

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



FEUP

Caracterização da resposta em atraso de grupo de altifalantes e microfones

Daniel Alexandre Azevedo Gomes

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Aníbal Ferreira (Prof. Dr. Eng.)

Co-orientador: Ricardo Sousa (Dr. Eng.)

25 de Julho de 2012

Resumo

A caracterização acústica dos diversos dispositivos de gravação e reprodução de som é um elemento crucial já realizada há muitos anos. É através deste meio que se torna possível comparar o comportamento dos vários dispositivos, optando por aquele que mais se adequa às necessidades. Esta caracterização é geralmente feita a vários níveis, quer em termos do modo de funcionamento do dispositivo, quer na sua capacidade de lidar com os sinais sonoros. Por vezes, ocorrem situações em que esta informação não está completamente disponível, tornando assim a escolha do dispositivo uma tarefa ainda mais difícil.

Coloca-se assim o desafio de caracterizar diversos dispositivos, nomeadamente microfones e altifalantes, quanto ao seu comportamento em atraso de grupo. Esta é uma das formas de caracterização que não é globalmente divulgada pelos mais diversos fabricantes de dispositivos áudio, tornando-se difícil entender se este comportamento é inclusivamente estudado quando determinado produto é projetado. O atraso de grupo é a derivada negativa da fase de um dispositivo em ordem à frequência. Para que um microfone ou altifalante não provoque distorções num sinal sonoro, é necessário que este tenha um comportamento em atraso de grupo constante, fazendo assim com que todas as frequências emitidas/captadas sofram um atraso temporal igual. Apenas deste modo não existe distorção ao nível da fase.

Diversos dispositivos foram testados numa câmara anecóica através de vários estímulos sonoros, escolhidos especificamente para estudar o atraso de grupo e resposta em frequência dos microfones e altifalantes. Foram testados três altifalantes e quatro microfones, sendo dois deles dinâmicos e os outros de condensador. Assim, foi possível comparar diferentes tecnologias de gravação. No final, foi realizado um estudo estatístico para permitir uma mais fácil interpretação dos resultados obtidos.

Partindo do estudo estatístico efetuado, foi possível concluir que existe uma maior distorção do sinal sonoro original nos altifalantes, quando comparado com os microfones.

Abstract

The acoustic characterization of recording and playback devices has been a critical element for many years. It is through this step that we can compare the acoustic behaviour of different devices, thus choosing which one better fits our needs. This characterization is usually carried out at different levels, in terms of device operation, and in terms of its ability to deal with sound signals. Sometimes, this kind of information is not fully available, making the choice of the right device even harder.

We are faced with the challenge of characterizing several devices, in particular microphones and loudspeakers, regarding their group delay behaviour. This is one of the means of characterization not generally released through most audio devices's manufacturers, making it hard to understand if this behaviour is even studied when a certain product is designed. The group delay is the negative phase derivative of a device in order to its frequency. For a microphone or a loudspeaker not to distort a sound signal, it is necessary for its group delay behaviour to be constant, allowing all emitted/received frequencies to then have an equal timing delay. Only this way will there be no phase distortion.

Several devices were tested in an anechoic chamber using different sound stimuli, specifically chosen to study the group delay and frequency response of microphones and loudspeakers. Three loudspeakers and four microphones were tested, two being dynamic and the others condenser ones. It is thus possible to compare different recording technologies. Finally, a statistical study was conducted to allow an easier interpretation of the obtained results.

From the statistical study, it was possible to conclude that there is a higher distortion of the original sound signal caused by the speakers, in comparison to the microphones.

Agradecimentos

Quero prestar aqui o meu agradecimento ao professor Doutor Aníbal Ferreira, pelo seu apoio e orientação, e igualmente por me ter dado a oportunidade de trabalhar no tema deste projeto. Uma contribuição muito especial foi também dada pelo Doutor Ricardo Sousa, do qual a constante ajuda e motivação estiveram sempre presentes. As suas dicas e conselhos foram cruciais para que esta dissertação fosse realizável.

Agradeço também a contribuição do Ricardo Dias, pela sua enorme ajuda durante a fase de recolha dos diversos sinais na câmara anecóica, bem como pela revisão da escrita após concluída a dissertação. A todos os outros com os quais trabalhei estes últimos meses na FEUP, pelas ajudas prestadas e ambiente de trabalho motivador.

Deixo agora um agradecimento especial aos meus pais e irmã pelo apoio sempre demonstrado não só nos últimos meses, mas durante todo o meu crescimento como pessoa e futuro profissional. Um agradecimento também aos amigos, pelos bons momentos passados.

Daniel Gomes

*"A curiosidade é mais importante
do que o conhecimento."*

Albert Einstein

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Tema e objetivos	1
1.2	Motivação	1
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	Atraso de grupo	3
2.2	Transdutores eletroacústicos	6
2.2.1	Transdutor de bobina móvel	6
2.2.2	Transdutor piezoelétrico	6
2.2.3	Transdutor eletrostático	7
2.3	Microfone	7
2.3.1	Elemento	7
2.3.2	Direcionalidade	9
2.3.3	Sensibilidade	10
2.3.4	Resposta em frequência	11
2.3.5	Impedância	11
2.4	Altifalante	11
2.4.1	Transdutor	11
2.4.2	Sensibilidade	13
2.4.3	Sistemas de múltiplas vias	13
2.4.4	Filtro crossover	14
2.4.5	Resposta em frequência	15
2.4.6	Impedância e potência	15
2.5	Métodos de calcular funções transferência	15
2.6	Considerações finais	16
3	Ferramentas utilizadas	17
3.1	Câmara anecóica	17
3.2	<i>Software</i>	17
3.2.1	<i>Matlab</i>	17
3.2.2	<i>Adobe Audition</i>	18
3.2.3	<i>Audacity</i>	18
3.3	Dispositivos de entrada e saída	18
3.3.1	<i>Asus Xonar</i>	18
3.3.2	<i>UA 25EX Cakewalk by Roland</i>	19
3.3.3	<i>NAD C340</i>	19
3.4	Microfones	19

3.4.1	<i>Sennheiser Ear Set 1</i>	19
3.4.2	<i>Earthworks M30</i>	20
3.4.3	<i>Shure SM57</i>	20
3.4.4	<i>Work</i>	20
3.5	Altifalantes	20
3.5.1	<i>Yamaha HS80M</i>	20
3.5.2	<i>Adam A7X</i>	21
3.5.3	<i>B&W DM602 S2</i>	21
3.6	Considerações finais	21
4	Procedimento de captura	23
4.1	Metodologia	23
4.2	Estímulos	24
4.2.1	Sweep	24
4.2.2	Dente de serra	25
4.3	Testes preliminares	26
4.4	Testes na câmara anecóica	27
4.5	Considerações finais	28
5	Análise dos sinais	31
5.1	Sweep	31
5.1.1	Espectro do sinal	31
5.1.2	Resposta em frequência dos altifalantes e microfones	33
5.1.3	Atraso de grupo	35
5.2	Dente de serra	38
5.2.1	Espectro do sinal	39
5.2.2	Resposta em frequência dos altifalantes e microfones	39
5.2.3	Atraso de grupo	42
5.3	Considerações finais	44
6	Análise dos resultados	47
6.1	Análise visual	47
6.2	Análise numérica	49
6.3	Análise acústica	50
6.4	Considerações finais	51
7	Conclusão	53
7.1	Análise do trabalho	53
7.2	Desenvolvimentos futuros	54
A	Representação em frequência dos estímulos	55
B	Representação em frequência dos estímulos (captado)	57
C	Resposta em frequência dos conjuntos altifalante e microfone	65
D	Atraso de grupo dos conjuntos altifalante e microfone	73

E	Coeficientes de correlação de Pearson	81
E.1	Comparação de altifalantes	81
E.2	Comparação de microfones	83
E.3	Média dos coeficientes	86
	Referências	87

Lista de Figuras

2.1	Forma de onda simples.	3
2.2	Representação da amplitude e período de um sinal.	4
2.3	Desfasamento entre duas ondas de igual frequência e amplitude.	4
2.4	Representação temporal da onda dente de serra antes (cima) e depois (baixo) de uma distorção aleatória na fase.	5
2.5	Representação de dois sistemas possuidores de fase linear. No primeiro pode-se observar uma descontinuidade na fase.	5
2.6	Princípio da Indução eletromagnética.	6
2.7	Captador piezoelétrico em guitarra clássica.	7
2.8	Microfone de bobina móvel. 1 - Ondas sonoras; 2 - Diafragma; 3 - Bobina; 4 - Íman; 5 - Corrente elétrica (sinal de áudio).	8
2.9	Microfone de condensador. 1 - Ondas sonoras; 2 - Diafragma; 3 - Placa do condensador; 4 - Polarização; 5 - Resistência da carga; 6 - Corrente elétrica (sinal de áudio).	8
2.10	Posição do microfone relativamente ao diagrama polar.	10
2.11	Várias direcionalidades. Da esquerda para a direita: omnidirecional, figura-de-oito, cardióide, supercardióide e hipercardióide.	10
2.12	Resposta em frequência de um microfone dinâmico (Sennheiser e845).	11
2.13	Princípio de funcionamento de um altifalante.	12
2.14	Interior de altifalante.	13
2.15	Coluna de 3 vias (Bowers Wilkins CM Centre 2).	14
2.16	Função transferência de um gravador de cassetes analógico, usando MLS (esquerda) e <i>sweep</i> (direita).	16
4.1	Esquema da metodologia usada nos testes.	24
4.2	Espetrograma relativo ao <i>Sweep</i> linear (esquerda) e ao <i>sweep</i> logarítmico (direita).	25
4.3	Dente de serra ideal representado no domínio temporal.	25
4.4	Dente de serra usado como estímulo.	26
4.5	Espetrograma do <i>sweep</i> linear. Microfone <i>Sennheiser</i> e colunas <i>B&W</i>	27
4.6	Espetrograma do <i>sweep</i> linear. Microfone <i>Earthworks</i> e colunas <i>B&W</i>	28
5.1	Espetro do <i>sweep</i> logarítmico.	32
5.2	Espetro do <i>sweep</i> linear.	33
5.3	Espetro do estímulo.	34
5.4	Espetro do estímulo captado.	34
5.5	Resposta em frequência do conjunto (microfone e altifalante).	35
5.6	Atraso de grupo (derivada da fase).	36
5.7	Atraso de grupo (derivada da fase) + filtragem.	37

5.8	Filtro de validação. Atraso de grupo (esquerda) e representação polar (direita). . .	37
5.9	Atraso de grupo extraído pelo sinal filtrado. <i>Sweep</i> linear (direita) e <i>sweep</i> logarítmico (esquerda).	38
5.10	Espetro do sinal Dente de Serra emitido (esquerda) e captado (direita).	39
5.11	Resposta em frequência do sistema.	40
5.12	Problemas do uso da LPC para detecção de picos.	41
5.13	Espetro original (esquerda), espectro captado (centro) e magnitude da resposta em frequência do sistema (direita).	42
5.14	Atraso de Grupo extraído pelo sinal filtrado para validação.	43
5.15	Atraso de grupo de um conjunto estimulado pelo sinal dente de serra.	44
5.16	Atraso de grupo do sinal dente de serra original.	44
6.1	Comparação da magnitude da resposta em frequência extraída a partir de dois sinais distintos.	49
A.1	<i>Sweep</i> linear - estímulo.	55
A.2	<i>Sweep</i> logarítmico - estímulo.	56
A.3	Dente de serra - estímulo.	56
B.1	Representação em frequência do <i>sweep</i> linear captado (parte 1).	58
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	58
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	58
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	58
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	58
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	58
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	58
B.2	Representação em frequência do <i>sweep</i> linear captado (parte 2).	59
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	59
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	59
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	59
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	59
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	59
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	59
B.3	Representação em frequência do <i>sweep</i> logarítmico captado (parte 1).	60
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	60
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	60
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	60
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	60
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	60
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	60
B.4	Representação em frequência do <i>sweep</i> logarítmico captado (parte 2).	61
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	61
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	61
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	61
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	61
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	61
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	61
B.5	Representação em frequência do dente de serra captado (parte 1).	62
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	62

(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	62
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	62
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	62
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	62
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	62
B.6	Representação em frequência do dente de serra captado (parte 2).	63
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	63
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	63
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	63
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	63
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	63
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	63
C.1	Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> linear (parte 1). . .	66
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	66
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	66
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	66
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	66
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	66
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	66
C.2	Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> linear (parte 2). . .	67
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	67
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	67
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	67
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	67
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	67
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	67
C.3	Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> logarítmico (parte 1). .	68
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	68
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	68
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	68
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	68
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	68
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	68
C.4	Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> logarítmico (parte 2). .	69
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	69
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	69
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	69
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	69
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	69
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	69
C.5	Respostas em frequência do conjunto e interpolação. Estímulo usado: dente de serra (parte 1).	70
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	70
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	70
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	70
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	70
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	70
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	70

C.6	Respostas em frequência do conjunto e interpolação. Estímulo usado: dente de serra (parte 2).	71
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	71
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	71
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	71
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	71
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	71
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	71
D.1	Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> linear (parte 1).	74
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	74
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	74
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	74
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	74
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	74
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	74
D.2	Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> linear (parte 2).	75
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	75
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	75
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	75
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	75
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	75
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	75
D.3	Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> logarítmico (parte 1).	76
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	76
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	76
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	76
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	76
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	76
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	76
D.4	Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: <i>sweep</i> logarítmico (parte 2).	77
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	77
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	77
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	77
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	77
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	77
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	77
D.5	Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: dente de serra (parte 1).	78
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Earthworks.	78
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Sennheiser.	78
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Earthworks.	78
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Sennheiser.	78
(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Earthworks.	78
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Sennheiser.	78
D.6	Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: dente de serra (parte 2).	79
(a)	Altifalante: Adam Microfone: Shure.	79
(b)	Altifalante: Adam Microfone: Work.	79
(c)	Altifalante: B&W Microfone: Shure.	79
(d)	Altifalante: B&W Microfone: Work.	79

(e)	Altifalante: Yamaha Microfone: Shure.	79
(f)	Altifalante: Yamaha Microfone: Work.	79

Lista de Tabelas

6.1	Limites audíveis para atraso de grupo.	51
E.1	Comparação de altifalantes. Microfone comum: <i>Earthworks</i>	81
E.2	Comparação de altifalantes. Microfone comum: <i>Sennheiser</i>	82
E.3	Comparação de altifalantes. Microfone comum: <i>Shure</i>	82
E.4	Comparação de altifalantes. Microfone comum: <i>Work</i>	82
E.5	Comparação de microfones. Altifalante comum: <i>Adam</i>	83
E.6	Comparação de microfones. Altifalante comum: <i>B&W</i>	84
E.7	Comparação de microfones. Altifalante comum: <i>Yamaha</i>	85
E.8	Média dos coeficientes de correlação de Pearson	86

Abreviaturas e Símbolos

CRT	<i>Cathode ray tube</i>
DFT	<i>Discrete Fourier transform</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
IIR	<i>Infinite impulse response</i>
LPC	<i>Linear predictive coding</i>
LTI	<i>Linear time-invariant</i>
MLS	<i>Maximum length sequences</i>
NRD	<i>Normalized relative delay</i>
RMS	<i>Root mean square</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Tema e objetivos

O tema a tratar neste projeto é a caracterização do comportamento em atraso de grupo de transdutores eletroacústicos (altifalantes e microfones).

Por norma, este tipo de dispositivos é caracterizado apenas pela magnitude da sua resposta em frequência que nos dá uma representação do ganho/atenuação do transdutor para todo o espetro sonoro. No entanto, o seu comportamento em termos de fase e da sua derivada (o atraso de grupo) é geralmente descurado. Este atraso de grupo tem de ser constante para que um sinal de onda emitido/recebido pelo transdutor não sofra alterações que se podem revelar perceptíveis para o ouvinte.

O objetivo é caracterizar a resposta em atraso de grupo de diversos dispositivos eletroacústicos, entre eles alguns de precisão, e avaliar o impacto que esta provoca na perceção auditiva.

1.2 Motivação

Sendo prática comum a não inclusão de informação sobre o comportamento em atraso de grupo dos dispositivos eletroacústicos, este projeto pretende evidenciar até que ponto esta situação poderá ser prejudicial para um determinado sinal sonoro e para a sua perceção pelo sistema auditivo humano, pelo facto dos dispositivos poderem ter comportamentos completamente distintos em termos de resposta em fase (e por sua vez atraso de grupo), mesmo possuindo uma resposta em magnitude semelhante.

Uma vez que a audição é um dos meios de ligação mais importantes que o ser humano tem com o mundo que o rodeia, é primordial que, em certas circunstâncias, o sinal sonoro seja conservado da forma mais fidedigna possível. Por exemplo, é possível, através da audição, fazer um reconhecimento do orador, tratando-se de uma capacidade espantosa do ser humano. Para que tal seja possível através de um sinal gravado, é necessário que as características do som original sejam preservadas o mais fielmente possível. Uma das formas de distorção sonora manifesta-se através de diferentes atrasos de certas frequências relativamente a outras.

Em estudos já efetuados é demonstrado, através de uma experiência subjetiva, que o atraso de grupo, sob certas circunstâncias, pode ser perceptível pelo sistema auditivo humano [1]. Este aparece sob a forma de alteração do timbre do som. Um outro estudo envolvendo diversos sujeitos de teste foi igualmente realizado, no qual se pôde apurar quais os valores máximos de atraso de grupo que são possíveis de ouvir [2]. Este valor varia dependendo do sujeito em questão. Foi também descoberto que o sistema auditivo humano fica treinado para discriminar este tipo de distorção à medida que é exposto [2].

O atraso de grupo é ainda mais crítico quando nos referimos a dispositivos de elevada precisão, onde é exigida a melhor qualidade de gravação/reprodução possível. A caracterização em atraso de grupo poderá ser assim determinante para a escolha de um dispositivo relativamente a outros.

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento encontra-se dividido em sete capítulos. No capítulo 1 é feita uma breve introdução ao tema do projeto, para se perceber o que está em causa e quais as implicações associadas. Segue-se no capítulo 2 uma análise das tecnologias atualmente existentes no mercado na área do tema a desenvolver. Nesse capítulo são também explicados alguns conceitos essenciais (atraso de grupo) para que se possa perceber melhor a análise efetuada neste estudo. No capítulo 3 é apresentada a lista das ferramentas usadas. Nesta lista estão incluídos todos os altifalantes e microfones testados, bem como o software usado para análise de sinais sonoros. Segue-se o capítulo 4, no qual será explicada a metodologia usada durante os testes. Nele serão também apresentados os estímulos escolhidos que permitiram a análise do atraso de grupo dos dispositivos.

O capítulo 5 foca-se na análise dos sinais recolhidos, a partir dos quais serão extraídas as diversas características dos transdutores em análise. No capítulo 6 são analisados os diversos resultados previamente recolhidos, tirando-se conclusões sobre o desempenho dos dispositivos. No capítulo 7 é feita uma análise aos resultados do projeto desenvolvido, sendo também indicados alguns pontos de desenvolvimento futuro.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo será detalhada a noção de atraso de grupo de um sinal e serão discutidas as suas implicações no domínio temporal. Além disso, será feito um estudo dos princípios de funcionamento dos transdutores eletroacústicos assim como das suas características mais relevantes.

2.1 Atraso de grupo

Para compreender o que é o atraso de grupo, é necessário antes perceber o funcionamento do som e a forma como ele existe na natureza. O som pode ser descrito como a propagação de vibrações num determinado meio, seja ele sólido, líquido ou gasoso. Este é, eventualmente, captado pelo sistema auditivo dos seres vivos tornando-se assim num meio de interação destes com o ambiente que os rodeia [3].

O som, sendo uma vibração, pode ser representado graficamente numa forma de onda, na qual se representa a sua amplitude em função do tempo, como se ilustra por exemplo na figura 2.1 para a forma de onda sinusoidal.

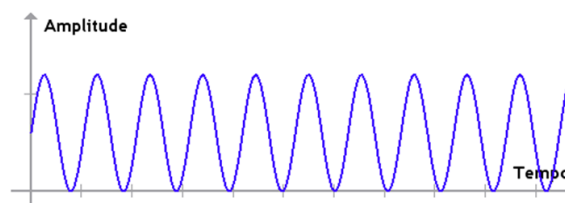


Figura 2.1: Forma de onda simples.

As características mais importantes de um sinal sinusoidal são a sua frequência, amplitude e fase. A amplitude representa a magnitude de vibração de uma onda sonora, a frequência é o número de oscilações efetuadas durante um segundo (inverso do período) e a fase é o ângulo da oscilação na referência temporal $t = 0$ segundos, ou seja, o ângulo inicial. As características de amplitude e período são visíveis na figura 2.2, e a de fase na figura 2.3.

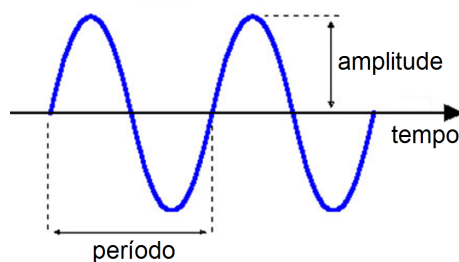


Figura 2.2: Representação da amplitude e período de um sinal.

Um determinado sinal, bem como o comportamento de um sistema (como no caso dos transdutores eletroacústicos), pode ser representado no domínio das frequências, em alternativa ao domínio temporal. Sendo assim, o sinal resultante após este ter passado por um sistema linear e invariante no tempo (LTI), pode ser descrito pela equação [4]

$$Y(j\omega) = H(j\omega).X(j\omega), \quad (2.1)$$

onde Y é o sinal à saída do sistema, X é o sinal de entrada, H é a resposta em frequência do sistema e ω representa a variável de frequência. Em geral, um sistema provoca alterações ao nível da amplitude e da fase para cada uma das componentes do sinal de entrada. Sendo assim esta equação pode ser decomposta em [4]

$$|Y(j\omega)| = |H(j\omega)| \cdot |X(j\omega)|, \quad (2.2)$$

$$\angle Y(j\omega) = \angle H(j\omega) + \angle X(j\omega), \quad (2.3)$$

onde a primeira equação representa a transformação ao nível da magnitude do sinal e a segunda ao nível da sua fase.

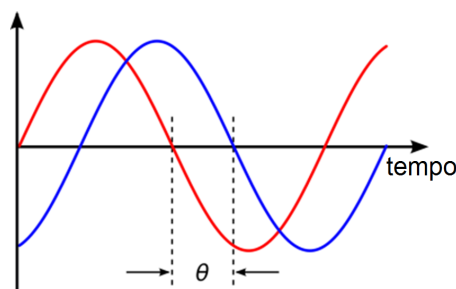


Figura 2.3: Desfasamento entre duas ondas de igual frequência e amplitude [5].

Para que não existam distorções no sinal de saída relativamente ao de entrada, é necessário, em particular, que a magnitude da resposta em frequência do sistema seja constante para todas as frequências afetadas no sinal X . No caso da fase, o valor a ser somado para cada uma das componentes da frequências pode levar a que a relação entre cada uma delas se altere, modificando

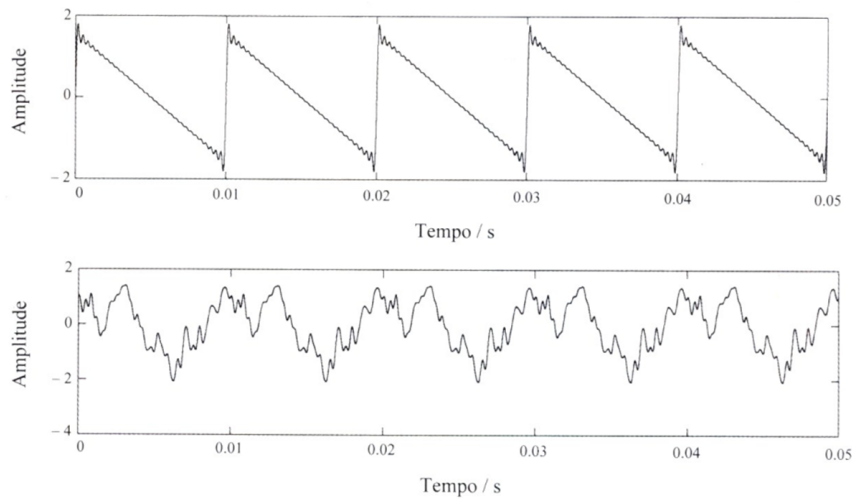


Figura 2.4: Representação temporal da onda dente de serra antes (cima) e depois (baixo) de uma distorção aleatória na fase [3].

assim o sinal de saída. Apesar de estes dois aspetos poderem provocar a distorção de um sinal de áudio, apenas o primeiro é por norma considerado.

Podemos ver um exemplo na figura 2.4 onde o sinal em forma de dente de serra apenas é afetado por distorção ao nível da fase.

Como se pode comprovar, o nível de distorção introduzido é bastante elevado, sendo por isso expectável alterações ao nível da sonoridade.

Para que não exista distorção decorrente da alteração da fase do sinal, é necessário que o sistema pelo qual ele passa seja de fase linear, isto é, a sua fase tem de ser uma função linear da frequência, excluindo possíveis saltos de $\pm\pi$. Na figura 2.5 estão representados dois exemplos de sistemas de fase linear:

O atraso de grupo é definido [4] por:

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\angle H(j\omega)}{d\omega}. \quad (2.4)$$

Analisando a fórmula, pode-se ver que o atraso de grupo é na realidade o simétrico da derivada do gráfico representativo da fase de um sistema, em ordem à frequência. Tendo a fase de ser

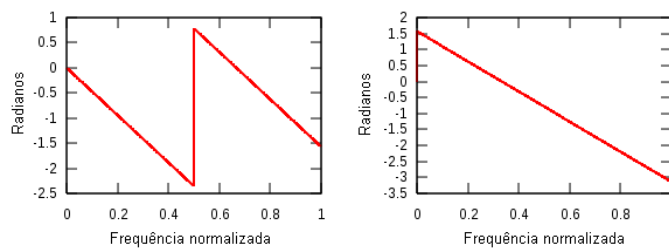


Figura 2.5: Representação de dois sistemas possuidores de fase linear. No primeiro pode-se observar uma descontinuidade na fase [6].

linear, conclui-se assim que para que um sistema não provoque distorções (ao nível da fase) a um determinado sinal, o atraso de grupo tem de ser constante ao longo das frequências.

