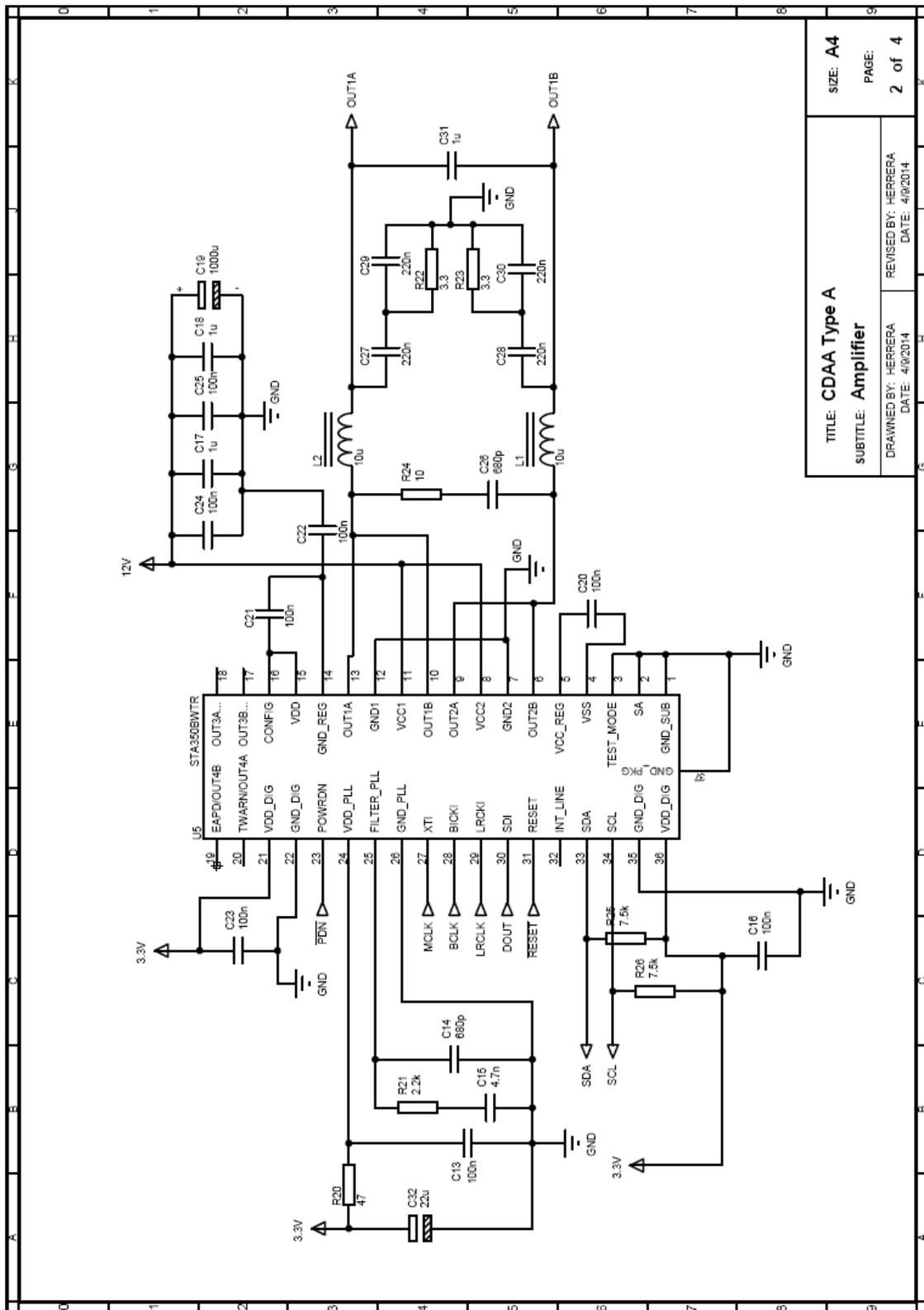