2.2 Transdutores eletroacústicos

Um transdutor eletroacústico é um dispositivo que permite a conversão de energia elétrica em mecânica, conduzindo à geração de ondas sonoras. O processo contrário também é possível, através da conversão da energia proveniente da pressão sonora em energia elétrica. Dois dispositivos encarregues de efetuar tal operação são o altifalante e o microfone, respetivamente.

Para se conseguir fazer a conversão entre estes dois tipos de energia são usados certos materiais e propriedades físicas, que permitem assim produzir o efeito desejado. Ao longo dos anos foram produzidos transdutores eletromecânicos dos mais diversos tipos, mas atualmente os mais usados são os de bobina móvel, piezoelétricos e eletrostáticos. Segue-se uma breve descrição do princípio de funcionamento de cada um destes tipos de transdutores.

2.2.1 Transdutor de bobina móvel

Também conhecido como dinâmico, este é o tipo de dispositivo mais usado em altifalantes e um dos mais populares na produção de microfones. Quando um campo magnético é alterado junto de uma bobina, ocorre nesta uma indução de corrente elétrica. Este efeito é conhecido pela Lei de *Faraday-Neumann-Lenz*. O caso contrário também é verdade, ou seja, ao fornecer uma corrente elétrica à bobina, é criado um campo magnético. Este último efeito é conhecido pela Lei de *Ampère*. É baseado nestes princípios que este tipo de dispositivo funciona.

Na figura 2.6 pode-se observar que quando o ímã se movimenta dentro da bobina, é criada uma corrente elétrica. Assim que ele pára, essa corrente é interrompida. Ao fazer o movimento contrário é criada outra vez uma corrente mas, neste caso, no sentido oposto.

2.2.2 Transdutor piezoelétrico

Este tipo de transdutor faz uso de materiais que possuem uma propriedade especial. Os materiais piezoelétricos (por exemplo o quartzo), quando sujeitos a uma tensão mecânica, originam um

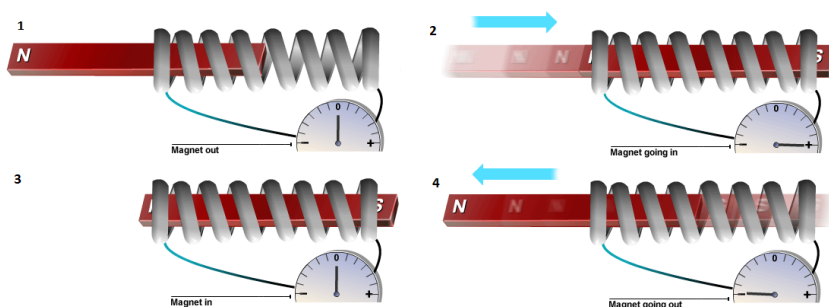


Figura 2.6: Princípio da Indução eletromagnética [7].

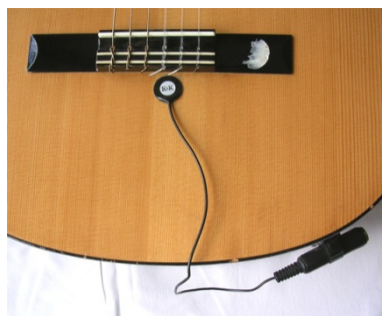


Figura 2.7: Captador piezoelétrico em guitarra clássica [8].

campo elétrico de intensidade proporcional à força que os comprime [3]. De igual modo, ao aplicar uma tensão no material este vibra, produzindo assim som. A utilização deste tipo de material para a produção de microfones e altifalantes é reservada a algumas aplicações com fins especiais, como captadores usados em instrumentos musicais ou na produção de sonares. Na figura 2.7 podemos ver este tipo de dispositivo aplicado numa guitarra clássica. Visto esta tecnologia de transdutores não ser usada de uma forma generalizada para o propósito em estudo neste projeto, estes não serão analisados em detalhe.

2.2.3 Transdutor eletrostático

O transdutor eletrostático tem como base de funcionamento o condensador. Este é formado por duas placas paralelas. No caso do microfone, uma delas é a superfície que permite a receção das ondas sonoras. A sua utilização é mais frequente em microfones, sendo o seu uso em altifalantes pouco comum. Apesar do componente base ser o mesmo, o modo como este é implementado para cada um dos casos é diferente. Sendo assim, será feita uma explicação do funcionamento de cada um deles na secção que lhes é destinada.

2.3 Microfone

Será agora feita uma análise mais detalhada dos microfones, identificando as características mais importantes que permitem a sua distinção, bem como o modo como eles funcionam. Serão estudados aqueles que são mais usados na captação de música e voz cantada.

2.3.1 Elemento

O elemento é o dispositivo presente dentro da cápsula do microfone, sendo o responsável por converter a energia mecânica proveniente do som em energia elétrica. Trata-se na realidade do transdutor eletroacústico. Dos tipos de transdutores brevemente estudados na secção anterior, os mais vulgares na produção de microfones são os de bobina móvel e os de condensador.

Na figura 2.8 podemos ver um esquema simplificado de um microfone de bobina móvel. Este é constituído por um diafragma que está ligado fisicamente a uma bobina, onde no seu interior

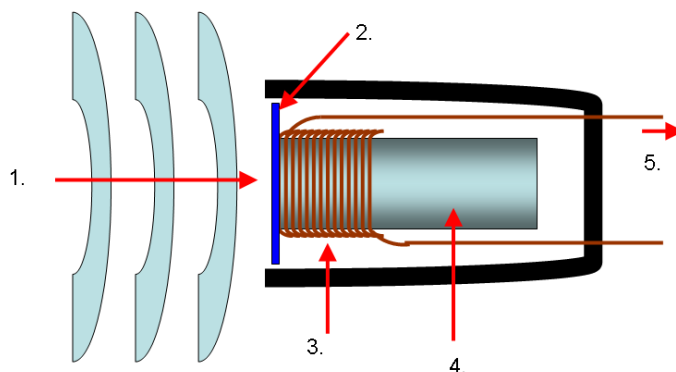


Figura 2.8: Microfone de bobina móvel. 1 - Ondas sonoras; 2 - Diafragma; 3 - Bobina; 4 - Íman; 5 - Corrente elétrica (sinal de áudio) [9].

está presente um íman permanente. Devido à pressão exercida pelas ondas sonoras, o diafragma do dispositivo vibra e, junto com ele, a bobina que lhe está acoplada. Como foi estudado na secção 2.2.1, o movimento da bobina dentro do campo magnético criado pelo íman permanente origina uma corrente nesta. A intensidade dessa mesma corrente é proporcional ao deslocamento da bobina móvel [3]. Pretende-se que a massa do conjunto bobina e diafragma seja a menor possível, para que a sua resistência à transferência de energia proveniente das ondas sonoras seja mínima. Um tipo de material usado na construção do diafragma é o *MylarTM*, uma película de poliéster fabricada pela *DuPont Company* [10]. Este material é bastante resistente e suporta bem as mudanças de temperatura e humidade, daí que seja ótimo para eventos ao ar livre. Anteriormente era usada uma película de alumínio, tendo o inconveniente de ser bastante frágil. Como o conjunto diafragma e bobina tem alguma massa (sendo a bobina a mais pesada) estes vão ter frequências de ressonância geralmente perto dos 350 Hz. Para isso são usadas várias técnicas e outros componentes para tornar a resposta do microfone o mais constante possível para as várias frequências.

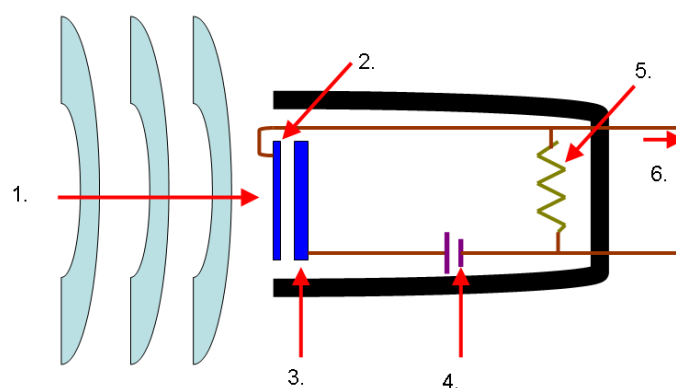


Figura 2.9: Microfone de condensador. 1 - Ondas sonoras; 2 - Diafragma; 3 - Placa do condensador; 4 - Polarização; 5 - Resistência da carga; 6 - Corrente elétrica (sinal de áudio) [9].

Na figura 2.9 podemos ver um esquema simplificado de um microfone de condensador. Este é

constituído por duas placas, sendo que uma delas é fixa e a outra móvel. Esta última é na realidade o diafragma do microfone e possui uma baixíssima espessura. Estas duas placas formam um condensador que é o elemento chave para o seu funcionamento. O seu princípio de funcionamento é bastante simples. Como uma das placas do condensador é fixa e a outra é móvel, a distância entre elas muda com a vibração recebida pelo diafragma na presença de uma onda sonora. Para um condensador de placas paralelas, a sua capacidade é dada por [11]

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}, \quad (2.5)$$

onde C é a capacidade do condensador, A representa a área das placas metálicas, d a distância entre elas e ϵ_0 a constante de permissividade elétrica no vácuo. Através da expressão 2.5 pode-se concluir que com a alteração da distância entre as placas do condensador, a sua capacidade também é alterada. Sabe-se ainda que [11]

$$C \equiv \frac{Q}{V}, \quad (2.6)$$

onde C é capacidade do condensador, Q a sua carga e V a sua tensão.

A carga no condensador é mantida a um nível praticamente constante, visto este ser projetado de maneira a ser um filtro passa alto relativamente ao som. Sendo assim, existe uma alteração da tensão nos terminais do condensador quando a sua capacidade é alterada. Esta diferença de tensão entre o condensador e a fonte que o está a polarizar modula uma corrente na resistência de carga. O potencial entre os terminais dessa resistência representa o sinal de áudio captado. Devido à alta impedância deste circuito, o sinal é encaminhado para um pré-amplificador.

Os microfones de condensador apresentam algumas vantagens [10], nomeadamente em relação aos de bobina móvel:

- Diafragma mais pequeno e leve, reduzindo o ruído proveniente das vibrações do microfone;
- Resposta em frequência bastante uniforme e de banda mais extensa;
- Capacidade de medir pressões sonoras bastante elevadas;
- Baixo nível de ruído.

No entanto este tipo de microfone também tem inconvenientes, como o facto de necessitar de alimentação adicional, além de tipicamente o seu preço ser superior.

2.3.2 Direcionalidade

Os microfones podem ser classificados de acordo com o modo como captam os sons provenientes de diferentes direções. Este é tipicamente representado na forma de um diagrama polar, que revela de que zonas é que o microfone admite os sons.

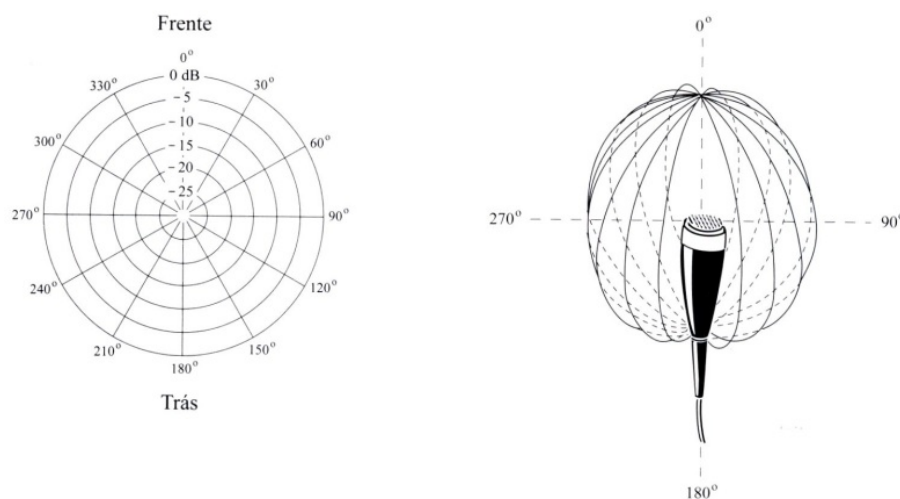


Figura 2.10: Posição do microfone relativamente ao diagrama polar [3].

As principais variantes existentes quanto à direcionalidade são: omnidirecional, unidirecional e bidirecional. Os microfones unidirecionais são também conhecidos como cardióides e os bidirecionais como figura-de-oito, devido às suas representações do diagrama polar.

A direcionalidade a escolher depende do uso que se pretende dar ao microfone. Para gravar um discurso, um microfone omnidirecional poderá não ser a melhor escolha, uma vez que capta todos os ruídos envolventes.

2.3.3 Sensibilidade

Outra característica importante nos microfones é a sensibilidade. Esta indica, tal como o nome sugere, a variabilidade de amplitude que o microfone apresenta quando estimulado por um determinado som. Quanto mais sensível for o microfone, maior será o nível elétrico na saída relativamente à pressão sonora recebida. Por norma os microfones de condensador são mais sensíveis que os de bobina móvel. A unidade usada é geralmente o mV/Pa ou o dBV, e quanto mais elevado é o seu valor, maior é a sensibilidade.

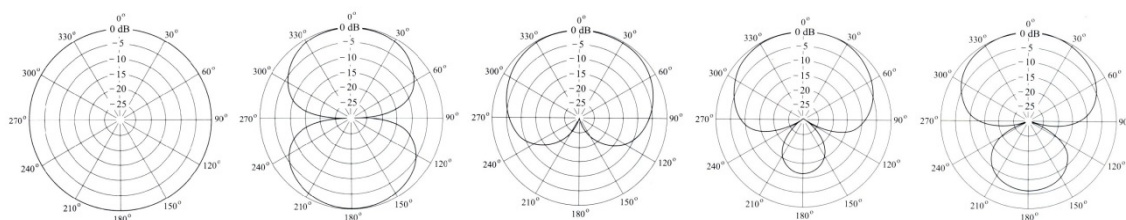


Figura 2.11: Várias direcionalidades. Da esquerda para a direita: omnidirecional, figura-de-oito, cardióide, supercardióide e hipercardióide [3].

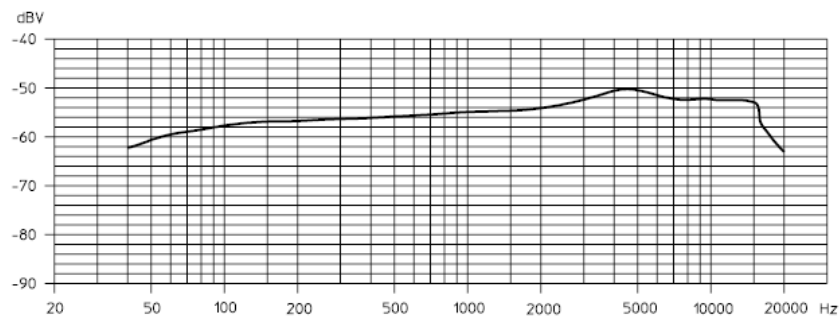


Figura 2.12: Resposta em frequência de um microfone dinâmico (Sennheiser e845) [12].

2.3.4 Resposta em frequência

A resposta em frequência, normalmente representada pelo gráfico da magnitude de um diagrama de Bode, indica-nos o ganho que o microfone apresenta ao longo do espectro das frequências. O ideal seria o microfone apresentar uma resposta plana ao longo de todas as frequências de operação.

2.3.5 Impedância

Esta é outra característica de grande importância na escolha de um microfone. A unidade de medida é o Ohm (Ω). Quanto menor for a impedância de um microfone, melhor será o seu desempenho. Um microfone de uso profissional tem por norma uma impedância de aproximadamente 200 ohms [10].

Os microfones de elevada impedância estão limitados no comprimento do seu cabo de ligação, podendo ter apenas 5 metros. Isto acontece porque a sua impedância, em conjunto com a capacidade que o cabo apresenta formam um filtro passa baixo, fazendo com que as frequências mais altas comecem a ser bastante atenuadas. Existe também o problema de estes serem mais suscetíveis ao ruído.

2.4 Altifalante

Nesta secção irá ser abordada a temática dos altifalantes, procurando perceber melhor o seu funcionamento e quais as características mais importantes a ter em conta no momento da sua escolha.

2.4.1 Transdutor

Como já foi visto anteriormente, este é o elemento responsável por converter a energia elétrica em energia sonora, no caso do altifalante. Ao longo dos anos apareceram e desapareceram diversas tecnologias responsáveis por fazer este tipo de conversão. Atualmente, os tipos de transdutores que têm maior presença no mercado na produção de altifalantes são os eletrodinâmicos, os eletrostáticos e os piezoelétricos. Os transdutores eletrodinâmicos são os mais vulgarmente

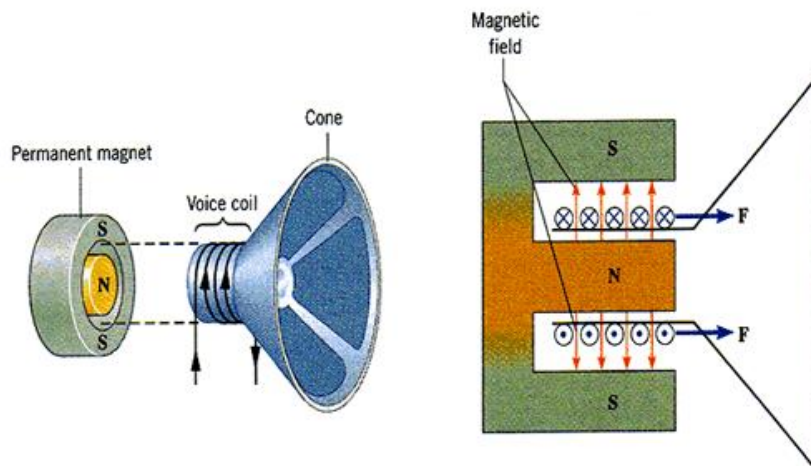


Figura 2.13: Princípio de funcionamento de um altifalante [13].

usados na construção de altifalantes para reprodução de música e voz cantada. Por essa razão, apenas esses serão objeto de estudo nesta secção. Tal como foi visto na secção 2.2.1, o princípio de funcionamento de um altifalante eletrodinâmico é baseado na existência de uma bobina que está sob o efeito de um campo magnético. Quando um eletrão se encontra em movimento dentro de um campo magnético, é exercida uma força sobre este. Esta força pode ser calculada [11] pela formula:

$$f = j \times B \quad (2.7)$$

onde j é o vetor de deslocamento do eletrão, B o vetor do campo magnético e f o vetor da força resultante.

O altifalante é composto por um ímã permanente que cria um campo magnético no seu interior. Sob o efeito desse campo magnético existe uma bobina, que por sua vez está ligada a um diafragma em forma de cone. Quando uma corrente percorre esta bobina, é criada uma força que a faz deslocar. Fazendo inverter o sentido da corrente, a força passa a ser feita no sentido contrário. É através destes movimentos do diafragma que é produzido o som.

A criação do campo magnético tal como ilustrado na figura 2.13, geralmente é conseguida usando um ímã, um *back plate + pole piece* e um *front plate* [10]. O *back plate* e o *pole piece* estão encarregues de estender um dos polos do ímã para o interior da bobina, enquanto o *front plate* estende o outro polo para o seu exterior.

Na figura 2.14 é possível ver a bobina em cobre, o ímã, o *back plate* ligado na parte inferior deste, o *pole piece* que está ligado ao *back plate*, o *front plate* que se encontra em cima do ímã, o cone (diafragma) e o seu sistema de suspensão. De notar que a bobina se encontra no espaço formado entre o *pole piece* e o *front plate*, ou seja, os polos do ímã.

O material mais barato usado para produzir os cones dos altifalantes é o papel [10]. Este pode ser feito de uma folha de papel que é depois enrolada em cone ou então moldado a partir de pasta de papel. No entanto, as empresas que projetam e produzem os altifalantes têm vindo a usar cada



Figura 2.14: Interior de altifalante [14].

vez mais outros materiais, como plásticos, fibra de carbono, kevlar, entre outros. Para proteger a bobina de poeiras que a podiam danificar, é usado no centro do cone uma tampa que a mantém isolada. Esta é conhecida como *dust cap* e a sua forma e materiais usados no fabrico são dos mais diversos, uma vez que, para além da sua função de proteger a bobina, também tem influência no som emitido pelo altifalante [10].

2.4.2 Sensibilidade

Num altifalante, a sensibilidade indica a capacidade do dispositivo em produzir energia sonora a partir de um sinal elétrico de entrada. Para que seja possível comparar a sensibilidade entre diferentes dispositivos, tiveram de ser criados *standards* que indicam que tipo de testes devem ser efetuados e em que condições.

O *standard* mais comumente usado é o dB-SPL. Este teste é feito a um metro de distância do dispositivo, aplicando um sinal de entrada com 1 Watt de potência. Este sinal é convertido para 2,83 Vrms para uma impedância de 8 ohms.

Assim sendo, um altifalante tem a capacidade de produzir maior intensidade sonora a partir da mesma entrada quanto maior for a sua sensibilidade em dB.

2.4.3 Sistemas de múltiplas vias

Em muitos dispositivos de reprodução de música são utilizadas colunas compostas por vários altifalantes. Cada altifalante é dedicado para a reprodução de uma certa gama de frequências, tendo estes diferentes tamanhos e geometrias. Um altifalante projetado para reproduzir sons graves tem por norma um tamanho grande, uma vez que esta geometria exige menor quantidade de energia e permite a existência de um curso de suspensão mais curto relativamente a um altifalante de menores dimensões. Já um altifalante para reproduzir sons bastante agudos (*tweeter*) é por norma



Figura 2.15: Coluna de 3 vias (Bowers Wilkins CM Centre 2) [15].

pequeno, levando a que o sistema bobina + cone apresente menor massa, possibilitando vibrações a frequências mais altas sem haver deformação do seu formato.

Tal diferenciação deve-se à incapacidade de um único altifalante conseguir reproduzir de forma satisfatória sons provenientes de todas as regiões audíveis do espectro sonoro. Apenas é usado um único altifalante em sistemas de reprodução de voz ou de baixo custo.

O número de vias de uma coluna indica-nos o número de altifalantes dedicados a reproduzir diferentes regiões do espectro sonoro.

Como se pode ver na figura 2.15, um sistema de N vias pode ter mais que N altifalantes, havendo neste caso dois altifalantes dedicados à reprodução dos sons graves.

Para se fazer a divisão das frequências destinadas a cada um dos tipos de altifalantes são usados filtros *crossover*.

2.4.4 Filtro crossover

O crossover é um filtro analógico ou digital que tem como função separar as regiões do espectro sonoro destinadas a diferentes tipos de altifalantes presentes num sistema de múltiplas vias. Este filtro pode ser do tipo:

- **Passa-baixo** – deixa passar apenas as frequências abaixo de um determinado limiar, atenuando as restantes;
- **Passa-alto** – deixa passar apenas as frequências acima de um determinado limiar, atenuando as restantes;
- **Passa-banda** - deixa passar apenas as frequências compreendidas entre dois valores, atenuando as restantes.

O tipo mais simples de filtro é o de 1^a ordem, em que o sinal na região de atenuação decresce 10dB/década podendo, no entanto, ser de maior ordem [10]. Num sistema de altifalantes passivo, a ordem vai tipicamente até a um valor máximo de 3, sendo utilizados filtros ativos para ordens mais elevadas. A frequência a partir da qual o filtro começa a atenuar tem de ser adaptada caso a caso, conforme os altifalantes que o construtor coloca num determinado sistema.

2.4.5 Resposta em frequência

Apesar da resposta em frequência ser um dos aspetos mais importantes na caracterização da performance musical de um altifalante, esta é por vezes omitida pelo fabricante ou representada parcialmente, induzindo em erro o consumidor. Por norma, esta vem facultada sob a forma: $xx \text{ Hz} - yy \text{ kHz} (\pm 3\text{dB})$ onde xx e yy representam as frequências mais baixa e mais alta, respetivamente, que o altifalante ou sistema consegue reproduzir com uma margem de 3dB da frequência mais audível para a menos audível.

No entanto, por vezes não é divulgado o valor em dB entre a frequência mais e menos audível. O fabricante indica assim apenas a gama de frequências que o altifalante consegue reproduzir, podendo em alguns casos serem reproduzidas frequências com um volume bastante baixo ou até inaudível. É portanto de grande relevo que se tenha em atenção estes detalhes no momento da escolha de um sistema de som.

2.4.6 Impedância e potência

A impedância é indicada nas características de um altifalante pelo seu valor nominal. No entanto esta muda em função da frequência. Sendo assim, é aconselhado que se encontre o seu valor mínimo num gráfico impedância-frequência, fornecido pelo fabricante do equipamento. No entanto, este tipo de gráfico nem sempre está disponível.

Esta é uma característica bastante importante a ter em atenção. Um caso que pode levar à destruição de sistemas de amplificação é a sua utilização com altifalantes com impedância menor que o valor mínimo suportado, visto aqueles não terem capacidade para fornecer a corrente necessária para uma impedância tão baixa.

Os altifalantes costumam também ser especificados com um valor de potência. Por vezes o valor indicado é o de pico, o que não é o mais correto. O que se deve procurar saber é a potência RMS (*Root Mean Square*), que dá uma aproximação mais real da potência do altifalante. No entanto, este valor de potência não é constante, alterando-se conforme a frequência do sinal de entrada. Sendo assim, o valor indicado deve servir apenas como guia, não devendo ser considerado como critério único na escolha do altifalante.

2.5 Métodos de calcular funções transferência

Ao longo das últimas décadas, diferentes técnicas para encontrar a função transferência de dispositivos áudio foram desenvolvidas. Todas elas funcionam pelo princípio da estimulação do dispositivo através de um sinal, sendo depois o resultado captado e através de alguns métodos então criados, comparado com o sinal original. Um aspeto importante a ter em conta é o ruído de fundo e o comportamento acústico do local onde estes testes são realizados, apesar de existirem metodologias mais imunes a este tipo de problemas. Apesar de, historicamente, existirem diversos métodos que foram criados, evoluídos e descartados ao longo dos tempos, irá apenas ser feita uma breve comparação nos dois tipos mais usados atualmente.