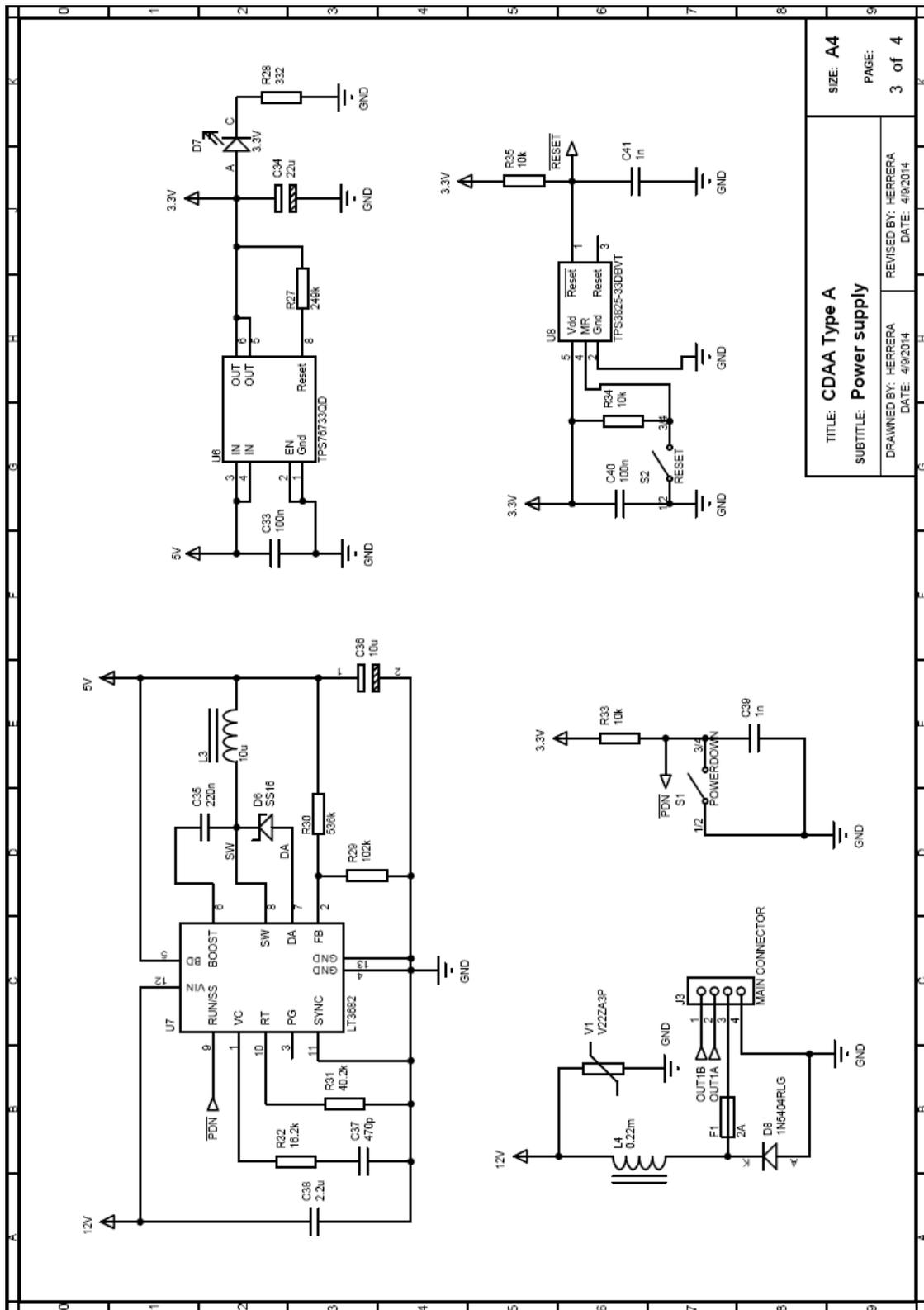