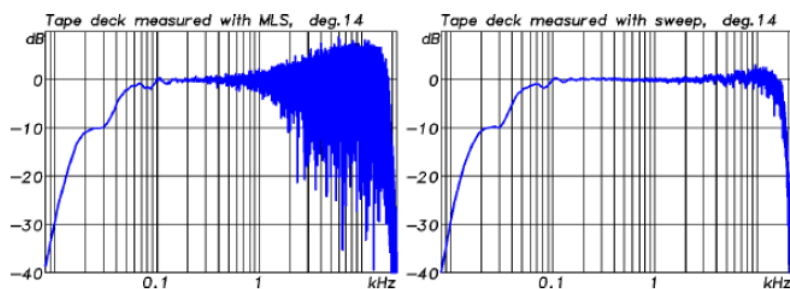


Figura 2.16: Função transferência de um gravador de cassetes analógico, usando MLS (esquerda) e *sweep* (direita) [16].

Um tipo de método que ainda é bastante popular para este tipo de medições são os baseados em MLS (*Maximum length sequences*). Este método usa uma sequência pseudoaleatória para, a partir daí, criar o sinal de áudio a ser usado como estímulo. Outro método igualmente popular provém do uso de um sinal *sweep*, que é um sinal sinusoidal que varia continuamente e de modo crescente a sua frequência. Uma pormenorizada comparação foi já realizada [16] onde são descritas as diversas vantagens que um método que utiliza o sinal *sweep* como estímulo tem sobre um método com base no MLS. Uma das vantagens pode ser vista na figura 2.16, onde é visível a subida de qualidade do sinal após processamento quando utilizado um sinal *sweep* como estímulo. Após uma extensa pesquisa, não foram encontrados outros artigos que fizessem comparação entre métodos de extração de características de altifalantes e microfones, nomeadamente do atraso de grupo.

Além disso, um sinal de *sweep* permite uma melhor extração das características da fase, factor que irá facilitar o processamento após a recolha dos sinais. Visto esse ser um dos objetivos principais deste projeto (bem como a posterior análise do atraso de grupo), o sinal *sweep* apresenta-se assim como a escolha preferencial.

2.6 Considerações finais

Neste capítulo foi discutido o conceito de atraso de grupo e a influência que este tem no estudo comparativo das características de microfones e altifalantes.

Após a análise dos diversos tipos de transdutores depreende-se que o atraso de grupo, apesar de se apresentar como uma característica importante no que respeita à distorção do sinal, é frequentemente ocultado ao consumidor final, não permitindo um conhecimento total do nível de distorção que o dispositivo introduz no sinal recebido.

Uma completa caracterização destes dispositivos é uma tarefa de grande complexidade e os resultados obtidos são de difícil interpretação para grande parte das pessoas. Por essa razão, os dispositivos vêm com caracterizações de mais simples leitura, mas que nem sempre revelam a verdadeira qualidade sonora do dispositivo. Dispositivos com características equivalentes podem, em alguns casos, ter desempenhos significativamente distintos.

Capítulo 3

Ferramentas utilizadas

Neste capítulo é feita uma listagem de todo o material e ferramentas que foram usados, nomeadamente na preparação dos sinais de testes, os dispositivos de reprodução e gravação que foram sujeitos a análise, bem como o software de processamento usado na etapa final da extração das características destes dispositivos.

3.1 Câmara anecóica

Uma câmara anecóica é um espaço onde o teto, as paredes e o chão estão revestidos de um material especial com uma forma própria, projetada para absorver as ondas produzidas no seu interior, evitando reflexões e permitindo o isolamento relativamente ao exterior da câmara.

No caso da câmara anecóica disponível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, esta foi projetada para ser usada com fontes de ondas eletromagnéticas, e não com fontes sonoras. No entanto, esta apresenta algumas características que permitem um desempenho acústico acima de qualquer outra sala disponível atualmente para os testes a realizar, no campus da Faculdade.

3.2 *Software*

O software é uma ferramenta fundamental no tratamento de sinais sonoros. De seguida são apresentadas as aplicações que foram utilizadas na criação dos sinais de estímulo e posterior processamento para extração de características.

3.2.1 *Matlab*

O *Matlab* é uma ferramenta matemática bastante usada em engenharia permitindo a manipulação de vetores e cálculo de transformadas, funcionalidade bastante importante no processamento de sinais sonoros.

Nesta ferramenta foram criados os sinais digitais que foram usados como estímulo nos altifalantes. Estes sinais, após terem sido adquiridos pelos microfones, foram processados utilizando

funções disponíveis neste software e, numa última fase, foram criados gráficos que permitiram analisar os resultados obtidos.

3.2.2 *Adobe Audition*

Este software é propriedade da Adobe e é vocacionado para a gravação, edição e processamento de ficheiros de áudio.

Foi a ferramenta utilizada para a reprodução e aquisição dos sinais de estímulo. Uma das funcionalidades que se revelou bastante útil neste software, foi a possibilidade de visualizar o espectrograma do sinal de áudio em tempo real. Tal possibilitou a validação da receção durante os testes. Este software foi também usado para segmentar os sinais de áudio recebidos, para assim facilitar o processamento em ambiente *Matlab*.

3.2.3 *Audacity*

Trata-se de um software gratuito de gravação e edição de áudio. Apesar de não ser tão poderoso como o Adobe Audition, foi usado algumas vezes como recurso rápido, nomeadamente no cálculo do espectro do sinal ao longo de um segmento temporal e na execução de alguns testes preliminares.

Na execução dos testes definitivos e sua posterior segmentação e análise, o seu uso foi descartado, principalmente devido à familiarização com a interface do Adobe Audition e suas ferramentas.

3.3 Dispositivos de entrada e saída

Este tipo de dispositivos possibilita o envio do som para as colunas e a ligação de microfones com conexão XLR para posterior pré amplificação do sinal recebido. No primeiro caso trata-se de uma placa de som que se encontra instalada internamente no computador, enquanto no segundo se trata de um dispositivo externo de ligação por USB. Segue-se uma descrição mais detalhada destes dispositivos.

3.3.1 *Asus Xonar*

Este modelo de placa de som produzido pela Asus, consegue proporcionar qualidade sonora bem acima de qualquer outro sistema de áudio embutido presente na maioria dos computadores.

Esta placa de som foi utilizada como saída do sinal, fazendo assim atuar os altifalantes. Segundo o fabricante, este dispositivo possui um nível de SNR de 116dB na saída de som estéreo frontal e uma distorção harmónica de apenas 0.00056% para uma frequência de 1 kHz.

Dentro do material disponível, esta foi a melhor escolha para os propósitos do estudo.

3.3.2 UA 25EX Cakewalk by Roland

Este foi o dispositivo utilizado para fazer a ligação entre o microfone e o computador. O facto de apenas necessitar de uma ligação USB para funcionar torna-o numa mais-valia face a outras soluções. Tem capacidade para fazer gravação em 24 bits com 96 kHz de frequência de amostragem, tornando-o assim num dispositivo com qualidade apropriada para o uso num contexto de estúdio.

A grande variedade de entradas e saídas é também uma característica que reforça a sua utilidade. No caso desta captura em específico, foi utilizada uma das entradas XLR, tendo sido ativado o botão de phantom power (48V) nos casos em que foram usados microfones de condensador.

3.3.3 NAD C340

Este amplificador foi necessário para servir como interface entre o computador que possui a placa de som ASUS e as colunas B&W, visto estas serem um modelo passivo. O dispositivo consegue alimentar umas colunas com impedância de 8 Ohm (que é o caso das B&W) e possui um SNR entre 90dB e 104dB, sendo o valor exato dependente da potência de emissão. O valor de distorção harmónica é menor que 0,03% para uma gama de 20 Hz até 20 kHz.

Em todo o caso, este não pode ser considerado um ponto negativo das colunas B&W, visto que os outros dois modelos possuem uma amplificação integrada nos próprios equipamentos.

3.4 Microfones

Durante as experiências realizadas na câmara anecóica, foram utilizados no total quatro microfones de tecnologias de captação diferentes e com objetivos de utilização dos mais diversos tipos. À exceção do modelo da *Sennheiser*, todos eles possuem uma ligação XLR, o que possibilita a conexão direta com a interface de captação de áudio. No caso daquele modelo em específico, foi usado um conversor da própria marca.

Em seguida pode-se encontrar uma descrição dos diversos microfones e suas principais características.

3.4.1 Sennheiser Ear Set 1

Este microfone foi desenhado para ser usado em palcos e noutras situações em que o uso livre das mãos por parte de quem o usa o justifica. O facto de ser tão pequeno e ter a capacidade de associar outros equipamentos, pode torná-lo num dispositivo sem fios, conferindo-lhe ainda maior mobilidade.

Tem um padrão de captura omnidirecional e necessita de alimentação externa para funcionar, ou seja, *phantom power*.

3.4.2 *Earthworks M30*

Trata-se de um microfone de medição especialmente vocacionado para situações como as que foram proporcionadas nos testes realizados. Juntamente com ele é enviado pelo fabricante o resultado da sua resposta em frequência efetuado naquele equipamento em específico.

Tal como o modelo anterior, também este tem a mesma característica omnidirecional e necessita igualmente de alimentação externa para ser polarizado. Sendo um equipamento de elevada precisão, este é o microfone com melhor resposta em frequência de entre todos os utilizados durante os testes na câmara anecóica.

3.4.3 *Shure SM57*

O *Shure SM57* é um microfone dinâmico, ou seja, baseia-se na tecnologia do transdutor de bobina, logo não necessita de alimentação a partir do *phantom power* da placa de captura. Assim sendo, o interruptor de *phantom power* é desligado.

Este dispositivo foi construído e otimizado para a captura de sons provenientes de instrumentos musicais, sendo uma referência a nível mundial para esse uso. Tem um padrão de captura de formato cardióide, mas tal não se revelou um problema devido à metodologia que foi empregue nos testes.

3.4.4 *Work*

Este microfone é igualmente dinâmico. Comparativamente aos outros microfones usados nos testes, este é um modelo de menor qualidade. Não foi possível obter as suas especificações, devido à inexistência de informação sobre o dispositivo na internet. O seu uso serve como meio de comparação entre dispositivos com qualidade e finalidade diferentes. Deste modo é possível comparar microfones vocacionados para ambientes profissionais, com um relativamente barato para uso amador.

3.5 Altifalantes

Para os testes que foram realizados durante o processo de recolha, escolheram-se no total três altifalantes. Uma característica que todos possuem em comum é a divisão do sinal sonoro por duas vias, uma dedicada aos sinais mais graves e médios e outra orientada a sinais de elevada frequência.

Mais detalhes sobre cada um dos dispositivos são fornecidos a seguir.

3.5.1 *Yamaha HS80M*

O modelo *HS80M* é produzido pela *Yamaha* e é um altifalante de duas vias, ou seja, é constituído por duas fontes sonoras: um cone de grandes dimensões para a reprodução dos sons graves

e médios, e um *tweeter* para os sons médios e agudos. O filtro de *crossover* responsável por esta divisão atua aos 2 kHz.

Tratando-se de altifalantes ativos, não necessitam de ser ligados a um amplificador, visto terem já amplificação interna. No caso deste dispositivo, este possui dois níveis de amplificação.

Este modelo encontra-se blindado contra interferências eletromagnéticas. Isto é especialmente útil para manter a qualidade sonora junto de fontes geradoras de instabilidade, como por exemplo monitores CRT (*Cathode ray tube*).

Segundo o fabricante, este modelo tem a capacidade de reproduzir sons numa gama entre os 42 Hz e os 20 kHz, com uma atenuação máxima de 10dB.

3.5.2 Adam A7X

Este modelo criado pela *Adam* possui igualmente duas vias. No entanto, o *tweeter* deste dispositivo tem uma forma e modo de funcionamento diferentes, sendo constituído por uma película metálica dobrada em forma de acordeão que comprime e expande ao ritmo da onda sonora. Desta forma, segundo o fabricante, consegue-se obter melhores resultados comparativamente ao desenho convencional.

Tal como os altifalantes anteriores, também estes são ativos, podendo ser ligados diretamente a um reproduzidor de áudio como um computador ou telemóvel. Este modelo não se encontra blindado contra interferências eletromagnéticas.

O fabricante assegura uma reprodução de sinais sonoros entre os 42 Hz e os 50 kHz, não sendo no entanto indicado com que amplitude é que essa reprodução pode ser feita. Sendo assim, determinada frequência pode ser produzida pelo equipamento, mas a um nível não audível. Além disso, o limite máximo nas altas frequências excede de longe a capacidade auditiva do ser humano, comprovando-se assim a grande capacidade do desenho alternativo do *tweeter*. A frequência de *crossover* destas colunas *Adam* encontra-se nos 2,5 kHz.

3.5.3 B&W DM602 S2

Este foi o terceiro e último altifalante utilizado nos testes, possuindo igualmente duas vias para a reprodução sonora. Contrariamente aos outros altifalantes até agora apresentados, o modelo *DM602 S2* produzido pela *Bowers & Wilkins* é passivo, necessitando de amplificação externa. Tal missão ficou a cargo do amplificador *NAD C340*.

Segundo a ficha técnica deste dispositivo, é possível uma reprodução entre os 52 Hz e os 20 kHz, com uma variação de 3dB relativamente à referência. A frequência de *crossover* situa-se nos 4 kHz para este modelo.

3.6 Considerações finais

No que diz respeito ao software, o facto de ter sido usado o *Matlab* revelou-se como uma vantagem, visto ser uma ferramenta da qual já havia alguma familiarização de alguns projetos

anteriormente desenvolvidos. A sua versatilidade é também um ponto a favor.

Quanto ao hardware, apesar de já ter algum conhecimento básico no manuseio de altifalantes, o uso deste tipo de equipamento de grande qualidade e valor, implica sempre um cuidado adicional. Em termos de microfones, a aquisição feita por parte de equipamentos de tecnologia baseada em condensador utilizando *phantom power* é uma experiência totalmente nova, tendo sido recebida com grande expectativa.

Capítulo 4

Procedimento de captura

Após terem sido enumerados os diversos dispositivos que foram usados nos testes realizados na câmara anecóica, vão agora identificar-se as várias etapas do processo.

Irá ser descrita a fase de escolha e criação dos sinais de estímulo, a configuração e disposição do equipamento aquando a realização dos testes, bem como o modo como se procedeu perante as ferramentas e vários processos em curso.

4.1 Metodologia

Na elaboração desta experiência usou-se uma metodologia inovadora com base em sinais digitais de teste para, em ambiente anecóico, atuar um altifalante e registar o sinal adquirido por um microfone.

Foram usados quatro microfones e três altifalantes, tendo sido efetuada uma reprodução e gravação por apenas um tipo de dispositivo de cada vez. Foram recolhidos no total doze gravações por cada combinação entre microfone e altifalante para cada sinal de estímulo. Tendo sido criados três sinais de estímulo distintos, isto dá um total de trinta e seis gravações diferentes.

Esta experiência foi realizada na câmara anecóica disponível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que está projetada para a atenuação de sinais de radiofrequência. Apesar de esta não ter sido otimizada para atenuar sinais sonoros, o seu desempenho revelou-se bastante satisfatório no que concerne à remoção de ecos e atenuação de sons provenientes do exterior.

Na figura 4.1 pode-se ver um esquema da metodologia que foi adotada.



Figura 4.1: Esquema da metodologia usada nos testes.

4.2 Estímulos

Tendo em conta o que foi possível encontrar na literatura sobre sinais de estímulo tipicamente usados neste tipo de análises, e considerando o facto de ser de grande importância preservar o melhor possível a fase do sinal recolhido após o processamento necessário para a análise, decidiu-se usar dois tipos de sinais de estímulo: um sinal *sweep* e um sinal dente de serra. O sinal *sweep* foi por sua vez analisado segundo duas vertentes, de progressão linear e logarítmica. Estes sinais apresentam características distintas que serão brevemente analisadas.

Outro sinal que esteve em análise foi o ruído branco ou rosa, usando depois uma técnica de MLS (*maximum-length sequence*). No entanto, a extração da fase e posterior atraso de grupo seria uma tarefa de difícil execução, optando-se por usar um sinal *sweep* por se revelar mais apropriado.

Será agora feita uma análise dos sinais que foram usados no processo de excitação e captação.

4.2.1 Sweep

Um sinal do tipo *sweep* tem a particularidade de possuir em cada instante temporal apenas uma componente espectral. O que torna este sinal especial é que a frequência a que essa componente se encontra vai mudando com o passar do tempo. Esta alteração é feita de uma forma contínua, tendo sido adotadas duas formas de progressão: linear e logarítmica.

No primeiro caso, a frequência é aumentada de uma forma constante desde o início até ao final do sinal e no segundo caso a frequência aumenta mais rapidamente à medida que o sinal se aproxima do fim.

Na figura 4.2 está representado a espectrograma dos dois sinais onde é possível vislumbrar a diferença entre os dois tipos de *sweep*. À medida que o tempo avança (progressão da esquerda para a direita), é possível ver que a frequência também aumenta de modo distinto nos dois tipos de *sweep*.

Foi decidido que o *sweep* linear teria uma progressão desde os 100 Hz até aos 12 kHz e o *sweep* logarítmico começaria nos 50 Hz igualmente até aos 12 kHz, sabendo à priori que esta

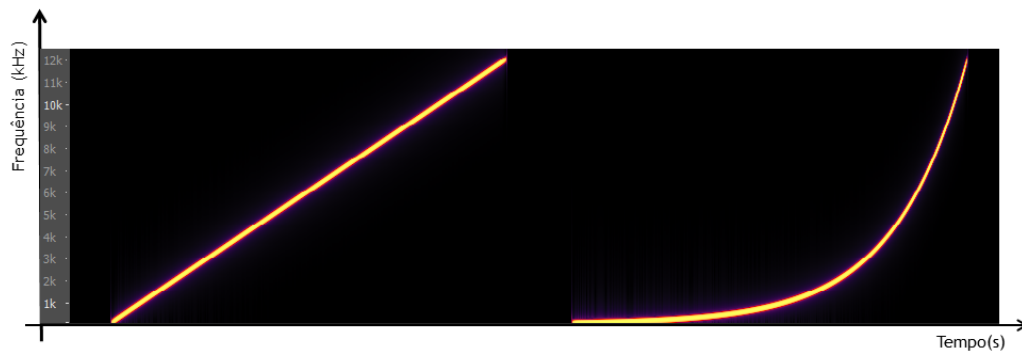


Figura 4.2: Espetrograma relativo ao *Sweep* linear (esquerda) e ao *sweep* logarítmico (direita).

gama poderia não ser utilizada na sua totalidade. No entanto, considerou-se que seria uma boa primeira aproximação.

Foram adicionados três segundos de silêncio tanto no início como no final de cada um dos sinais, para permitir uma posterior análise do ruído de fundo em silêncio. O *sweep* tem uma duração de cinco segundos, sendo que nos primeiros e últimos cem milissegundos existe uma suavização para a entrada e saída do sinal. Esta suavização tem o intuito de evitar transições bruscas nos transdutores dos altifalantes, que de outro modo poderiam provocar um excesso de carga. Esta suavização foi conseguida utilizando como referência um quarto de uma onda sinusoidal nos processos de entrada e saída do sinal de estímulo.

Os dois sinais foram criados utilizando uma frequência de amostragem de 48 kHz, com um valor de 24 bits por amostra. Deste modo conseguem-se evitar fenómenos de *aliasing*, garantindo uma grande qualidade nos sinais desde o início do processo. Este sinal foi produzido em ambiente *Matlab*, usando uma função específica para a sua criação: “*chirp*”.

4.2.2 Dente de serra

Um sinal dente de serra apresenta no domínio temporal o formato que é possível ver na figura 4.3.

Este sinal, devido às transições instantâneas que possui é caracterizado por uma distribuição espectral que não é possível de reproduzir nem captar num altifalante ou microfone, nem igualmente de captar por um microfone. Para que tal fosse possível, foi necessário eliminar harmónicos a partir de uma determinada frequência.

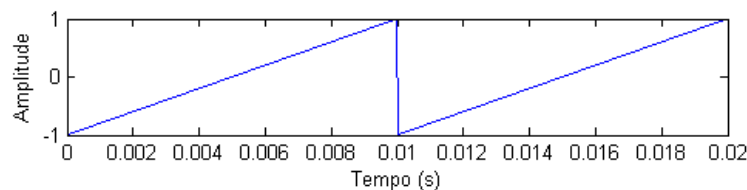


Figura 4.3: Dente de serra ideal representado no domínio temporal.

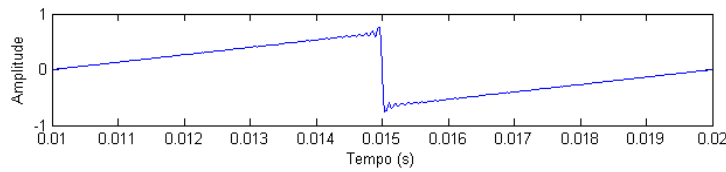


Figura 4.4: Dente de serra usado como estímulo.

Definiu-se assim que esta onda seria caracterizada por uma frequência fundamental de 100 Hz e que possuiria cem harmônicos, atribuindo de forma imediata uma frequência máxima no valor de 10 kHz.

Este sinal tem uma duração de três segundos e tal como no caso do *sweep*, também apresenta o mesmo período de silêncio antes e após o sinal propriamente dito. De igual forma, o mesmo processo de suavização foi aplicado. A frequência de amostragem e o número de bits por amostra também se mantiveram inalterados para este sinal.

Na figura 4.4, pode-se ver o formato da onda que foi usada nos testes. Nesta consegue-se ver que as transições foram suavizadas, evidenciando a eliminação de harmônicos de mais elevada frequência.

Para que fosse possível criar a onda que se pode ver na figura 4.4, foi necessário recorrer à fórmula que define um sinal do tipo dente de serra e contabilizar apenas os cem primeiros harmônicos [17]. Essa fórmula (4.1) pode ser então analisada.

$$x_{dentedeserra}(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{\sin(2\pi k f t)}{k} \quad (4.1)$$

Sendo assim, fazendo o somatório dos cem primeiros elementos (até $k = 100$) obtém-se um dente de serra que tem como frequência fundamental 100 Hz e frequência máxima 10 kHz. Esta frequência é facilmente reproduzida pelos equipamentos a serem testados.

4.3 Testes preliminares

Antes de se proceder a testes definitivos em ambiente anecóico, e tendo em conta que se trata de uma operação de cuidado acrescido que envolve a deslocação de vários equipamentos de custos avultados e a reserva de recursos (como por exemplo a própria câmara anecóica), decidiu-se que seria melhor proceder a alguns testes num laboratório convencional.

O local onde estes testes foram efetuados já se encontrava equipado com alguns dos microfones e altifalantes que foram usados posteriormente no procedimento final, revelando-se uma operação de fácil execução.

Na figura 4.5 está demonstrado o espectrograma de um dos sinais captados durante estes testes preliminares.

Estes sinais foram gravados com uma frequência de amostragem de 48 kHz, com um total de 24 bits por amostra. Estes parâmetros serão os usados nos testes finais.

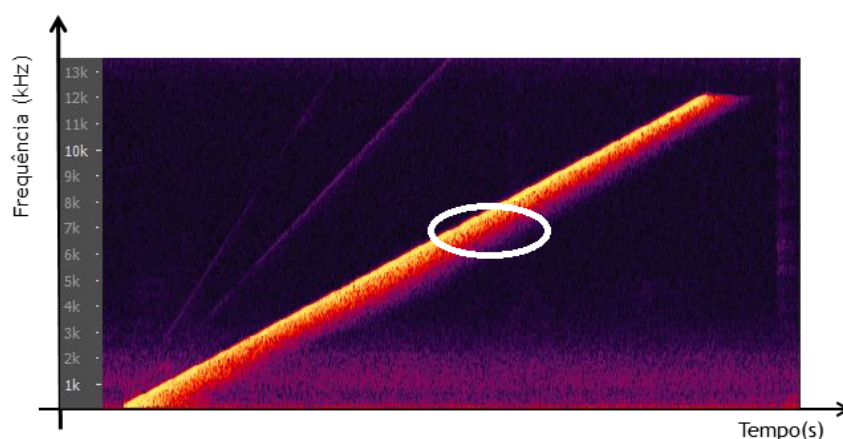


Figura 4.5: Espectrograma do *sweep* linear. Microfone *Sennheiser* e colunas *B&W*.

Neste espectrograma é possível verificar alguns dos problemas que acontecem quando se faz gravação em ambientes não apropriados para o efeito. Na secção do espectro dos 0 Hz até aos 2 kHz encontra-se uma zona com alguma coloração, indicadora do ruído de fundo existente no ambiente onde este sinal foi gravado. Outro fenómeno possível de visualizar (e de escutar quando se reproduz o ficheiro de áudio) é a existência de eco, que no espectrograma foi assinalado com uma circunferência branca. O arrastamento para o lado direito indica a presença desse fenómeno no áudio gravado.

Visualizando a figura com mais atenção, consegue-se detetar a presença de harmónicos, que são representados por duas retas com maior declive que acompanham a evolução da frequência principal do *sweep*. No entanto, a sua potência é bastante menor comparativamente com a frequência principal.

Nos testes efetuados na câmara anecóica, o efeito de eco não existe por completo, e o ruído de fundo é bastante atenuado. No entanto, o fenómeno dos harmónicos continua a existir, visto ser uma particularidade dos altifalantes usados nos testes.

4.4 Testes na câmara anecóica

Após terem sido feitos os testes preliminares e ter-se comprovado que todo o material estava a funcionar corretamente, começou-se a fazer o plano de trabalho para a transição para a câmara anecóica.

Decidiu-se que se começaria com um microfone e que o elemento que iria rodar seria o altifalante, mantendo assim um ganho semelhante entre os diferentes emissores. Assim que determinado microfone tivesse sido utilizado para gravar todos os sinais de estímulo em todos os altifalantes, passar-se-ia para o microfone seguinte.

Foi também definido que o sinal recolhido deveria ter mais de 75% da gama máxima no Adobe Audition que se encontrava instalado no computador responsável pela recolha do sinal. Caso o sinal não tivesse magnitude suficiente, aumentava-se a sensibilidade na placa de captura até um

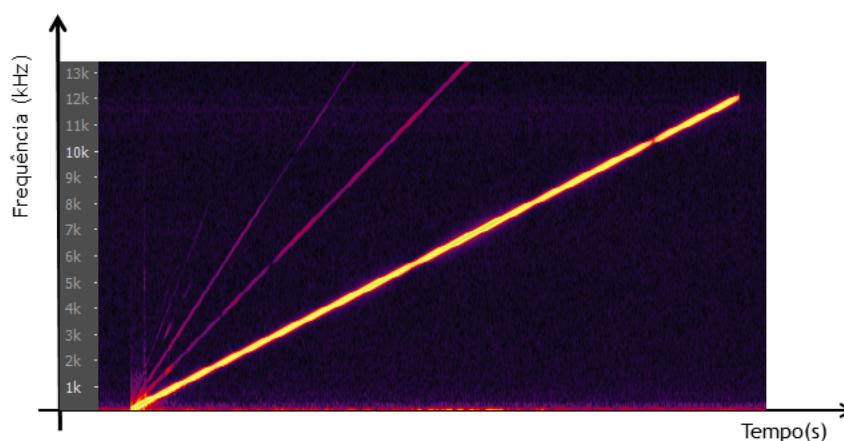


Figura 4.6: Espectrograma do *sweep* linear. Microfone *Earthworks* e colunas *B&W*.

máximo de aproximadamente 80%. A partir desse momento, se a amplitude ainda não fosse satisfatória, elevava-se o volume dos altifalantes no computador emissor. Deste modo, mantinha-se os componentes ligeiramente afastados dos limites que poderiam introduzir distorções indesejadas. Tal como nos testes preliminares, a gravação foi efetuada a uma frequência de amostragem de 48 kHz com 24 bits por amostra.

No decorrer dos testes, o altifalante a ser analisado era colocado no chão de frente para o microfone, a uma distância de aproximadamente 1,1 metros. O eixo de simetria do microfone foi direcionado diretamente para o altifalante. Para elevar o microfone relativamente ao chão, foi usado o mesmo material que cobre toda a câmara anecóica. Deste modo não havia um elemento de reflexão próximo da origem de captação.

Os dois computadores responsáveis pela produção de ruído devido ao seu funcionamento, foram colocados fora da câmara, graças ao comprimento dos cabos que permitiram esta solução, e a porta da câmara foi sempre fechada durante todas as gravações. Deste modo, qualquer elemento externo de ruído foi minimizado ao máximo, mantendo o sistema o mais isolado possível.

Após um dos sinais de estímulo ter sido gravado, o ficheiro era imediatamente gravado no formato WAV, com uma nomenclatura que possibilitava a sua posterior identificação. Esta era formada desta forma: “(marca do altifalante)_(marca do microfone)_(sinal de estímulo).wav”

Comparativamente aos testes efetuados num ambiente acústico vulgar, consegue-se visualizar numa análise ao espectrograma que os problemas de eco e ruído de fundo foram praticamente todos eliminados, tal como é visível na figura 4.6.

A análise do sinal, nomeadamente no que diz respeito ao espectro e atraso de grupo, e o modo como se procedeu será explicado no capítulo que se segue.

4.5 Considerações finais

A partir da análise feita até ao momento, pode-se concluir que a utilização da câmara anecóica para a realização do procedimento final foi uma mais valia, visto ter permitido eliminar interferên-

cias que seriam introduzidas na captação, como por exemplo ecos ou ruídos de fundo que iriam prejudicar bastante a análise dos sinais. Este efeito é visível na comparação do espectrograma numa sala comum (figura 4.5) com o espectrograma na câmara anecóica (figura 4.6).

Um passo crucial foi a correta escolha dos estímulos. Se estes não fossem os mais adequados, a análise posterior poderia não ser de todo realizável. A utilização dos dois tipos de *sweep* serviu precisamente para cobrir uma eventual dificuldade de processamento de um deles, sem que para isso fosse necessário voltar a reservar e movimentar todo o equipamento necessário para um novo procedimento de testes. Os testes preliminares serviram igualmente para prevenir uma situação deste género, tornando ao mesmo tempo o procedimento final mais rápido, devido à familiarização com o equipamento e suas ligações.

Capítulo 5

Análise dos sinais

Neste capítulo serão analisados os sinais que foram recolhidos no processo experimental e, partindo dos sinais originais de estímulo, extraídas características que definem os sistemas constituídos pelos microfones e altifalantes. As diferenças dos sinais de estímulo obrigaram a procedimentos distintos, pelo que os dois casos serão abordados em separado. De qualquer modo, a representação do sistema em termos espectrais terá de ser aproximadamente a mesma, independentemente do estímulo utilizado.

5.1 Sweep

O primeiro sinal a ser analisado será o *sweep*. A partir deste sinal, será possível obter a resposta em frequências dos vários conjuntos de microfones e altifalantes, bem como o respetivo atraso de grupo. Para a obtenção de resultados mais exatos, serão seguidas diversas estratégias, que deverão convergir para os mesmos resultados.

5.1.1 Espectro do sinal

A primeira fase na análise do espectro deste sinal é calcular a sua DFT (*Discrete Fourier transform*), tanto no sinal captado pelo microfone, como no sinal de estímulo. Este processo é feito recorrendo a um método computacional bastante eficiente, que é a FFT (*Fast Fourier transform*), a qual está disponível em ambiente *Matlab*.

O processo inicial envolvia a criação de uma FFT de tamanho razoavelmente pequeno (4096) para daí ser feita uma análise posterior. Para isso usou-se um processo onde uma janela vai percorrendo o sinal temporal, sendo em cada instante calculada a sua FFT. No final deste processo, todos os valores resultantes dos vários cálculos da FFT são somados e é feita a sua média. Embora o resultado em termos de magnitude do espectro fosse o esperado para este tipo de sinal, o gráfico que representava a fase não revelava nenhuma forma de onda que fizesse sentido para este caso. Como se pode comprovar [18], num sistema do tipo *sweep* (neste caso linear), a magnitude esperada deverá ser contante, e a fase terá de ser em forma de parábola. Apesar de diversas tentativas, não foi possível analisar o sinal a partir deste método. Foi possível comprovar [16] que a opção a tomar

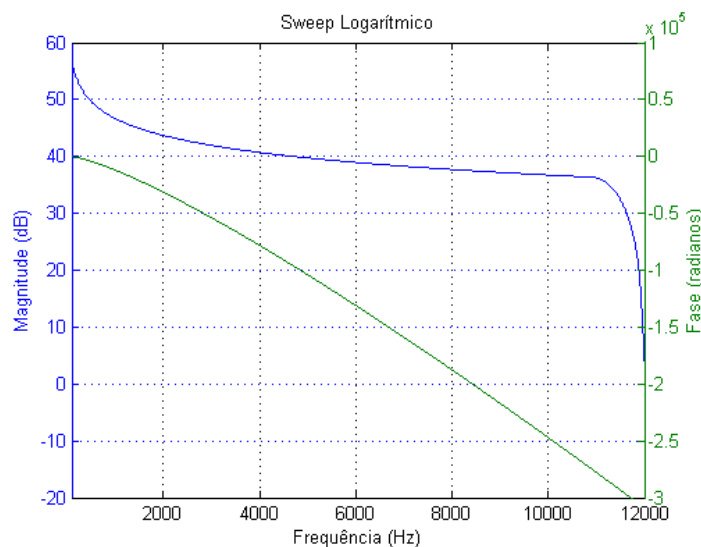


Figura 5.1: Espectro do *sweep* logarítmico.

teria de ser a de efetuar uma FFT cujo tamanho deveria ser pelo menos igual ao comprimento do ficheiro de áudio original, idealmente o dobro do tamanho. Tal foi possível efetuar usando um número proveniente de potência de dois, para tornar o cálculo mais eficiente. Apesar do tamanho da FFT ser de grandes dimensões (524288), o tempo de processamento revelou-se bastante curto, sendo apenas de alguns centésimos de segundos num computador de capacidade modesta.

Para encurtar o mais possível o tamanho da FFT a usar, os sinais foram segmentados, tendo sido eliminado o mais possível o silêncio que existia no início e final do estímulo. Neste último caso, foi deixada uma pequena margem para permitir a receção de eventuais ecos apesar de, durante este processo, a sua existência não ter sido possível de comprovar, derivado do bom comportamento da câmara anecoica onde os testes foram efetuados. A fase dos sinais foi tratada com a função “unwrap”, que permite que ela seja sempre somada ao longo das frequências, não apresentando assim a variação entre $\pm\pi$.

Nas figuras 5.1 e 5.2 é possível visualizar o espectro tanto do *sweep* logarítmico como do linear.

Através da análise dessas figuras pode-se comprovar alguns factos já antes verificados, como o decaimento logarítmico da magnitude e constante da fase no caso do *sweep* logarítmico. Por outro lado, pode-se verificar o valor constante da magnitude e a forma de parábola da fase para o caso do *sweep* linear. Consegue-se deste modo validar os resultados até agora obtidos, comprovando que este é o procedimento a seguir. Para esta exemplificação, em particular, foram usados gráficos com uma escala linear na grandeza das frequências. No entanto, daqui em diante, essa escala será convertida para logarítmica. No anexo A podem ser consultados em maior detalhe as representações em frequência dos sinais *sweep*. Após o cálculo da FFT, foi extraída apenas a primeira metade do vetor, visto que os restantes valores não tinham novidade prática. Nos valores entretanto recolhidos, nem toda a gama de frequências era importante, sendo que os gráficos dos sinais incidirão nas frequências entre os 100 Hz e os 20 kHz, apesar dos sinais de estímulo *sweep* terem uma frequência máxima de 12 kHz. Assim, é possível visualizar a transição do sinal para

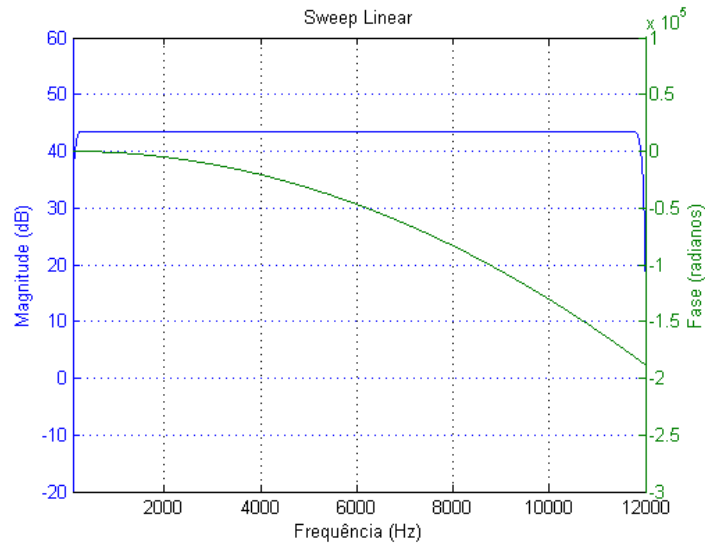


Figura 5.2: Espectro do *sweep* linear.

ruído. No que toca às respostas em frequências dos dispositivos, os gráficos representarão apenas até aos limites da frequência do sinal de estímulo.

5.1.2 Resposta em frequência dos altifalantes e microfones

Uma vez obtidos os espectros quer do sinal de estímulo intacto, quer do sinal gravado pelo microfone, é possível agora tentar chegar ao espectro que representava o conjunto formado pelo altifalante e microfone. No anexo B estão disponíveis as respostas em frequência de todos os sinais captados. Considerando este mesmo conjunto como sendo um sistema linear e invariante no tempo, sabe-se [4] que,

$$Y(z) = H(z) \cdot X(z) \quad (5.1)$$

concluindo então que,

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}. \quad (5.2)$$

A fórmula 5.2 acaba por estar implícita num artigo anteriormente citado (artigo [16]), e a partir dela pode-se concluir que, para encontrar a resposta em frequência do sistema, é necessário dividir o espectro do sinal gravado pelo microfone pelo espectro do sinal de estímulo. Neste trabalho, a aplicação das equações 5.1 e 5.2 foram concretizadas através da DFT que resulta de amostrar o plano Z fazendo $Z = e^{\frac{j2k\pi}{N}}$, com $k = 0, 1, \dots, N$ e em que N é o comprimento da DFT. Nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5 pode-se ver um exemplo onde é demonstrado o espectro do sinal original, do sinal captado e a resposta em frequência do sistema.

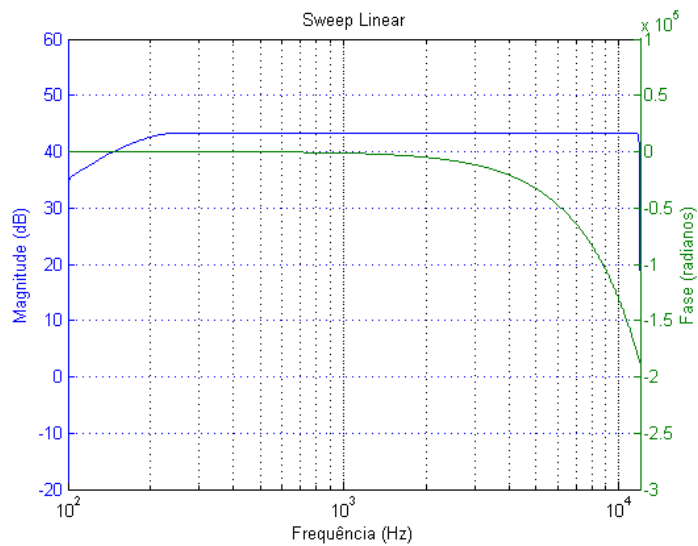


Figura 5.3: Espectro do estímulo.

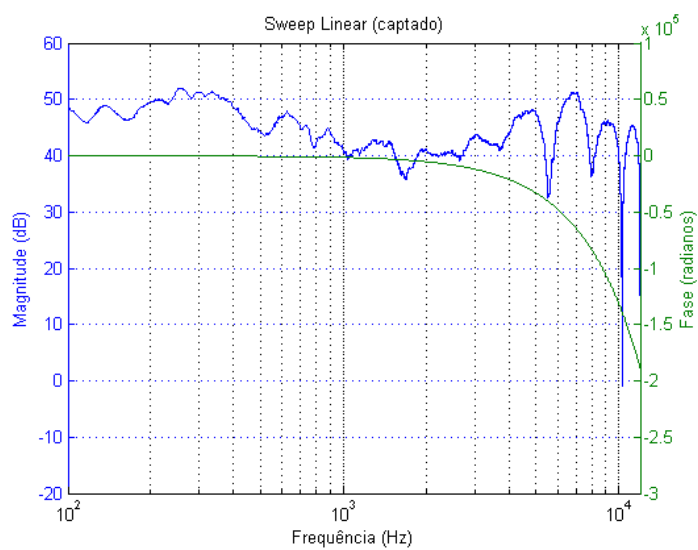


Figura 5.4: Espectro do estímulo captado.

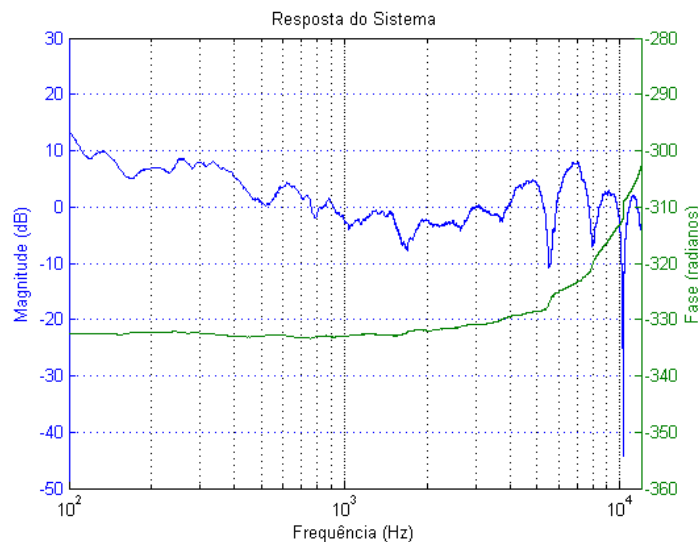


Figura 5.5: Resposta em frequência do conjunto (microfone e altifalante).

Estes gráficos representam os testes efetuados ao conjunto formado pelo microfone *Work* e pelas colunas *Adam*, sob o estímulo de um *sweep* linear. Note-se que a escala referente à magnitude do sinal se mantém igual entre os três gráficos, tendo no entanto um valor máximo e mínimo diferentes no gráfico da figura 5.5. No que diz respeito à fase, a escala nos dois primeiros gráficos tem passos de 50.000 radianos, enquanto que no último gráfico é de apenas 10 radianos. Tal mudança justifica-se uma vez que uma escala semelhante à dos dois primeiros gráficos faria com que apenas se visualizasse uma linha horizontal.

Numa primeira fase, para o cálculo da resposta em frequência do sistema, foi feita uma subtração, quer das magnitudes ($\text{MagY} - \text{MagX}(\text{dB})$), quer das fases ($\text{PhY} - \text{PhX}(\text{rad})$). Posteriormente a operação foi modificada, sendo feita diretamente uma divisão do resultado das FFTs, e em seguida calculada a sua magnitude e fase, usando funções da aplicação disponíveis para o efeito.

Uma vez calculada a resposta em frequência de todas as combinações (disponíveis no anexo C), é possível agora calcular o atraso de grupo que cada uma apresenta.

5.1.3 Atraso de grupo

Para determinar o atraso de grupo do sistema foram pensadas diversas abordagens, sendo que vários métodos calculam o atraso de grupo diretamente pela resposta impulsional do sistema. Conseguir calcular o atraso de grupo de um filtro ou sinal revela-se um processo de grande dificuldade, devido à complexidade que provém do uso e processamento da fase de um sinal.

O método que foi testado resulta diretamente da definição de atraso de grupo, que pode ser consultada na equação 2.4. Sendo assim, foi calculada a derivada da fase do sistema que representa o conjunto formado pelo microfone e altifalante, e em seguida calculado o simétrico dos diversos números que formavam o vetor. O resultado obtido seria algo semelhante ao da figura 5.6, onde foi utilizada um altifalante *B&W* e o microfone *Earthworks*.

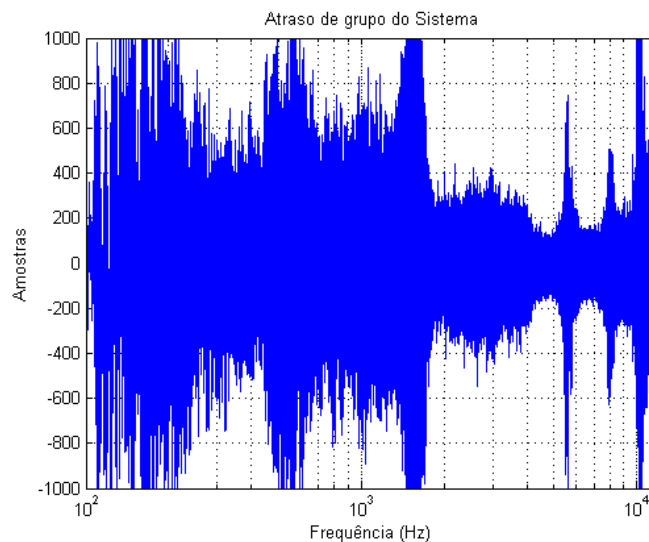


Figura 5.6: Atraso de grupo (derivada da fase).

Como é possível verificar, a sinal obtido apresenta uma frequência de oscilação bastante elevada, o que torna a sua análise e interpretação bastante difíceis. A solução encontrada para resolver este problema passa pela aplicação de um filtro de média. Depois de terem sido efetuadas diversas experiências, chegou-se à conclusão que a melhor opção seria aplicar o filtro de média várias vezes e com tamanhos diferentes. A melhor combinação foi, por esta ordem e número de amostras, a seguinte: 40 amostras, 40 amostras, 20 amostras, 20 amostras. A utilização de um filtro de maiores dimensões conduzia a uma atenuação demasiado acentuada do gráfico, ao passo que um filtro relativamente pequeno não solucionava o problema. Deste modo, a aplicação de vários filtros sucessivamente e com tamanhos diferentes revelou-se ser a melhor opção disponível. O resultado final após a aplicação desta sucessão de filtros para o mesmo conjunto representado pela figura 5.6 pode ser visto na figura 5.7.

Após a obtenção deste resultado, foi decidido que se iria testar esta metodologia de modo a validar os resultados até então obtidos. Para executar esta função, foi criado um filtro que afeta apenas o sinal no que à fase diz respeito e, em seguida, submeteram-se os dois *sweeps* originais a esse mesmo filtro. Comparando os sinais filtrados com os originais, e sabendo previamente o comportamento do filtro utilizado, pode-se então concluir sobre a validade da metodologia empregue.

Foi criado então um filtro IIR (*Infinite Impulse Response*) do tipo passa-tudo, que costuma geralmente ser usado na prática para compensar distorções de fase de um sinal após a passagem deste por outro sistema, sem no entanto afetar a sua magnitude.

Um sistema passa-tudo com resposta impulsional real terá polos e zeros reais ou complexos conjugados sendo que, uma vez definido um dos polos do sistema, o zero está obrigatoriamente na posição recíproca conjugada da do polo [19].

Definiu-se assim o filtro com polos:

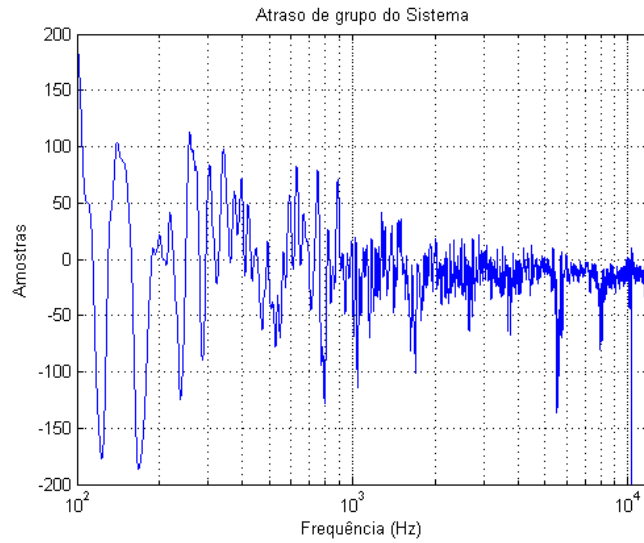


Figura 5.7: Atrazo de grupo (derivada da fase) + filtragem.

- $a1 = 0.8e^{j\frac{\pi}{3}}$
- $a2 = 0.8e^{-j\frac{\pi}{3}}$
- $a3 = 0.8e^{j\frac{\pi}{8}}$
- $a4 = 0.8e^{-j\frac{\pi}{8}}$

Deste modo, uma vez que " π " equivale a metade da frequência de amostragem, ficamos com um conjunto de polos e zeros em 8 kHz e outro em 3 kHz. Podemos ver na figura 5.8 a representação polar e o atraso de grupo, do filtro utilizado.

Uma vez criado o filtro e tendo sido ele aplicado ao sinal dos *sweeps*, fez-se a análise espectral e de atraso de grupo, tal como se este filtro fosse na realidade um microfone e altifalante. Podemos então ver na figura 5.9 o aspeto do atraso de grupo depois de utilizado o processo até agora descrito.

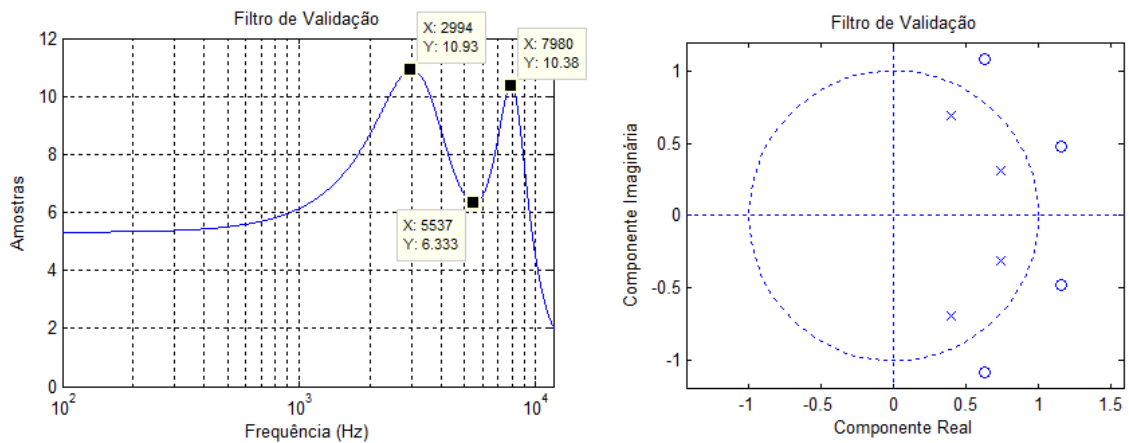


Figura 5.8: Filtro de validação. Atrazo de grupo (esquerda) e representação polar (direita).

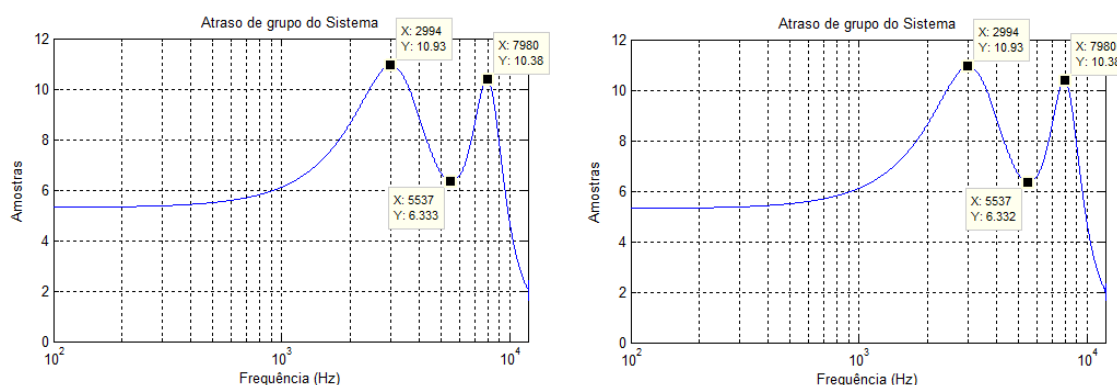


Figura 5.9: Atraso de grupo extraído pelo sinal filtrado. *Sweep* linear (direita) e *sweep* logarítmico (esquerda).