Figura B.1: Diagrama esquemático (folha 1 de 4).



TITLE: CDA4 Type A		SIZE: A4
SUBTITLE: Amplifier		PAGE: 2 of 4
DRAWN BY: HERRERA	REVISED BY: HERRERA	DATE: 4/9/2014

Figura B.2: Diagrama esquemático (folha 2 de 4).



TITLE: CDAA Type A  
 SUBTITLE: Power supply  
 DRAWN BY: HERRERA  
 DATE: 4/9/2014  
 REVISED BY: HERRERA  
 DATE: 4/9/2014  
 SIZE: A4  
 PAGE: 3 of 4

Figura B.3: Diagrama esquemático (folha 3 de 4).

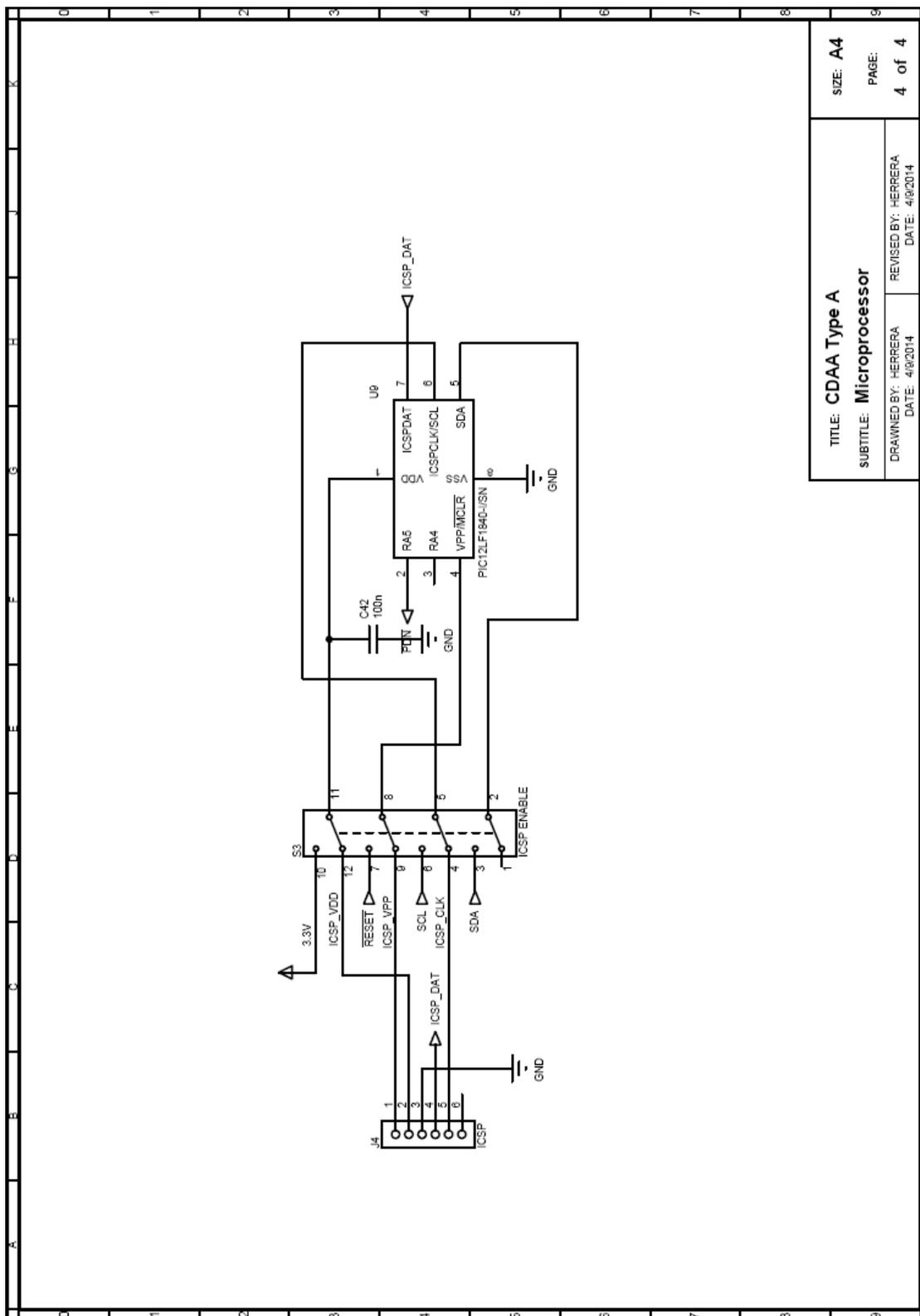


Figura B.4: Diagrama esquemático (folha 4 de 4).

Tabela B.1: Lista de materiais

Category	Quantity	References	Value	Description
Capacitors	2	C1-C2	18p	CAPACITOR CERAMIC 18PF 50V COG 10% 0603
Capacitors	2	C3,C15	4.7n	CAPACITOR CERAMIC 4700PF 50V X7R 0603
Capacitors	3	C4,C6,C36	10u	CAPACITOR CASE C 10UF 25V
Capacitors	15	C5,C7,C9,C11,C13,C16,C20-C25,C33,C40,C42	100n	CAPACITOR CERAMIC 0.1UF 50V X7R 10% 0603
Capacitors	2	C8,C10	47n	CAPACITOR CERAMIC 0.047UF 50V X7R 0603
Capacitors	1	C12	68n	CAPACITOR CERAMIC 0.068UF 25V X7R 10% 0603
Capacitors	2	C14,C26	680p	CAPACITOR CERAMIC 680PF 50V X7R 10% 0603
Capacitors	2	C17-C18	1u	CAPACITOR CERAMIC 1UF 50V X7R 10% 1206
Capacitors	1	C19	1000u	CAP ALUM 1000UF 35V 20% RADIAL
Capacitors	5	C27-C30,C35	220n	CAPACITOR CERAMIC 0.22UF 25V X7R 0603
Capacitors	1	C31	1u	CAPACITOR POLY FILM FILM 1UF 63V RAD
Capacitors	2	C32,C34	22u	CAP ALUM 22UF 16V 20% SMD