Como se pode ver pelos resultados alcançados, o método utilizado consegue representar de uma forma fiel o atraso de grupo do sistema (neste caso um filtro IIR). Deste modo, sabe-se que a veracidade dos resultados apresentados para os diversos conjuntos entre microfones e altifalantes estarão à partida salvaguardada. Os gráficos do atraso de grupo para todas as combinações de dispositivos estão disponíveis no anexo D.

De modo a perceber melhor que outras técnicas poderiam ser utilizadas para executar a mesma tarefa, optou-se por efetuar uma pesquisa na literatura existente. Sendo assim, após alguma investigação, foi possível chegar a uma expressão apresentada por Alan Oppenheim durante a “Speech Processing Conference” que decorreu nos dias 21/22 de Junho de 2011, em que após alguma análise algébrica, se conclui o resultado da formula 5.3.

$$\text{Filter group delay} = \Re \left[\frac{DFT[n.h(n)]}{DFT[h(n)]} \right] \quad (5.3)$$

A partir deste resultado, que já foi inclusivamente estudado e posto em prática [20], consegue-se concluir que é possível calcular o atraso de grupo de um sistema exclusivamente a partir da sua resposta impulsional.

Para além deste resultado, existe ainda uma outra fórmula que parte igualmente do sinal temporal $x[n]$ para assim caracterizar o atraso de grupo de um sinal [21]. Esse método foi utilizado em alguns projetos para assim distinguir oradores através do atraso de grupo de um sinal de voz [22].

5.2 Dente de serra

Nesta secção irá ser analisado um outro sinal de estímulo que foi usado para se poder caracterizar os microfones e altifalantes: o dente de serra. Este sinal tem como maior característica distintiva relativamente ao sinal *sweep* o facto de ser periódico. Tal particularidade faz com que o seu espetro seja constituído por diversos harmónicos com elevada concentração de energia, ao contrário do caso do *sweep* onde existia uma distribuição mais uniforme ao longo das diversas

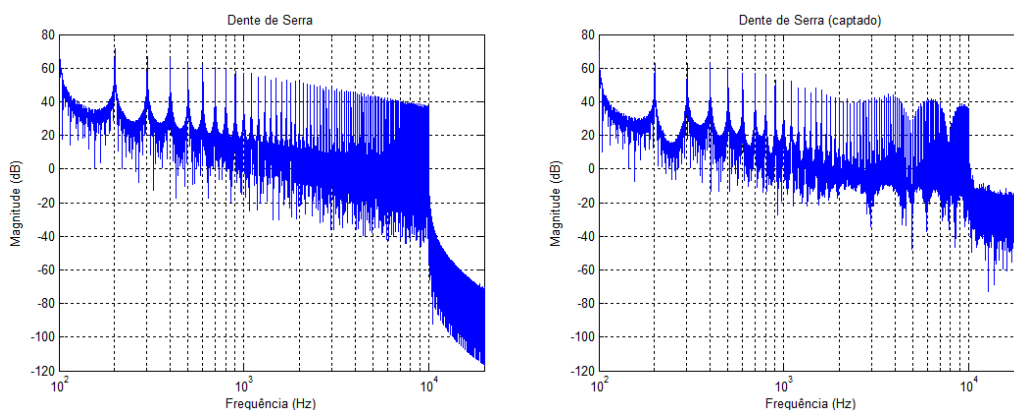


Figura 5.10: Espectro do sinal Dente de Serra emitido (esquerda) e captado (direita).

frequências. Devido a esta particularidade, a análise quer em termos de magnitude como em termos de atraso de grupo teve de ser feita numa abordagem diferente. Iremos proceder agora à demonstração das várias técnicas usadas para o efeito.

5.2.1 Espectro do sinal

A primeira fase na análise deste sinal, tal como no caso do *sweep*, é calcular o seu espectro, para assim poder encontrar a magnitude da resposta em frequência do sistema. Para elaborar tal função foi, numa primeira instância, feita a segmentação de um excerto de apenas um segundo da região do sinal em regime permanente, sendo utilizada uma zona onde tanto o sinal recolhido como o original se apresentavam completamente estáveis.

Após este processo, foi usada uma FFT que permitisse analisar este segmento de áudio anteriormente extraído. O tamanho da FFT é de 65536 amostras, que sendo uma potência de dois permite otimizar a execução do algoritmo.

O resultado desta fase de processamento pode ser vista na figura 5.10. O gráfico do dente de serra captado foi produzido tendo como base as colunas *Yamaha* e o microfone da marca *Earthworks*.

Em ambos os gráficos é evidente a presença dos vários harmónicos que constituem o sinal dente de serra. Todos eles estão posicionados em múltiplos da frequência fundamental (100 Hz), começando nesta, até um máximo de 10 kHz. Sendo assim, estão presentes com componentes espectrais que dão forma a este tipo de onda. Os restantes gráficos da representação em frequência do sinal dente de serra captado pelas diversas combinações entre microfone e altifalante, podem ser consultados no anexo B.

5.2.2 Resposta em frequência dos altifalantes e microfones

Apesar destes gráficos apresentarem uma boa definição no que à resolução espectral diz respeito, os seus dados tiveram de ser trabalhados, uma vez que extrair a função transferência diretamente a partir destes não se apresentou como uma solução adequada. O método de extração da

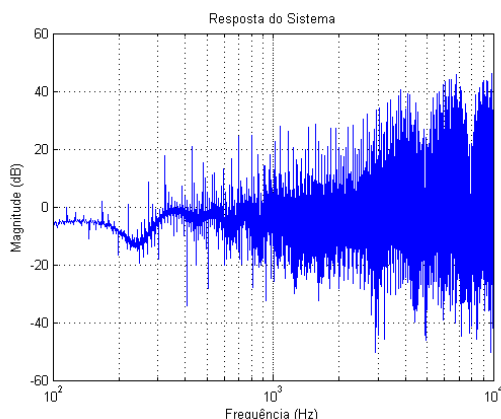


Figura 5.11: Resposta em frequência do sistema.

função transferência empregue para este tipo de sinal foi o mesmo utilizado para o caso do *sweep* ou seja, a equação 5.2 já analisada. Na figura 5.11 podemos ver o resultado de tal processamento, efetuado utilizando o altifalante *Yamaha* e microfone *Earthworks*.

Tal como é visível pelo resultado apresentado, esta solução não permite de uma forma expedita interpretar qual o comportamento do sistema no que à magnitude diz respeito, devido à enorme quantidade de ruído que o gráfico apresenta. Este efeito acontece porque a forma dos diversos harmónicos no espectro do sinal original e no espectro do sinal recolhido, devido sobretudo a fenómenos de *leakage*, não é exatamente a mesma. Fazendo a divisão da FFT do sinal recolhido pela FFT do sinal original (equivalente a subtrair, em decibéis, a magnitude do sinal recolhido pela magnitude do sinal original), o resultado mais provável é o já apresentado, visto que os harmónicos não se encontram configurados exatamente com o mesmo formato, essencialmente devido a diferenças no efeito de *leakage* entre o sinal rececionado e o de estímulo.

Utilizou-se assim uma técnica que estima os coeficientes de um filtro preditor. Este método é conhecido como LPC (*Linear predictive coding*), que é vastamente utilizado no processamento de voz. Com a utilização desta função disponibilizada pelo ambiente *Matlab*, podemos identificar um determinado número de coeficientes que nos permitem posteriormente construir um filtro. Estes coeficientes representam, na realidade, os polos de um filtro. Dependendo do número de coeficientes, a magnitude da resposta em frequência desse filtro envolveria melhor ou pior o espectro do sinal original.

Usando um número relativamente baixo do coeficientes, para assim encontrar a envolvente espectral dos dois sinais, seria possível depois fazer o processamento sobre estas duas envolventes. Desta forma a magnitude da resposta em frequência do sistema teria um comportamento mais suave permitindo a sua melhor análise. Esta solução foi no entanto mais tarde afastada, uma vez que o uso da LPC apresenta diversos problemas, alguns deles ilustrados na figura 5.12.

Tendo como base para a explicação os gráficos apresentados na figura 5.12, utilizando uma LPC que retornasse poucos coeficientes (gráfico da esquerda – 200 coeficientes), o espectro estimado teria pouco detalhe, não passando diretamente sobre os picos dos diversos harmónicos. No entanto, o uso de uma grande quantidade de coeficientes (gráfico da direita – 500 coeficientes)

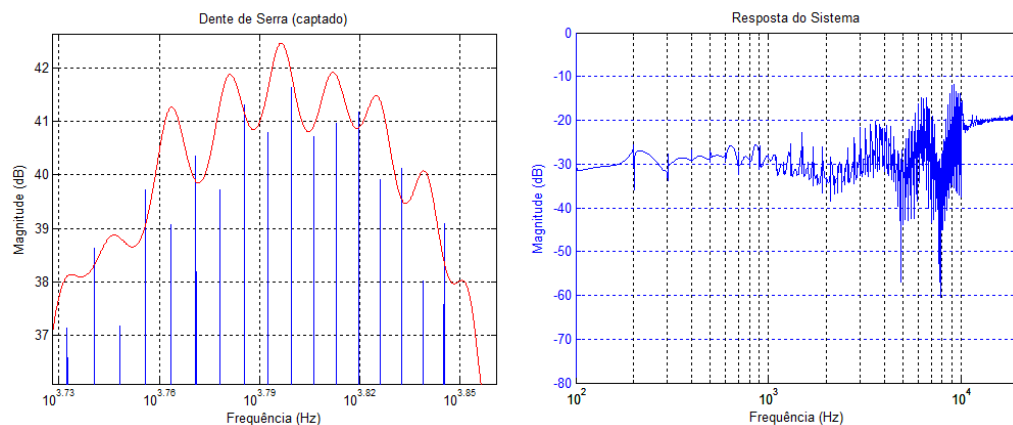


Figura 5.12: Problemas do uso da LPC para detecção de picos.

resultava num espectro com demasiado detalhe fora dos harmónicos, fazendo surgir de novo o problema já anteriormente relatado no gráfico da magnitude da resposta em frequência do sistema (coluna e microfone).

Foi então necessário encontrar um algoritmo que detetasse diretamente os picos dos diversos harmónicos. Após realizado este processo tanto para o sinal original como para o recolhido, bastaria apenas subtrair os valores dos harmónicos do sinal recolhido, pelos valores dos harmónicos do sinal original. Este processo de subtração é possível uma vez que a magnitude de ambos os sinais se encontra representada em decibéis. Após a obtenção dos diversos harmónicos que representam a magnitude da resposta em frequência do sistema, fez-se uma interpolação de maneira a obter uma curva que consiga de algum modo acompanhar a evolução da magnitude e perceber melhor a envolvente espectral do sistema.

Para conseguir detetar a magnitude máxima dos harmónicos de ambos os sinais, utilizou-se a função “findpeaks” disponibilizada pelo *Matlab*. Esta função permite encontrar picos locais de um vetor, ou seja, um valor que seja maior que os dois imediatamente adjacentes. Após a primeira aplicação desta função, os resultados não se apresentaram suficientemente satisfatórios, havendo harmónicos não encontrados e zonas fora dos harmónicos (vales) tendo sido assinaladas como tal. Foi então necessário definir uma série de restrições à função para que a estimação dos picos fosse exata, tais como:

- Localização do primeiro pico acima de 95 Hz;
- Distância mínima entre picos de 95 Hz;
- Número de picos: 100.

Após a aplicação destas restrições, os resultados apresentados pelo algoritmo foram sempre corretos, tendo sido todos visualmente analisados de maneira a comprovar a eficácia da abordagem.

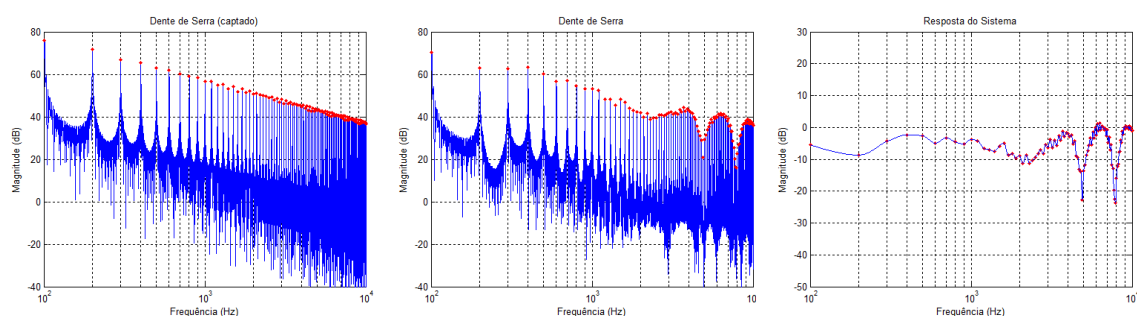


Figura 5.13: Espectro original (esquerda), espectro captado (centro) e magnitude da resposta em frequência do sistema (direita).

Uma vez encontrados os diversos harmónicos, tanto para o sinal dente de serra original como para o sinal captado pelo microfone, procedeu-se então à subtração entre eles. Assim se encontraram os harmónicos que representam a magnitude da resposta em frequência do sistema.

Para poder ter agora uma melhor perceção da curva que caracteriza esse conjunto, fez-se uma interpolação para estimar os valores adjacentes aos harmónicos, tendo sido utilizada uma função do *Matlab* disponível para esse efeito. O método de estimação utilizado foi o ‘cubic’. Na figura 5.13 é possível ver o espectro do sinal original e captado (processo feito pelo microfone *Earthworks* e altifalante *Yamaha*), onde foram detetados os diversos harmónicos e, em seguida, calculada a magnitude da resposta em frequência do sistema.

Comparando a qualidade da representação espectral do sistema entre o último gráfico da figura 5.13 e a figura 5.11 anteriormente analisada, é possível concluir que este processo se torna assim favorável a uma melhor compreensão do comportamento do sistema no que à magnitude diz respeito. Todos os gráficos da magnitude da resposta em frequência processados deste modo estão disponíveis no anexo C. Nestes gráficos estão representados pontos vermelhos, que correspondem à magnitude da resposta em frequência extraída pelos harmónicos do sinal dente de serra e uma linha a azul que é a função interpolada a partir dos pontos calculados.

5.2.3 Atraso de grupo

No cálculo do atraso de grupo para o sinal dente de serra não é possível utilizar o mesmo método anteriormente aplicado ao *sweep* logarítmico e linear, mais especificamente a extração da fase do sinal e posterior derivação. Tal justifica-se devido ao carácter periódico do sinal, pelo que o cálculo da sua fase é muito dependente da secção temporal que se escolhe para o fazer. Recorde-se que apenas será processado um segmento a meio do sinal de estímulo captado, de modo a ter o sinal o mais estável possível. A escolha da secção uma amostra ao lado, tornaria a fase do sinal diferente, impossibilitando a sua comparação com os demais sinais.

Tendo em conta este aspeto, foi fornecido pelo orientador (Prof. Dr. Aníbal Ferreira) um código produzido em ambiente *Matlab* que permite estudar os NDR (Normalized Relative Delay) de um sinal periódico. Esta técnica tem a particularidade de ser imune à secção do sinal que se escolhe para análise, permitindo uma correta identificação do atraso de grupo do sinal dente de

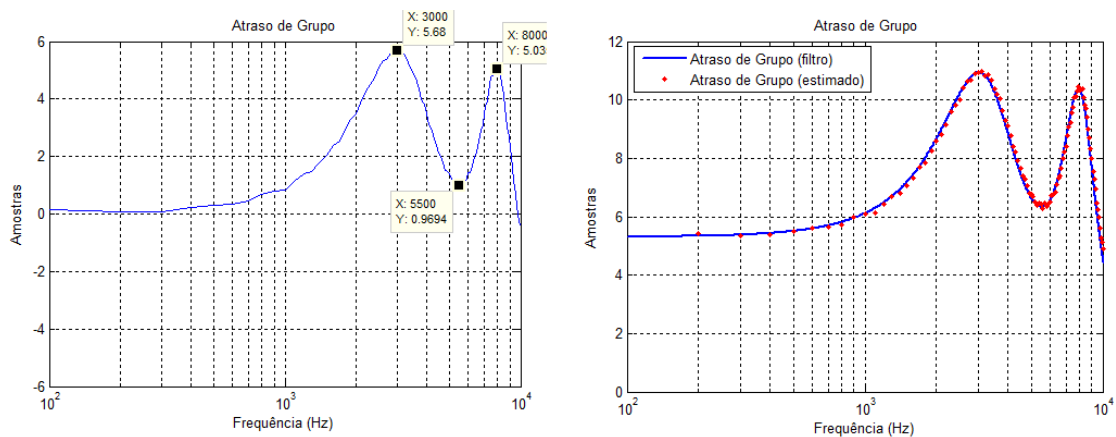


Figura 5.14: Atraso de Grupo extraído pelo sinal filtrado para validação.

serra. Esta característica permite uma posterior comparação com os resultados obtidos com os outros sinais de estímulo (*sweeps*). Os NRDs permitem caracterizar o sinal independentemente do atraso médio e da frequência fundamental. Os NRDs, na verdade, indicam o atraso relativo de um determinado harmónico à frequência fundamental do sinal, sendo além disso normalizado pelo período desse mesmo harmónico [23].

O código fornecido está otimizado para receber ficheiros no formato “pcm” com uma frequência de amostragem de 22050 Hz. Uma vez que o formato dos ficheiros originais era “wav” e amostrado a uma frequência de 48000 Hz, foi necessário fazer essa conversão, tendo sido utilizado o software de edição de áudio Adobe Audition. Após este processo, e tendo sido feitas ligeiras alterações ao código fornecido de maneira a permitir analisar os cem harmónicos necessários, decidiu-se fazer um processo de validação igual ao já utilizado para os sinais *sweep*. Usando o mesmo filtro anteriormente especificado (com um conjunto de polos/zeros em 3 kHz e 8 kHz), cujo comportamento pode ser analisado pela figura 5.8, é obtido um gráfico de atraso de grupo que é visível na figura 5.14, do lado esquerdo.

Como é mostrado na figura 5.14 (gráfico da esquerda), o atraso de grupo apresenta na mesma as duas elevações tal como o gráfico do atraso de grupo do filtro de validação (figura 5.8). A única diferença que se consegue observar entre estes dois gráficos é o facto de existir uma elevação de aproximadamente cinco amostras no atraso de grupo teórico, que não existe no gráfico extraído pelos NRDs. Para permitir compreender melhor a curvatura destes dois gráficos, foi adicionada uma contante ao atraso de grupo estimado, como é possível observar na figura 5.14, no gráfico da direita. Deste modo, consegue-se perceber que os NRDs permitem extrair o atraso de grupo de um sinal, nomeadamente no que se refere ao atraso de umas frequências relativamente a outras, e não em valor absoluto. Uma vez que um atraso de grupo constante não constitui elemento de distorção num sinal áudio, o facto de existir um desvio vertical no gráfico é, neste caso, desprezável. Na figura 5.15 está representado o atraso de grupo referente ao conjunto formado pelas colunas B & W e microfone Shure.

Este tipo de processamento apenas é efetuado no sinal captado pelo microfone, não sendo

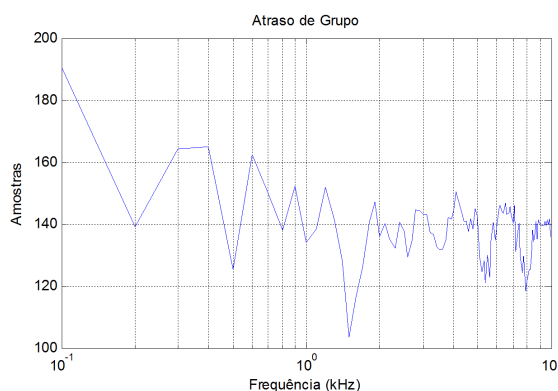


Figura 5.15: Atraso de grupo de um conjunto estimulado pelo sinal dente de serra.

aplicado o método da formula 5.2. Esta opção é explicada uma vez que, para a forma de onda em dente de serra, a fase relativa entre os diversos harmónicos e, por consequência, o atraso de grupo do sinal original, é teoricamente zero. Para provar esta opção, foi efetuado o mesmo processamento para o sinal dente de serra original. Como se pode ver na figura 5.16 o atraso de grupo é aproximadamente nulo, sendo bastante inferior aos valores apresentados para os sinais captados pelos microfones. Os resultados do processamento do atraso de grupo para todos os microfones e altifalantes estão disponibilizados no anexo D.

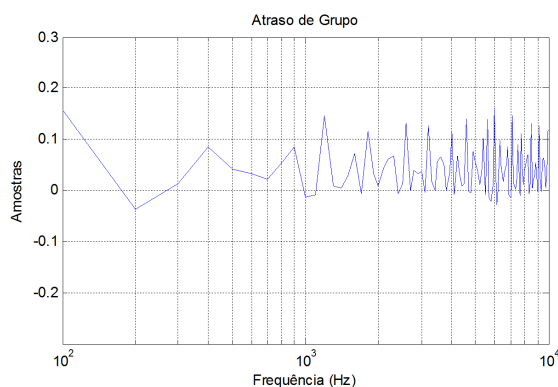


Figura 5.16: Atraso de grupo do sinal dente de serra original.

5.3 Considerações finais

A fase de processamento do sinal recolhido revelou grande complexidade, visto envolver dois sinais (*sweep* e dente de serra) de características bastante distintas. Para além disso, os diversos obstáculos encontrados durante este processamento levaram ao uso de mais tempo que o previsto. As tarefas de mais árdua resolução estiveram sempre ligadas ao cálculo do atraso de grupo, pois este dependia diretamente a fase de sinal, que é uma componente espectral que necessita de alguns cuidados suplementares que não são considerados quando se estuda apenas a magnitude.

Os testes de validação então efetuados serviram como meio para comprovar a eficácia dos métodos de extração do atraso de grupo dos dois sinais distintos (*sweep* e dente de serra). Uma vez que os resultados convergiram para o modelo teórico do filtro de validação usado para esse fim, é seguro assumir que o cálculo efetuado consegue representar, de forma fiel, o atraso de grupo dos vários sistemas em análise.

Capítulo 6

Análise dos resultados

Neste capítulo serão analisados os resultados obtidos, para assim poder determinar aspetos que sejam relevantes sobre o comportamento dos altifalantes e dos microfones no que diz respeito à sua resposta em frequência em termos de magnitude e igualmente do atraso de grupo.

Inicialmente, será feita uma inspeção visual dos vários gráficos, com o intuito de determinar variações que sejam semelhantes entre gravações que tenham um dos dispositivos em comum (microfone ou altifalante). Numa fase seguinte, será feita uma comparação analítica com a finalidade de converter esses resultados numa representação numérica, tornando assim a sua análise mais objetiva.

Foram feitas diversas tentativas para encontrar a resposta em frequência de cada altifalante e microfone de forma individual. A forma que foi usada para abordar este problema, foi interpretar as respostas em frequência das colunas e dos altifalantes como sendo incógnitas de um sistema de equações, e as respostas em frequência do conjunto, que já é possível obter como foi demonstrado até agora, como sendo constantes. Os diferentes sinais de estímulos foram igualmente considerados nesta operação, tendo sido também por vezes feita a análise assumindo apenas um dos estímulos.

Apesar dos diversos esforços, não foi possível chegar a um resultado válido. Para que este fosse aceite como válido e por sua vez tratável, teria de ser possível reconstruir a resposta em frequência de determinado dispositivo a partir dos sinais já existentes. Todas as tentativas de resolução terminariam com uma indeterminação.

Deste modo, não é possível chegar de uma forma exata à resposta em frequência dos diversos microfones e altifalantes, sendo apenas possível fazer estimativas a seu respeito.

6.1 Análise visual

Este primeiro passo consistiu na impressão, numa folha de tamanho A3, das várias respostas em frequência de todas as combinações possíveis entre os microfones e altifalantes (totalizando 12 gráficos), para um determinado sinal de estímulo. Estava assim representada uma tabela com 4

colunas (uma por microfone) e 3 linhas (uma por altifalante). Este processo foi efetuado para os vários gráficos do atraso de grupo e respostas em frequência.

Após algum tempo a analisar os vários gráficos e seus padrões de evolução, quer ao longo das linhas (comparando assim microfones mantendo o altifalante em comum), quer ao longo das colunas (comparando desta vez altifalantes tendo em comum o mesmo microfone), foi possível apontar alguns pontos de semelhança entre estes.

Nos gráficos da resposta em frequência, nomeadamente na magnitude, existem várias antirressonâncias, e a sua quantidade e formato aparentam ser uma característica dos altifalantes. Tal deve-se ao facto de estas se manterem praticamente inalteradas com a mudança para outro microfone, enquanto que, alterando o altifalante mantendo o mesmo dispositivo de gravação, provoca grandes mudanças, principalmente na sua localização em frequência, e por vezes, na sua quantidade.

Existem ainda outros padrões visíveis a frequências mais baixas (entre 100 Hz e 2 kHz) que são comuns entre gravações efetuadas com o mesmo altifalante emissor. Por outro lado, comparando a evolução dos gráficos entre as várias colunas, verifica-se que estas revelam uma maior diferença entre si, isto para a mesma zona analisada.

Uma outra característica que é possível de observar é a existência de contaminação das gravações efetuadas pelos dois microfones dinâmicos, de uma frequência de 50 Hz e harmónicos associados. Esta situação revela que os microfones de condensador são mais imunes à contaminação da gravação pela frequência de rede elétrica e respetivos harmónicos.

No que diz respeito aos gráficos que representam o atraso de grupo das diversas combinações possíveis entre dispositivos, é visível um comportamento semelhante ao já observado na magnitude dos gráficos da resposta em frequência.