Capacitors	1	C37	470p	CAPACITOR CERAMIC 470PF 50V X7R 10% 0603
Capacitors	1	C38	2.2u	CAPACITOR CERAMIC 2.2UF 25V X5R 10% 0805
Capacitors	2	C39,C41	1n	CAPACITOR CERAMIC 1000PF 50V X7R 20% 0603
Resistors	2	R1,R30	536k	RES 536K OHM 1/10W 1% 0603 SMD
Resistors	2	R2,R14	470	RES 470 OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	5	R3,R5,R33-R35	10k	RES 10K OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	2	R4,R11	100	RES 100 OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	5	R6-R8,R19-R20	47	RES 47 OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	2	R9,R15	680	RES 680 OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	1	R10	75	RES 75.0 OHM 1/4W 1% 1206 SMD
Resistors	1	R12	2k	RES 2.0K OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	3	R13,R25-R26	7.5k	RES 7.5K OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	2	R16-R17	1.5k	RES 1.5K OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	2	R18,R21	2.2k	RES 2.2K OHM 1/10W 5% 0603 SMD
Resistors	2	R22-R23	3.3	RES 3.3 OHM 1/4W 5% 1206 SMD
Resistors	1	R24	10	RES 10 OHM 1/4W 5% 1206 SMD
Resistors	1	R27	249k	RES 249K OHM 1/10W 1% 0603 SMD
Resistors	1	R28	332	RES 332 OHM 1/10W 1% 0603 SMD
Resistors	1	R29	102k	RES 102K OHM 1/10W 1% 0603 SMD
Resistors	1	R31	40.2k	RES 40.2K OHM 1/10W 1% 0603 SMD
Resistors	1	R32	16.2k	RES 16.2K OHM 1/10W 1% 0603 SMD
Integrated Circuits	1	U1	DIR9001PW	Digital Audio Interface Receiver