Existem por exemplo três picos (logo acima de 1 kHz) no atraso de grupo da gravação efetuada a partir das colunas *Adam*, para o *sweep* linear. Esses três picos estão visíveis para todas as gravações nessas colunas, para os quatro microfones diferentes. É, no entanto, mais difícil encontrar pontos semelhantes entre gravações a partir do mesmo microfone para as três colunas distintas.

Um comportamento que é igualmente visível nos gráficos do atraso de grupo, é que estes têm maior amplitude nas baixas frequências, indicando que é nessa zona que este parâmetro é mais pronunciado.

Existe ainda um outro comportamento que é observável quando comparados os gráficos da magnitude da resposta em frequência com os do atraso de grupo, isto para uma gravação com o mesmo altifalante e microfone. De facto, as frequências às quais estão localizadas as antirressonâncias, existem geralmente picos locais no gráfico do atraso de grupo. Este comportamento sugere que ambos os efeitos estão relacionados.

Observando agora os gráficos da magnitude da resposta em frequência extraídos a partir do sinal dente de serra e comparando com o mesmo tipo de gráficos para os sinais *sweep*, é visível na figura 6.1 que ambos possuem a mesma envolvente no que diz respeito à magnitude. É de realçar que, sendo o sinal dente de serra constituído por harmónicos espaçados em 100 Hz, a sua resolução não será tão boa como a representação proveniente dos outros dois sinais de estímulo. A

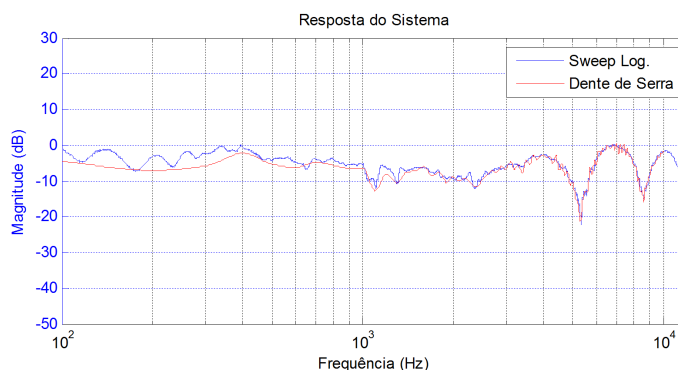


Figura 6.1: Comparação da magnitude da resposta em frequência extraída a partir de dois sinais distintos.

interpolação efetuada à magnitude da resposta em frequência do sistema, calculada pelo estímulo dente de serra, permite assim uma melhor comparação com os outros gráficos de resposta em frequência.

No que diz respeito aos gráficos do atraso de grupo extraídos pelo sinal dente de serra, o facto de estes não apresentarem uma resolução espectral elevada (apenas uma amostra por 100 Hz), torna-os pouco detalhados para resoluções baixas, sendo esse aspeto visível quando comparado com o atraso de grupo extraído pelos sinais *sweep*.

Todos os gráficos da resposta em frequência e atraso de grupo aqui referidos se encontram disponibilizados em anexo (anexo C e D respetivamente), para assim poder ser feita uma comparação por parte do leitor aos vários aspetos aqui analisados.

6.2 Análise numérica

Tendo sido feita até ao momento uma comparação dos diversos gráficos por um método unicamente visual, irá agora ser feita uma comparação por um processo numérico, para posteriormente confrontar os resultados obtidos com os comportamentos observados na análise anterior.

Foi necessário encontrar um método numérico que permitisse comparar os gráficos das respostas em frequência e dos atrasos de grupo, e assim achar um valor que indicasse a sua semelhança. Com este objetivo, usou-se o coeficiente de correlação de Pearson. Este mede o grau de correlação entre dois vetores numéricos, podendo assumir valores entre “-1” e “1”. Um coeficiente de valor “1” indica que os vetores são iguais, se este assumir valor “0” quer dizer que não existe uma relação linear entre eles, e no caso de o resultado ser “-1” significa que os valores contidos nos vetores são simétricos entre si. A fórmula matemática que permite este cálculo está definida [24] como

$$r_{xy} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N - 1} = \frac{\sum (X - \bar{X}) (Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (6.1)$$

onde r_{xy} é o coeficiente de correlação de Pearson, X e Y são os vetores numéricos e $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ as respetivas médias.

Para facilitar o cálculo, e uma vez que apenas se pretende perceber a relação entre os vetores relativamente às suas variações, e não em termos de valores absolutos, processaram-se os diversos gráficos de maneira a que as suas médias fossem sempre zero. Sendo assim, a fórmula fica simplificada sob a forma

$$r_{xy} = \frac{\sum X.Y}{\sqrt{\sum X^2 \cdot \sum Y^2}}. \quad (6.2)$$

Após terem sido calculados todos os coeficientes de correlação entre os vários gráficos de magnitude da resposta em frequência e entre os gráficos de atraso de grupo, os dados foram organizados em diversas tabelas. Essas tabelas permitem perceber qual o grau de semelhança entre duas gravações idênticas, tendo sido apenas alterado o microfone ou altifalante. As tabelas estão disponíveis no anexo E onde podem ser consultadas.

Analisando os resultados dentro da mesma tabela, podemos observar que a gama de valores existente para o *sweep* linear é bastante semelhante aos valores existentes para o *sweep* logarítmico. Comparando agora os padrões numéricos com o caso dos dados extraídos através do sinal dente de serra, podemos ver que nem sempre os valores estão próximos. Isto acontece devido à quantidade reduzida de valores (cem ou menos) existentes nos gráficos do dente de serra, uma vez que este sinal apenas possui cem harmónicos. De qualquer modo, os resultados apresentam-se bastante próximos tendo em conta esta limitação.

O passo seguinte consistiu em calcular a média dos coeficientes já extraídos para cada um dos dispositivos (microfones e altifalantes) em análise, para as magnitudes da resposta em frequência e atrasos de grupo. Após uma análise aos valores de média calculados, foi possível concluir que existe um maior grau de semelhança entre gravações efetuadas ao mesmo altifalante do que gravações realizadas pelo mesmo microfone. A magnitude da resposta em frequência dos diversos microfones é mais semelhante entre si do que a magnitude da resposta em frequência dos diversos altifalantes. O mesmo se aplica no que diz respeito ao atraso de grupo. Posto isto, pode-se concluir que o altifalante é o elemento do conjunto que mais afeta e perturba o sinal original.

6.3 Análise acústica

Vamos agora tentar perceber até que ponto os valores de atraso de grupo extraídos dos diversos conjuntos podem ser perceptíveis pelo ouvinte. Para conseguir elaborar esta fase de análise, vamos comparar os valores conseguidos com os dados atualmente disponíveis na literatura. Esses dados estão disponíveis através da tabela 6.1.

Os valores do limite audível em amostras foi calculado tendo em conta a frequência de amostragem usada ao longo do estudo. É preciso ter atenção que estes valores são uma estimativa. A capacidade de uma pessoa ouvir ou não o efeito do atraso de grupo num sinal sonoro depende de

Tabela 6.1: Limites audíveis para atraso de grupo [2].

Frequência	Limite audível (tempo)	Limite audível (amostras)
500 Hz	3.2 ms	154
1 kHz	2 ms	96
2 kHz	1 ms	48
4 kHz	1.5 ms	72
8 kHz	2 ms	96

vários fatores. Existe inclusivamente a capacidade do ouvido e cérebro se irem adaptando a este tipo de testes [2], e ficarem treinados para melhor perceber este tipo de alterações.

Tendo em conta estes aspetos, existem alguns casos onde os limites são excedidos, podendo vir a ser perceptíveis para o ouvinte. No entanto, uma vez que os sinais são simultaneamente afetados por distorções quer em termos de magnitude como de fase, torna-se difícil para quem ouve entender qual deles é mais pronunciado.

6.4 Considerações finais

A análise de resultados aqui feita, quer inicialmente em termos visuais, quer posteriormente pela transição para um método mais analítico, permitiu chegar a algumas conclusões interessantes.

Foi assim possível perceber que os altifalantes são os elementos que mais poluem um sinal sonoro quando comparados com os microfones.

Além disso, foi possível chegar à conclusão que o atraso de grupo, por vezes observado nos gráficos, pode chegar a ser audível para quem escuta o sinal.

Capítulo 7

Conclusão

No capítulo atual será feita uma análise do trabalho desenvolvido e ponderadas as várias etapas e dificuldades sentidas na sua execução. Serão igualmente destacados os pontos essenciais e conclusões obtidas. Numa última fase será feita uma reflexão acerca dos pontos que poderiam ser desenvolvidos com maior profundidade.

7.1 Análise do trabalho

O trabalho desenvolvido no decorrer desta dissertação tinha como objetivo final caracterizar o atraso de grupo de microfones e altifalantes. Inicialmente estava prevista a utilização de um sinal de estímulo (dente de serra) e a utilização de três microfones e três altifalantes.

No decorrer da investigação feita, foi decidido que seria usado outro sinal de estímulo, neste caso um sinal *sweep*. No entanto, devido à dúvida existente de qual dos dois tipos seria o melhor, decidiu-se usar um linear e outro logarítmico. A utilização destes dois sinais passou a servir como método de comprovação de resultados, visto que a resposta em frequência dos diversos conjuntos teria de ser a mesma quando utilizado diferentes estímulos.

Um outro aspeto relevante foi a utilização de uma câmara anecóica para fazer a gravação dos vários estímulos. Quando comparadas as gravações efetuadas numa convencional sala, com as outras em ambiente anecoico, é claramente perceptível a diferença na definição dos sinais, devido ao isolamento acústico e eliminação de ecos. Este fator tornou a análise dos sinais mais simples, visto que a existência de ruído perturbaria imenso o processamento e afetaria os resultados finais.

No decorrer dos trabalhos foram feitas imensas tentativas que proporcionassem a separação da resposta em frequência do microfone da do altifalante. O problema foi inicialmente abordado como sendo um sistema de equações, no entanto a sua resolução não era possível. Foi pensado outro método que envolveria fazer a média das várias respostas em frequência para um dispositivo em específico, por exemplo microfone. Apesar disso, o resultado final seria a resposta em frequência do microfone misturada com uma resposta em frequência de um altifalante virtual. Esse altifalante virtual, teria uma resposta em frequência que seria a média dos três efetivamente utilizados. Esta solução foi igualmente descartada.

Como solução final procedeu-se a uma análise estatística sobre os diversos gráficos que, apesar de não permitir saber, de modo exato, qual a resposta em frequência e atraso de grupo de cada um dos dispositivos, permite ficar a conhecer qual deles (microfone ou altifalante) é o mais perturbador para um determinado sinal sonoro.

Após o desenvolvimento desta dissertação é possível concluir que o estudo do atraso de grupo no que diz respeito a este tipo de dispositivos é atualmente pouco expressivo na literatura. A existência de artigos científicos que abordam esta questão é praticamente inexistente o que tornou o desenvolvimento deste documento um desafio.

Os objetivos inicialmente propostos foram assim atingidos, uma vez que foi possível comparar os vários microfones e altifalantes através do atraso de grupo e magnitude de resposta em frequência que foram determinados experimentalmente.

7.2 Desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido até ao momento nunca se poderá dar como terminado, visto esta ser uma área de investigação que carece de estudos mais aprofundados. Pode-se depreender que tal aconteça por não existirem métodos simples de medir as características da fase de um sinal e por não se conhecer ao pormenor a capacidade que o ouvido humano possui de perceber o atraso das frequências.

Um aspeto que poderia melhorar o trabalho até agora desenvolvido seria a criação de uma interface gráfica que, a partir da seleção do sinal de estímulo, permitisse comparar o desempenho dos vários altifalantes e microfones. Esta fase do trabalho começou até em parte a ser desenvolvida, mas devido ao escasso tempo disponível na parte final do estudo, e uma vez que a análise dos sinais acaba por ser um aspeto de maior prioridade, não foi possível de terminar.

Para permitir uma melhor comparação entre dispositivos do mesmo tipo (microfones ou altifalantes), seria também interessante conseguir encontrar algum método que possibilitasse a separação na resposta em frequência da componente referente ao microfone e da outra ligada ao altifalante. Conseguindo ultrapassar esta dificuldade, e separando também corretamente a resposta em fase do microfone e altifalante, poderia posteriormente ser encontrado o gráfico de atraso de grupo de cada dispositivo.

Anexo A

Representação em frequência dos estímulos

Neste anexo são apresentadas as representações em frequência dos três sinais de estímulo.

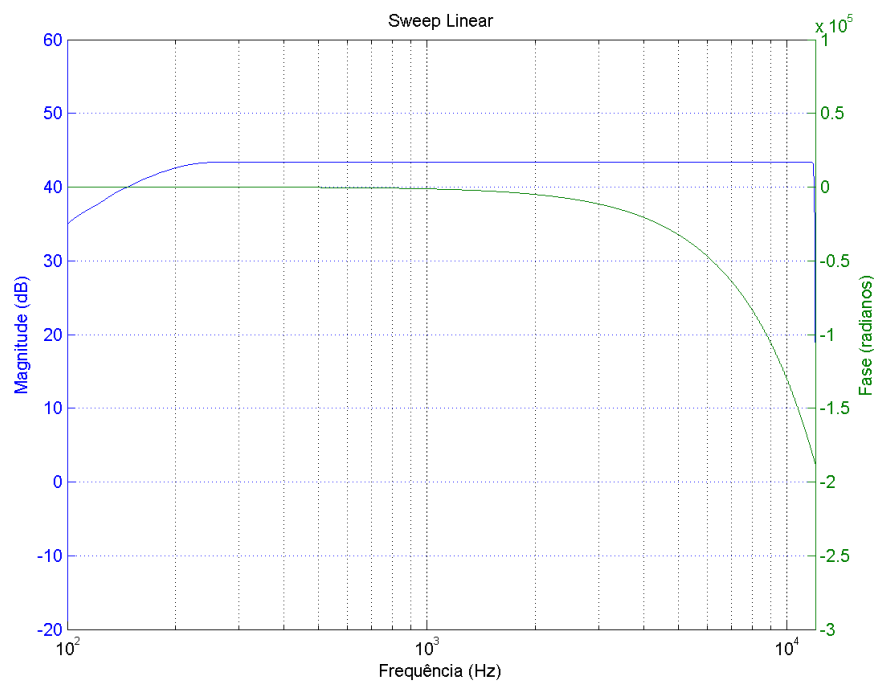


Figura A.1: Sweep linear - estímulo.

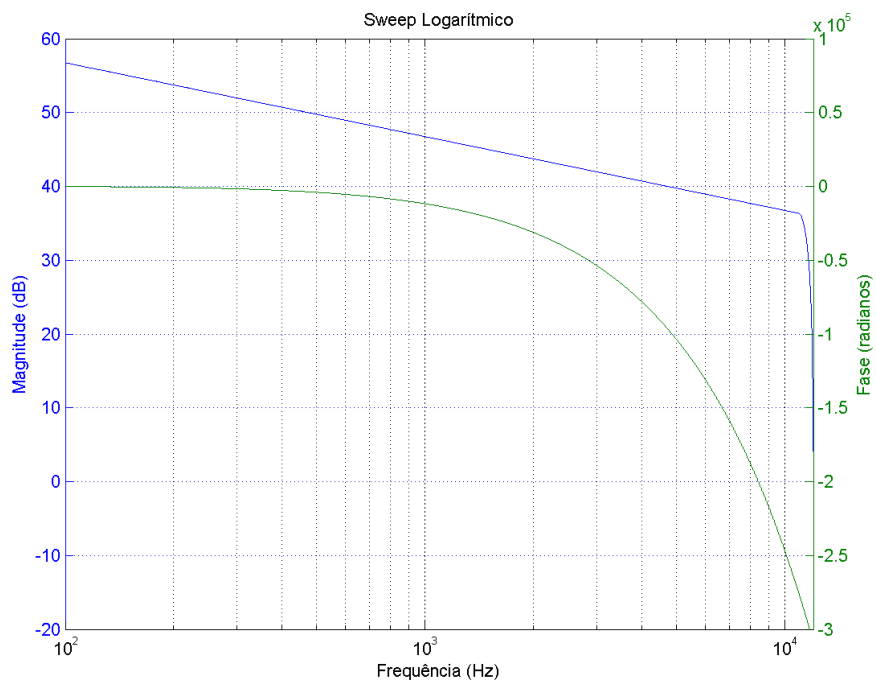


Figura A.2: Sweep logarítmico - estímulo.

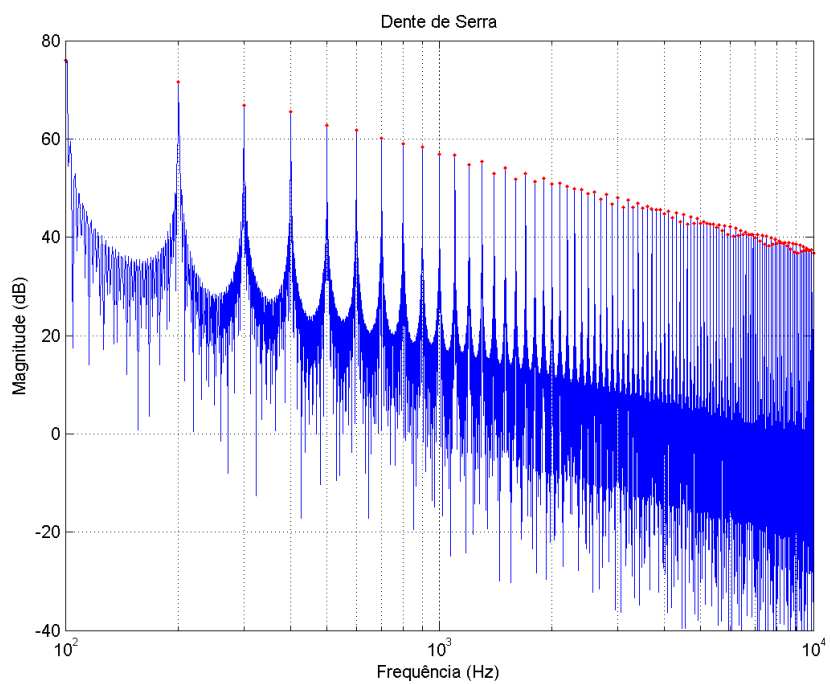


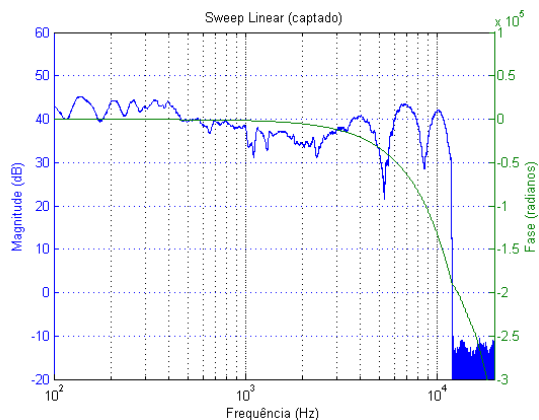
Figura A.3: Dente de serra - estímulo.

Anexo B

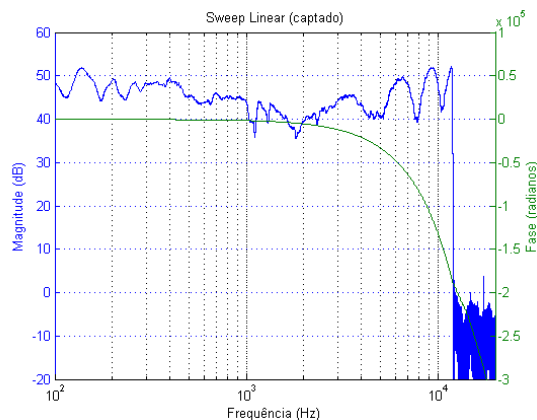
Representação em frequência dos estímulos (captado)

Neste anexo são apresentadas as representações em frequência dos estímulos gravados sob diversos microfones e altifalantes. O espaço abaixo em branco foi deixado propositalmente para permitir uma melhor visualização dos gráficos nas páginas seguintes. Por cada duas páginas estão organizados os gráficos (para um estímulo) através de três linhas (altifalantes) e quatro colunas (microfones). Deste modo consegue-se uma melhor comparação visual entre os resultados.

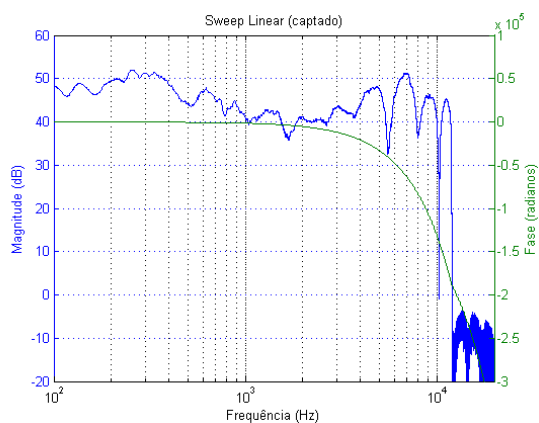
Nas figuras B.1 e B.2 encontra-se a representação em frequência para o *sweep* linear, nas figuras B.3 e B.4 para o *sweep* logarítmico e, por fim, nas figuras B.5 e B.6 para o caso do dente de serra.



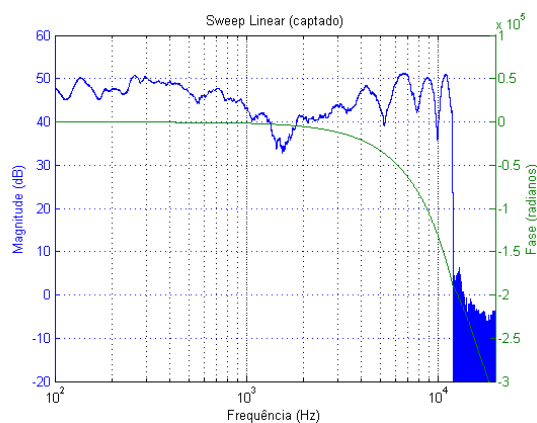
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



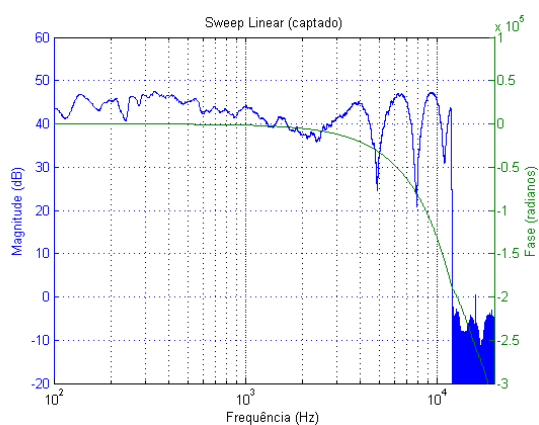
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



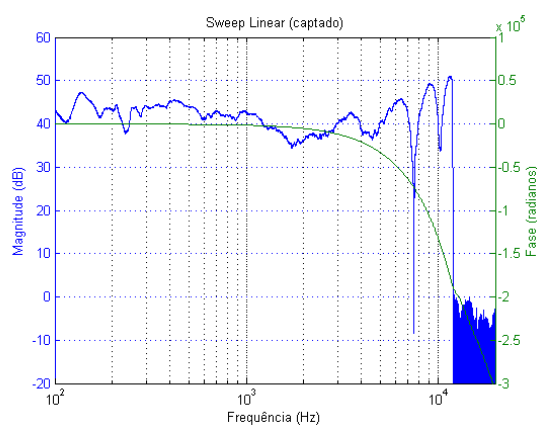
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

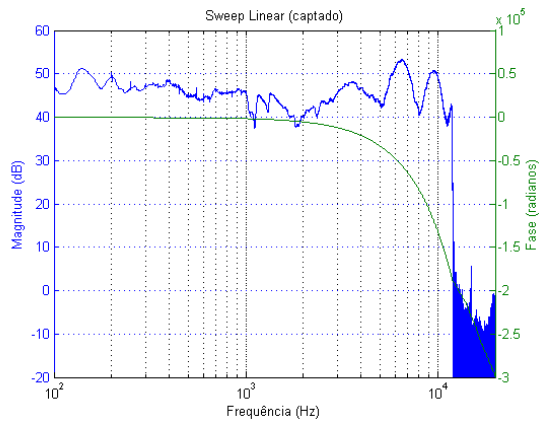


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

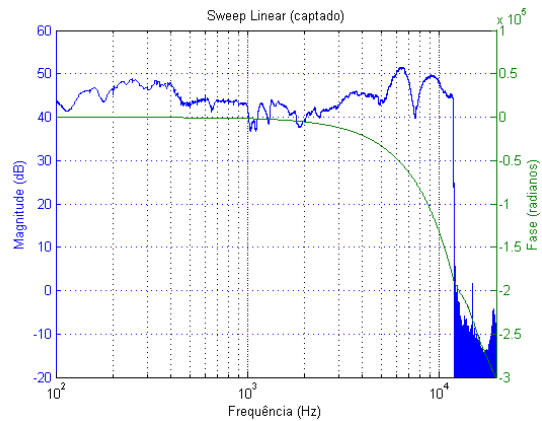


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

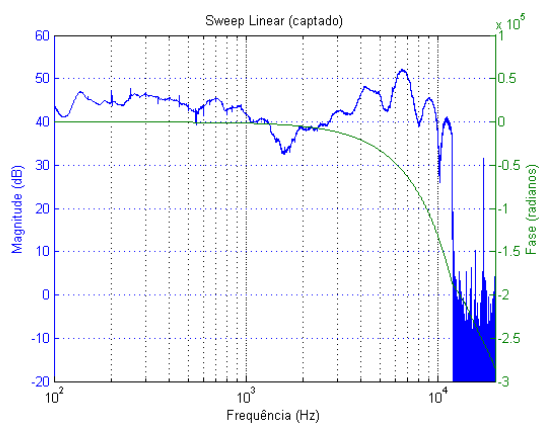
Figura B.1: Representação em frequência do *sweep* linear captado (parte 1).



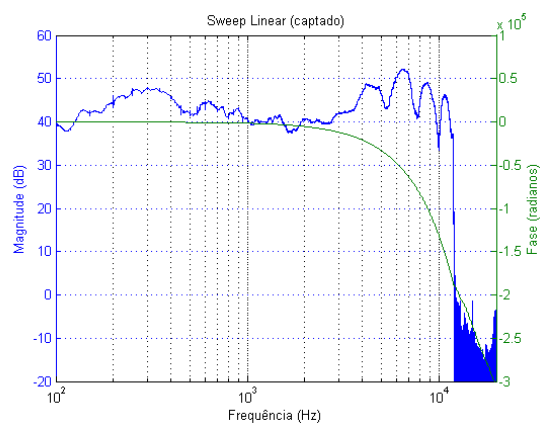
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



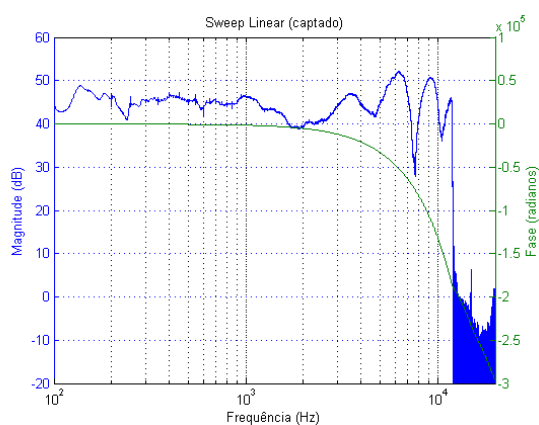
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



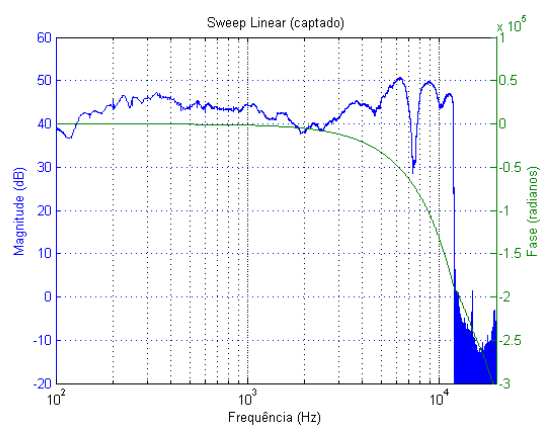
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.

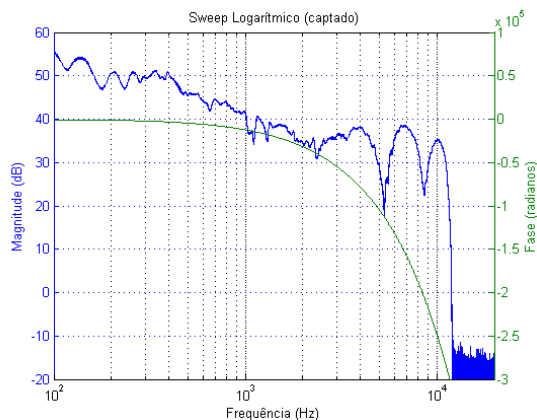


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.

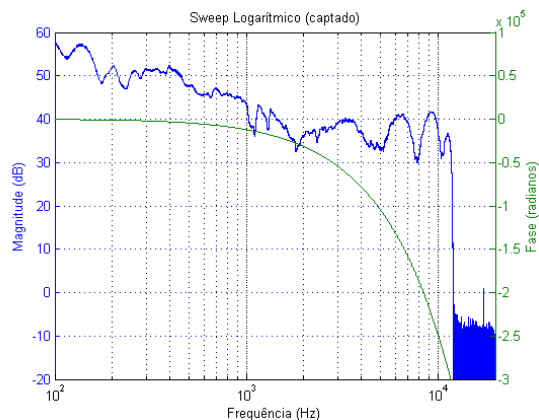


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

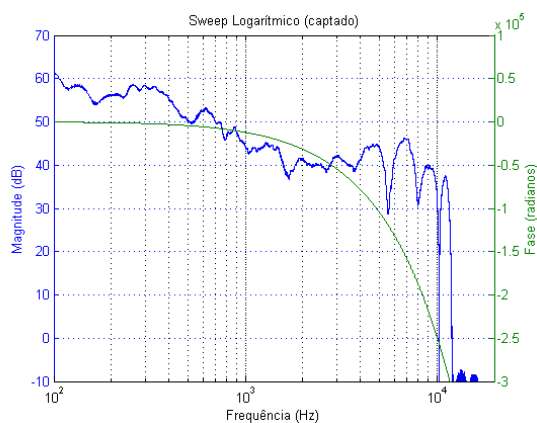
Figura B.2: Representação em frequência do *sweep* linear captado (parte 2).



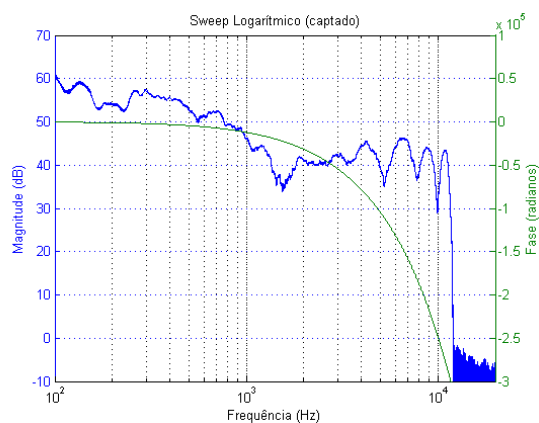
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



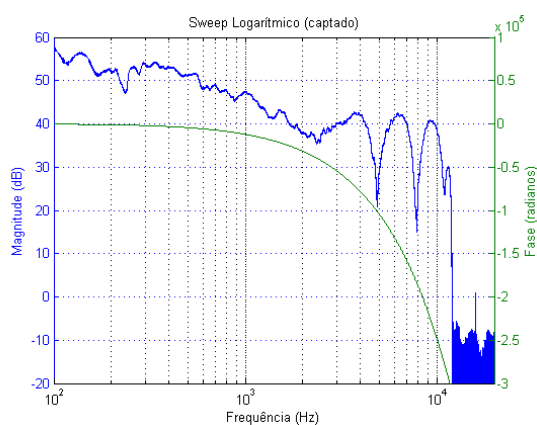
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



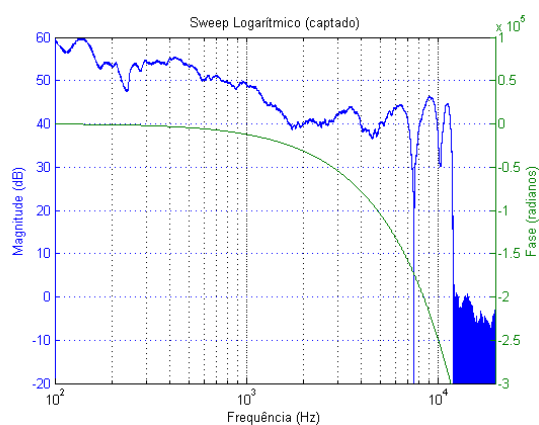
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

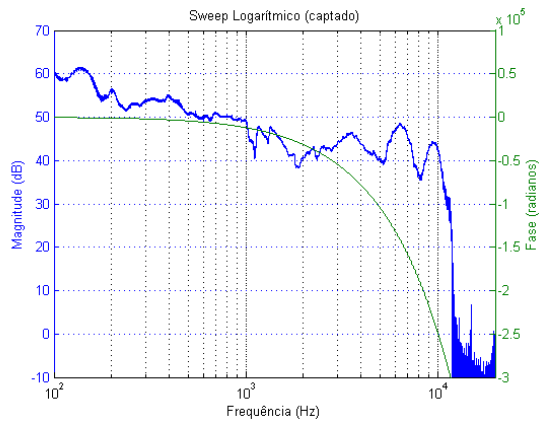


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

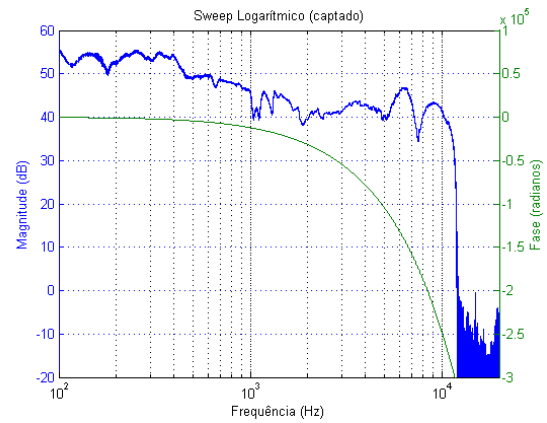


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

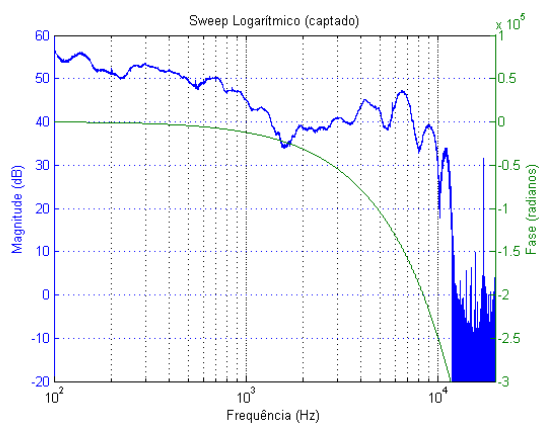
Figura B.3: Representação em frequência do *sweep* logarítmico captado (parte 1).



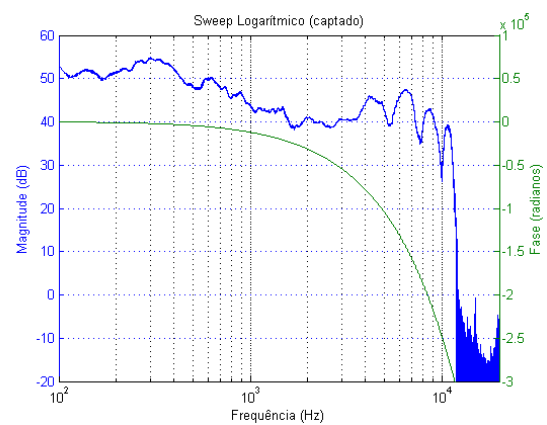
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



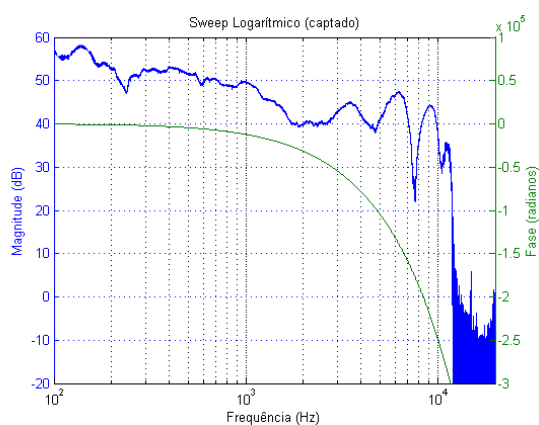
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



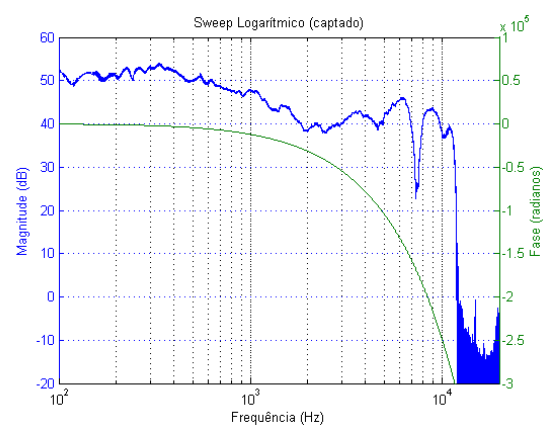
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.

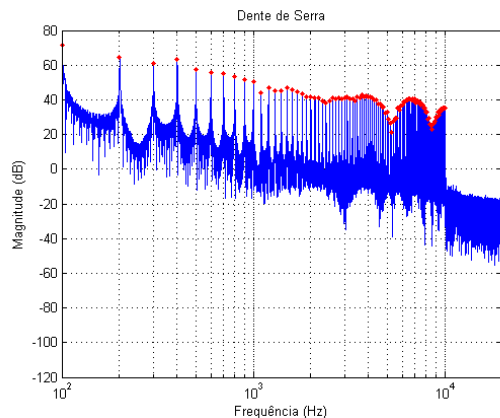


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.

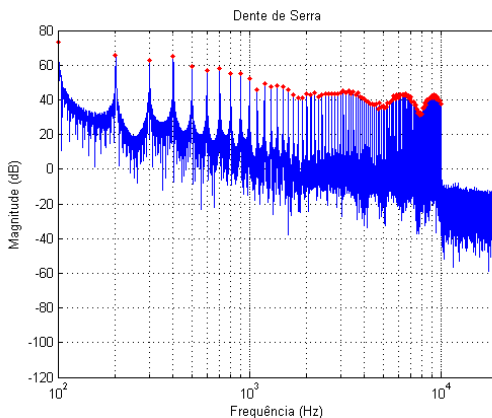


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

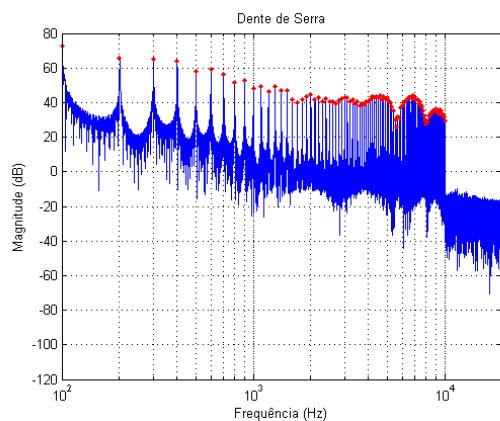
Figura B.4: Representação em frequência do *sweep* logarítmico captado (parte 2).



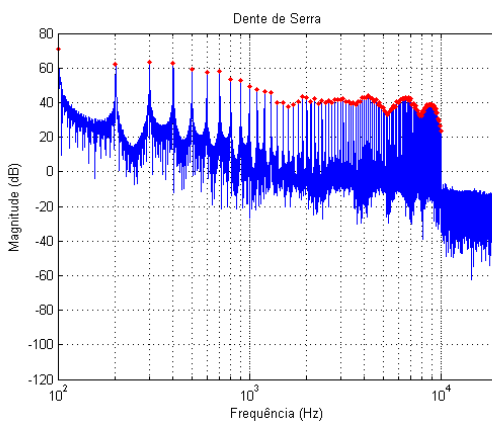
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



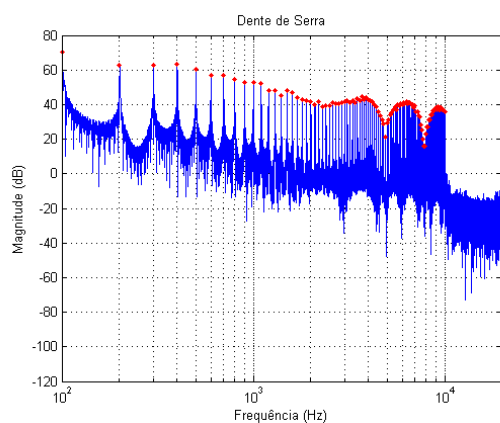
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



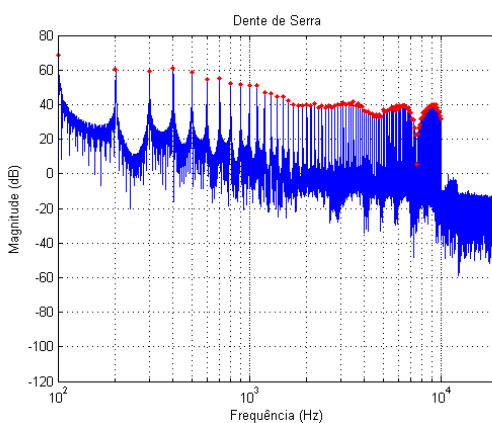
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

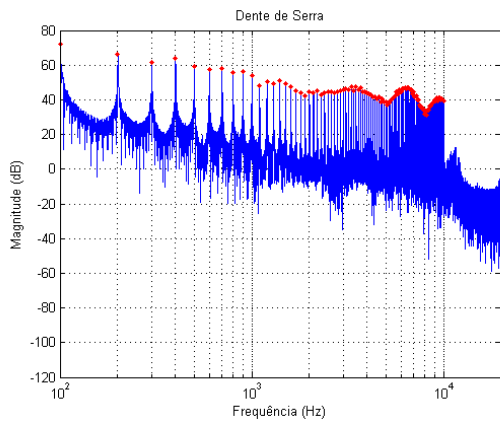


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

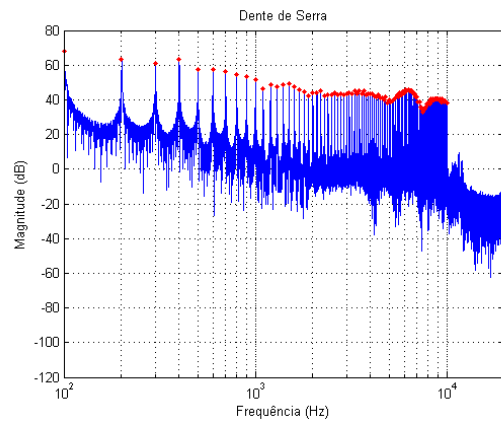


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

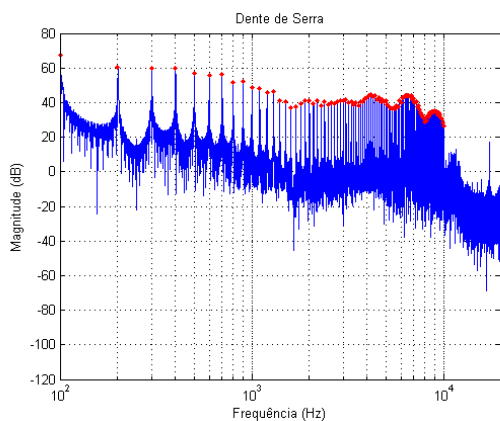
Figura B.5: Representação em frequência do dente de serra captado (parte 1).



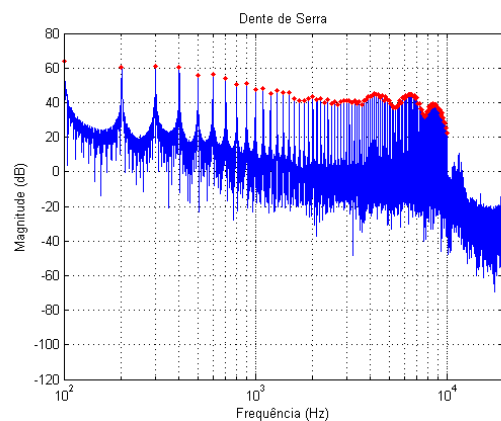
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



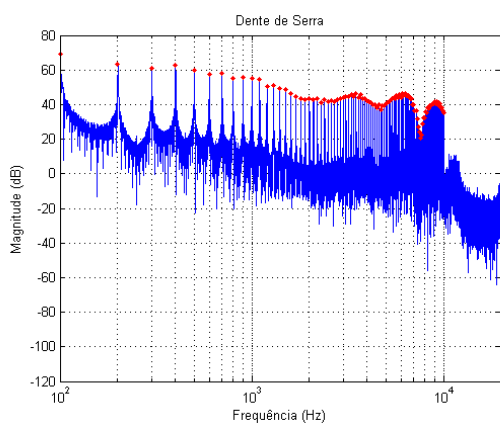
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



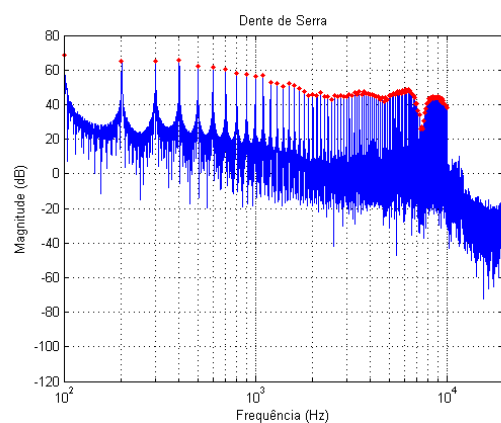
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.



(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.



(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

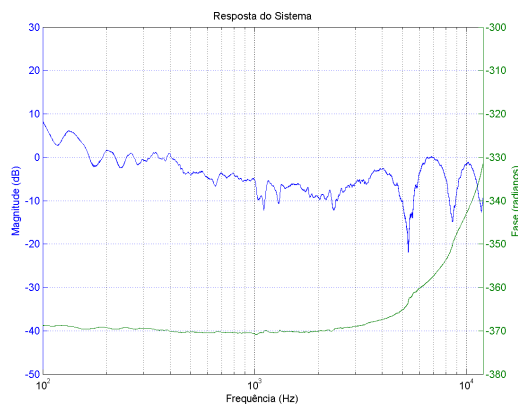
Figura B.6: Representação em frequência do dente de serra captado (parte 2).

Anexo C

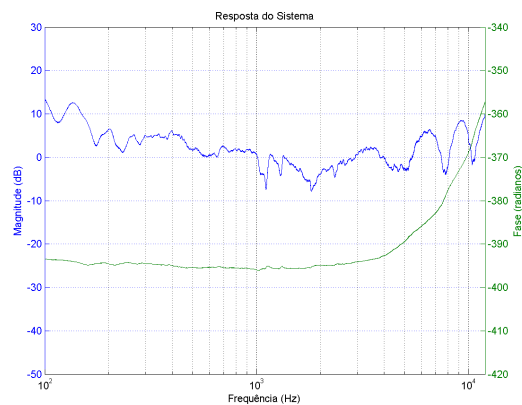
Resposta em frequência dos conjuntos altifalante e microfone

Neste anexo são apresentadas as respostas em frequência dos diversos conjuntos formados por microfones e altifalantes. O espaço deixado em branco existe propositadamente para permitir uma melhor visualização dos gráficos nas páginas seguintes. Por cada duas páginas estão organizados os gráficos (para um estímulo) através de três linhas (altifalantes) e quatro colunas (microfones). Deste modo consegue-se uma melhor comparação visual entre os resultados. Para o caso da resposta em frequência calculada a partir do estímulo dente de serra, estão representados nestes pontos vermelhos, que correspondem à magnitude da resposta em frequência extraída pelos harmónicos do sinal dente de serra e uma linha a azul que é a função interpolada a partir dos pontos calculados.

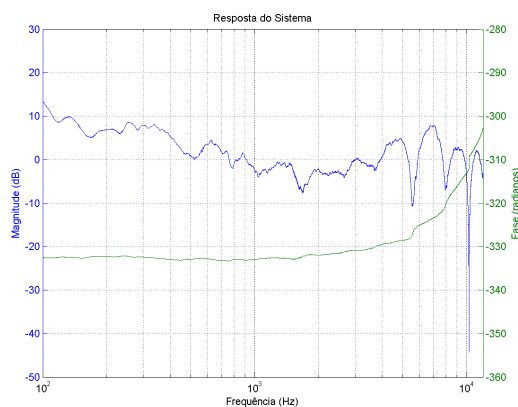
Nas figuras C.1 e C.2 encontra-se a resposta em frequência do conjunto estimulado pelo *sweep* linear, nas figuras C.3 e C.4 pelo *sweep* logarítmico e, finalmente, nas figuras C.5 e C.6 pelo dente de serra.



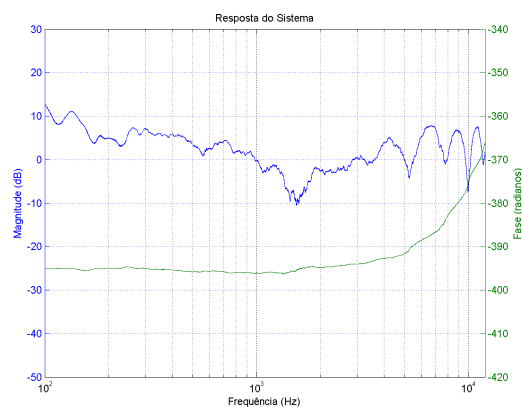
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



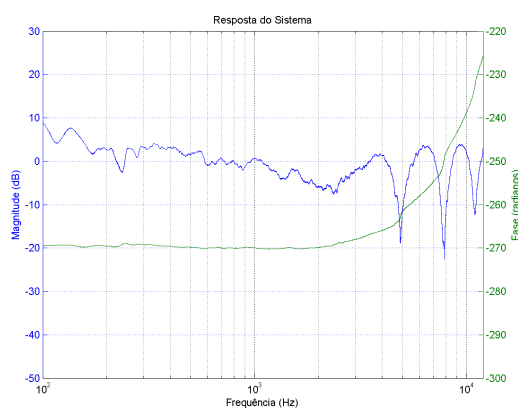
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



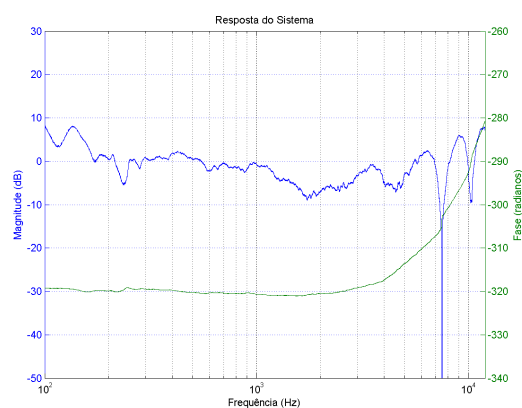
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

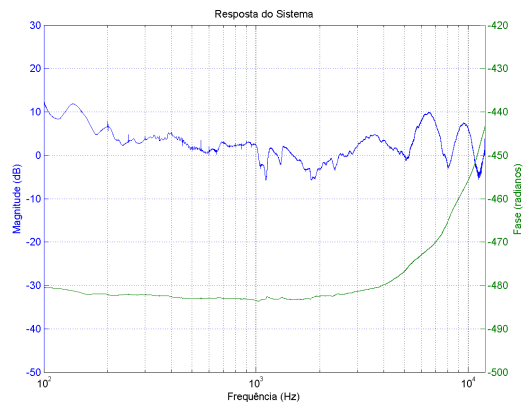


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

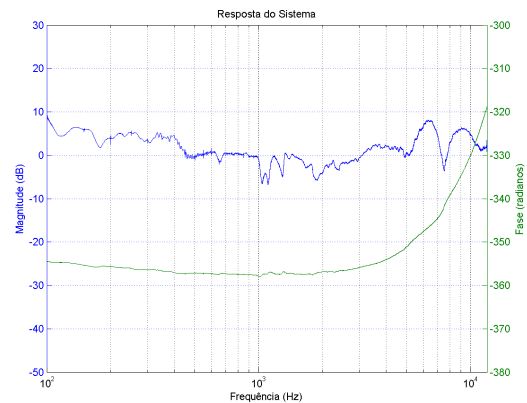


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

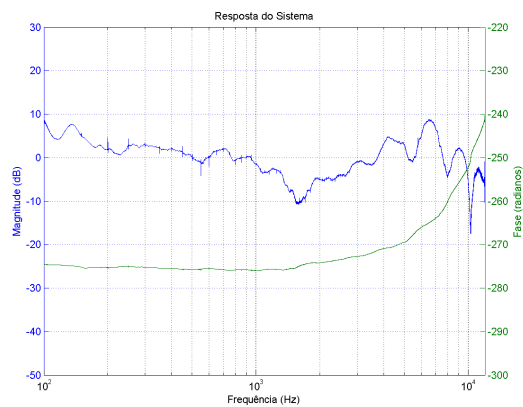
Figura C.1: Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: *sweep* linear (parte 1).