Integrated Circuits	2	U2-U3	74AHC1GU04GW/T1	74AHC SINGLE GATE SMD 74AHC1GU04
Integrated Circuits	1	U4	CD74HC541PW	LOGIC BUFF/DVR TRI-ST OCTAL 20TSSOP
Integrated Circuits	1	U5	STA350BWTR	IC AUDIO SYSTEM DGTL 36PWRSSO
Integrated Circuits	1	U6	TPS76733QD	IC REG LDO 3.3V 1A 8SOIC
Integrated Circuits	1	U7	LT3682	IC REG BUCK ADJ 1A 12DFN
Integrated Circuits	1	U8	TPS3825-33DBVT	IC 2.93V SUPPLY MONITOR SOT23-5
Integrated Circuits	1	U9	PIC12LF1840-I/SN	IC MCU 8BIT 7KB FLASH 8SOIC
Diodes	3	D1,D3,D7	MCL-S290SRC	LED SMD 0603 SUPER-RED
Diodes	3	D2,D4-D5	SML-510MWT86N	LED SMD 0603 GREEN
Diodes	1	D6	SS16	DIODE SCHOTTKY 50V 1A SMB
Diodes	1	D8	1N5404RLG	STANDARD DIODE 3A 400V AXIAL
Miscellaneous	1	F1	2A	FUSEHOLDER 25MM PCB 5X20MM BLACK
Miscellaneous	1	J1	2211S-02G	HEADER 2WAY 1ROW 2.54MM VERTICAL PCB
Miscellaneous	1	J2	PJRN1X1U01X	CONN RCA JACK METAL R/A YEL PCB
Miscellaneous	1	J3	5024940470	CONN RCPT R/A 4POS 2.00MM PCB
Miscellaneous	1	J4	3-644456-6	WIRE-BOARD CONNECTOR HEADER 6WAY 0.1IN
Miscellaneous	3	L1-L3	10u	INDUCTOR SMD POWER 10UH 3A
Miscellaneous	1	L4	0.22m	INDUCTOR TORD HI AMP 220UH HORZ
Miscellaneous	2	S1-S2	MCDS6-3K	SWITCH TACTILE SPST-NO 50mA SOLDER LUG
Miscellaneous	1	S3	MMS42	SWITCH MICRO-MINI SLIDE
Miscellaneous	1	V1	V22ZA3P	METAL OXIDE VARISTOR 18V 43V RAD
Miscellaneous	1	X1	12.288MHZ	XTAL 12.288MHZ 18PF SMD HC-49S

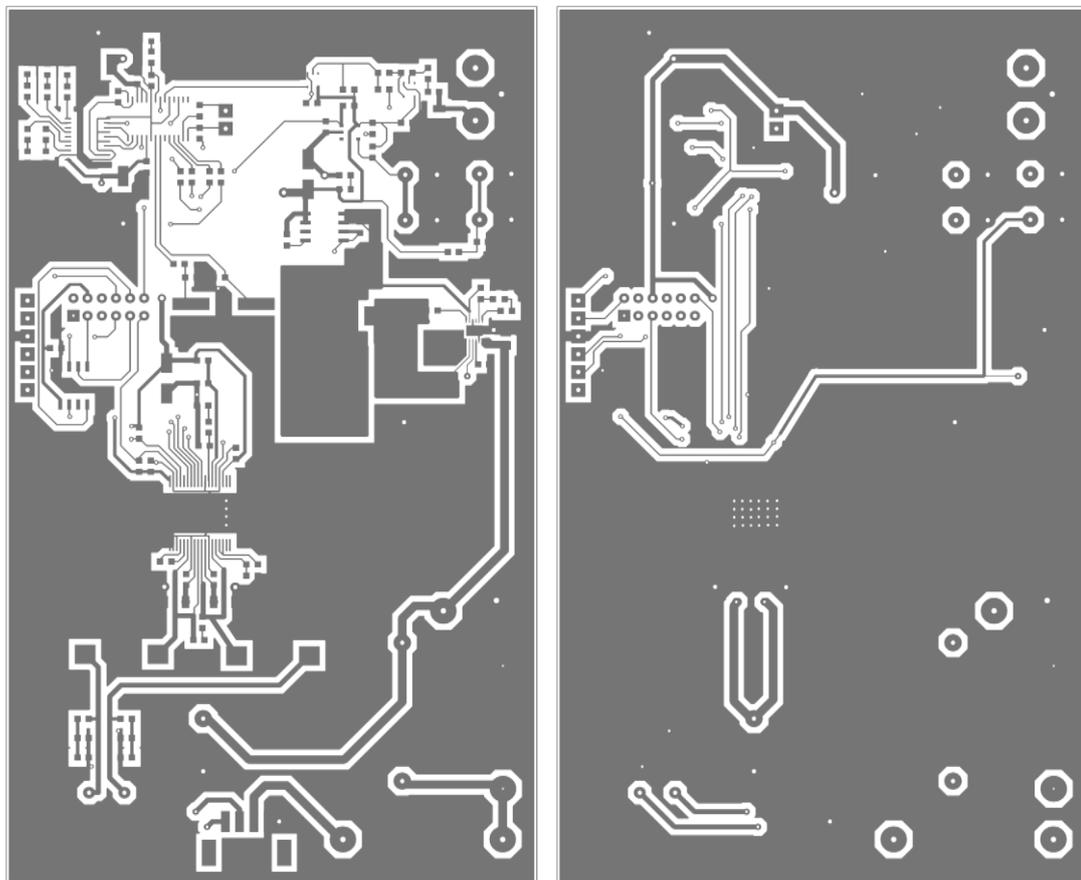
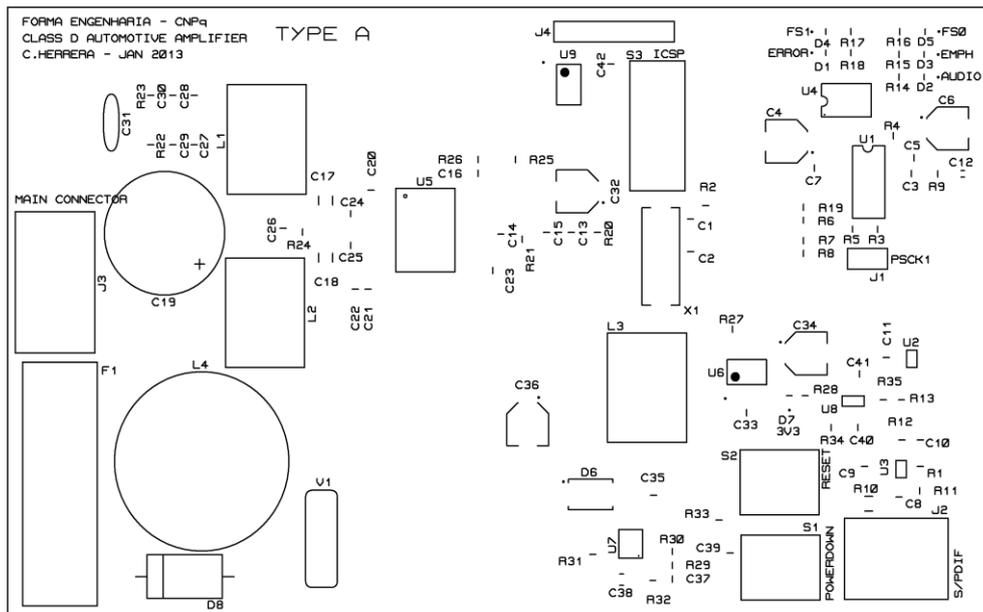


Figura B.5: Ilustração da placa de circuito impresso.