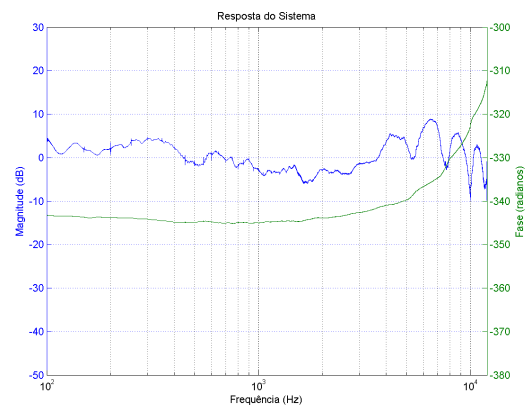
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



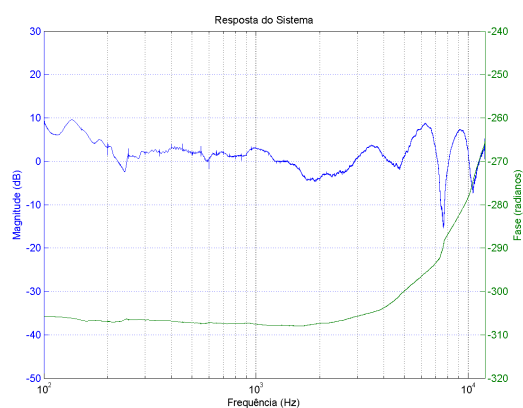
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



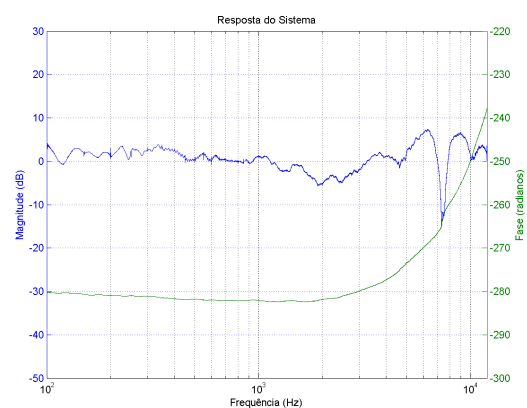
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.

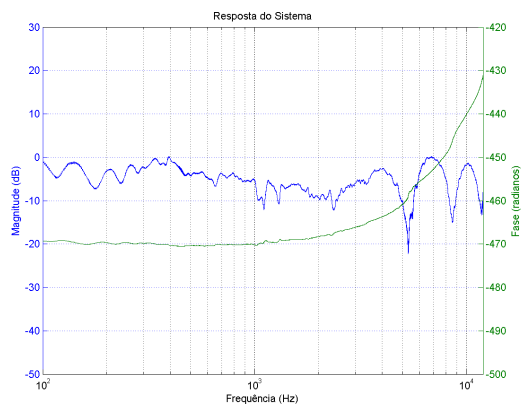


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.

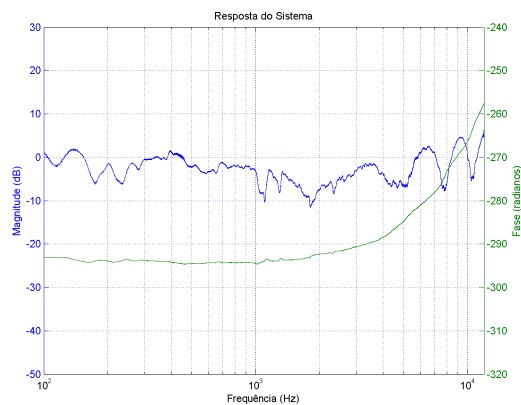


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

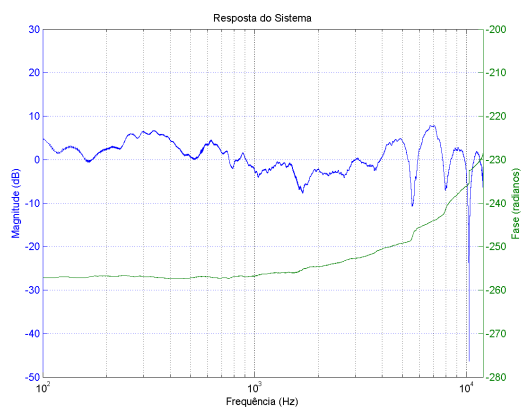
Figura C.2: Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: *sweep* linear (parte 2).



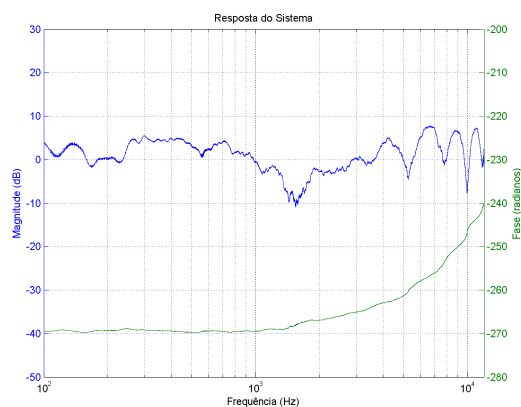
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



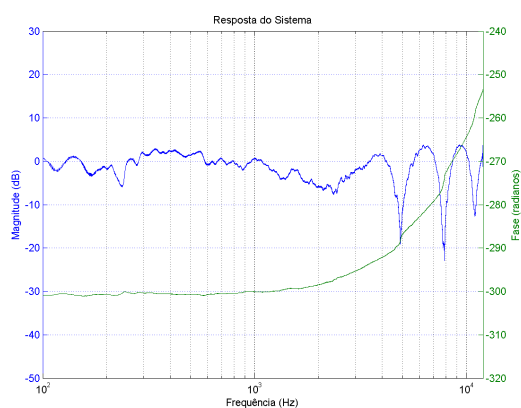
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



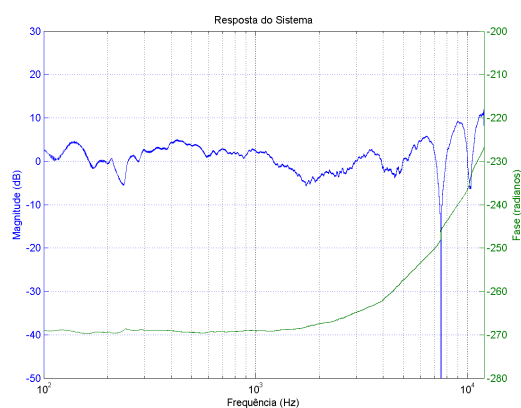
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

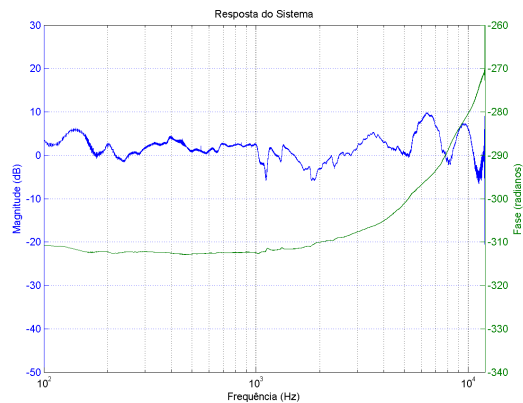


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

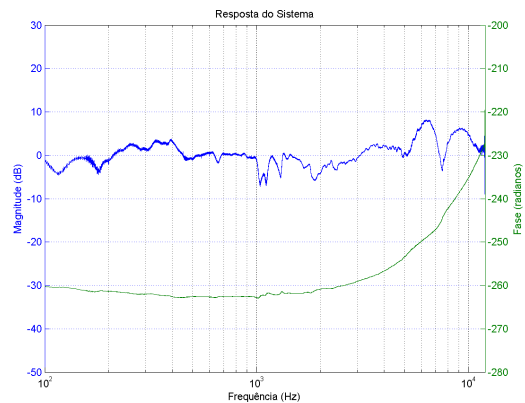


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

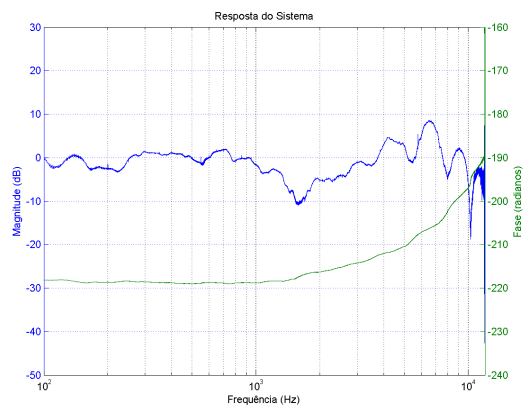
Figura C.3: Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: *sweep* logarítmico (parte 1).



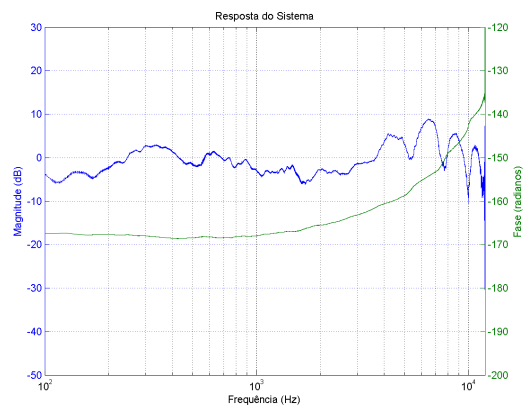
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



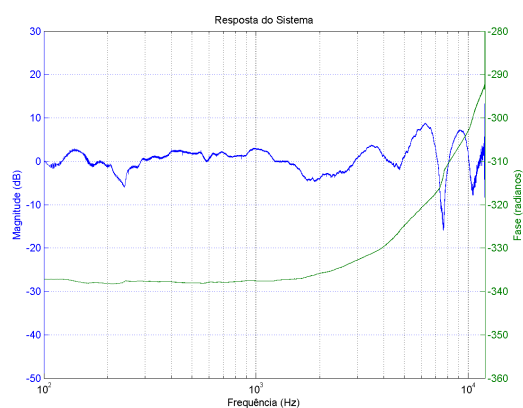
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



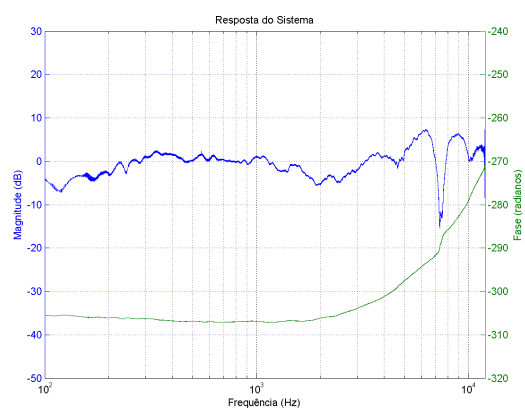
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.

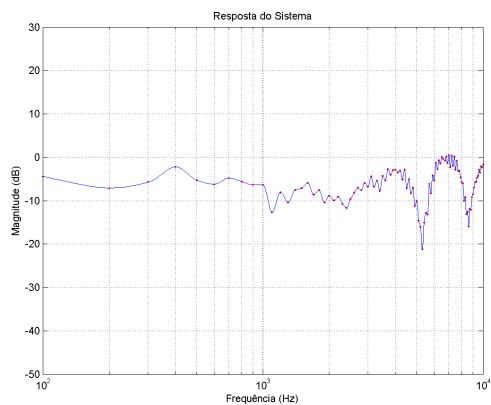


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.

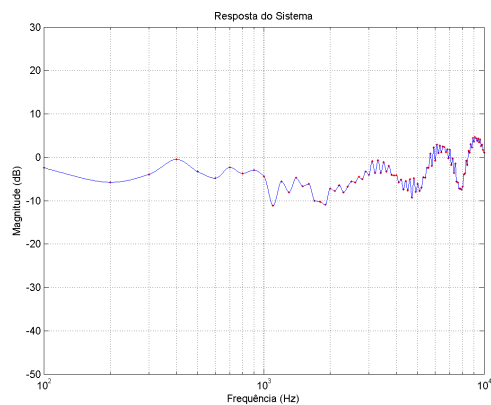


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

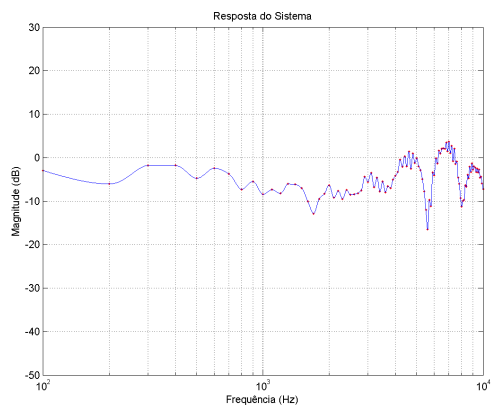
Figura C.4: Respostas em frequência do conjunto. Estímulo usado: *sweep* logarítmico (parte 2).



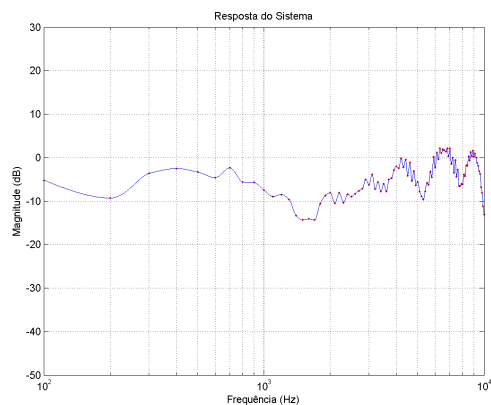
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



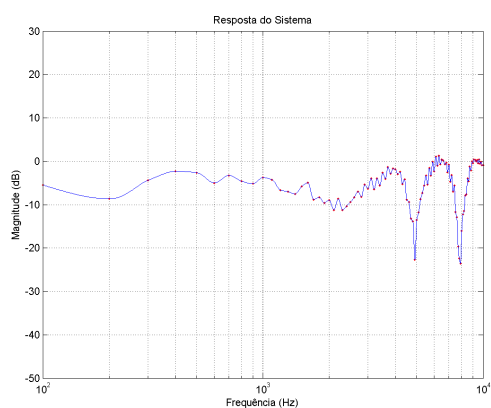
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



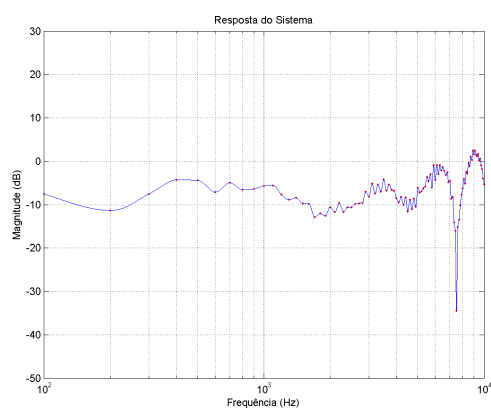
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

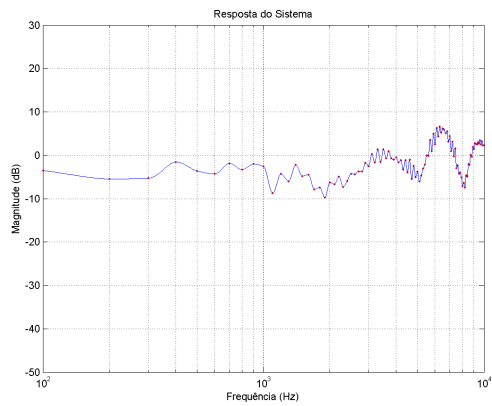


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

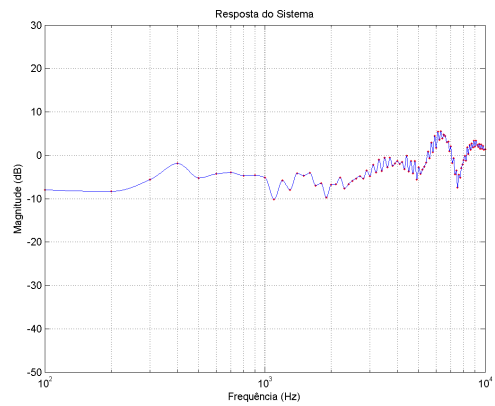


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

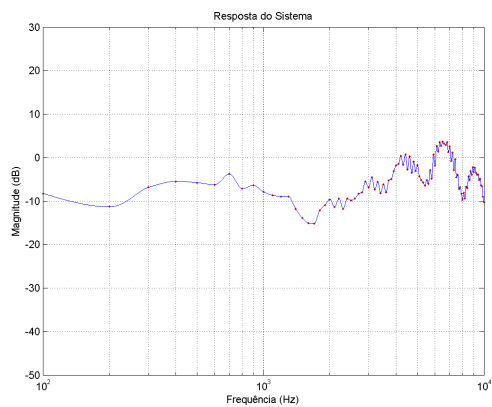
Figura C.5: Respostas em frequência do conjunto e interpolação. Estímulo usado: dente de serra (parte 1).



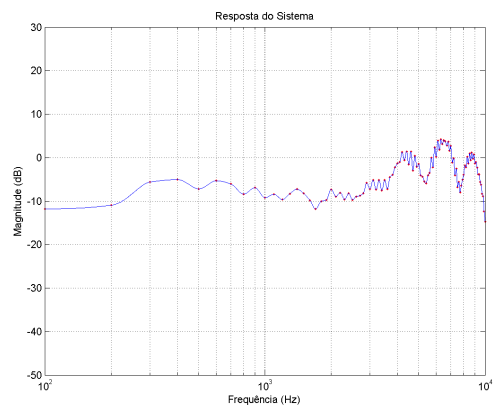
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



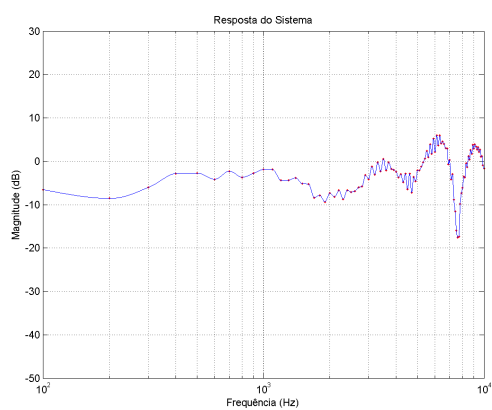
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



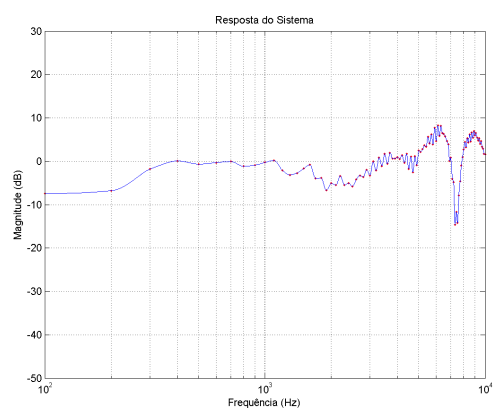
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.



(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.



(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

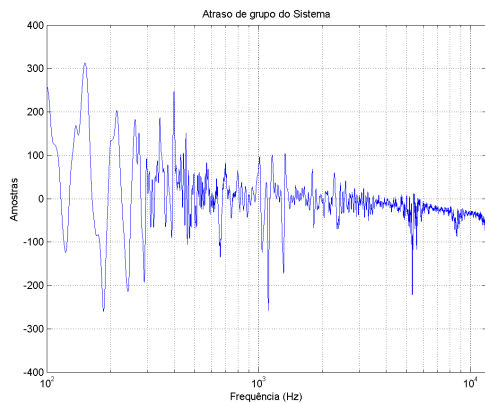
Figura C.6: Respostas em frequência do conjunto e interpolação. Estímulo usado: dente de serra (parte 2).

Anexo D

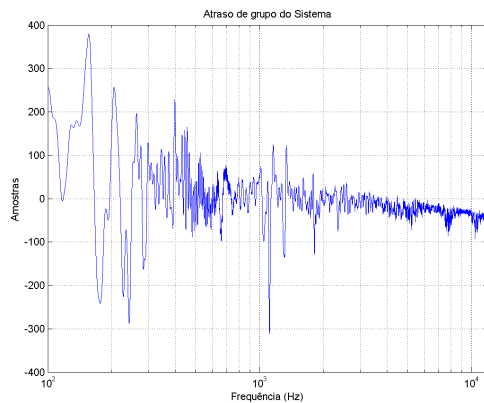
Atraso de grupo dos conjuntos altifalante e microfone

Neste anexo são apresentados os atrasos de grupo dos diversos conjuntos formados por microfones e altifalantes. O espaço deixado em branco existe propositadamente para permitir uma melhor visualização dos gráficos nas páginas seguintes. Por cada duas páginas estão organizados os gráficos (para um estímulo) através de três linhas (altifalantes) e quatro colunas (microfones). Deste modo consegue-se uma melhor comparação visual entre os resultados.

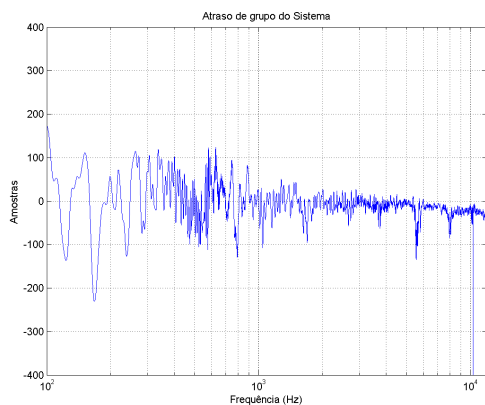
Nas figuras D.1 e D.2 encontra-se o atraso de grupo do conjunto estimulado pelo *sweep* linear, nas figuras D.3 e D.4 pelo *sweep* logarítmico e finalmente, nas figuras D.5 e D.6 pelo dente de serra.



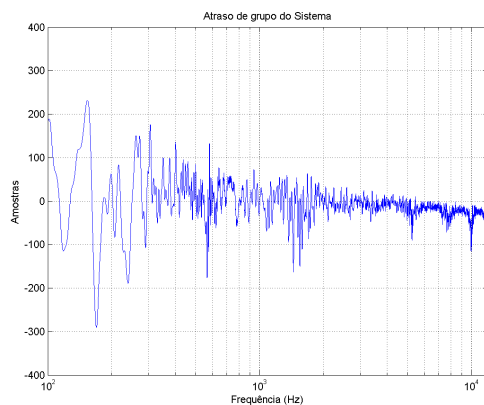
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



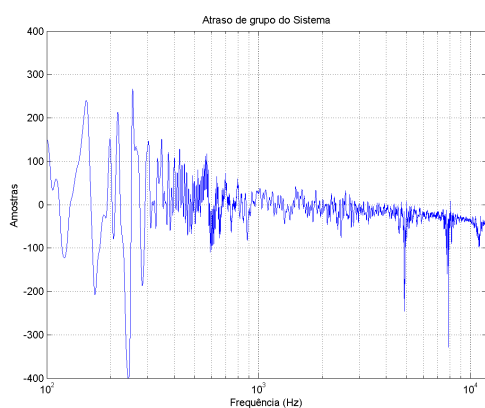
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



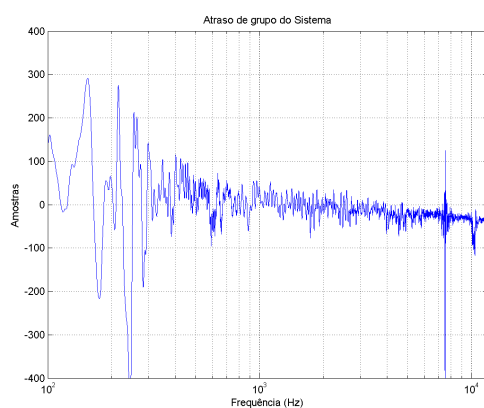
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

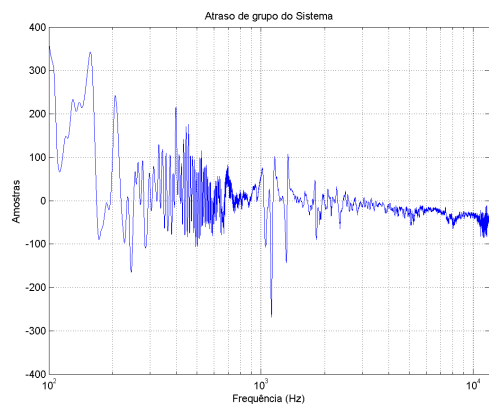


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

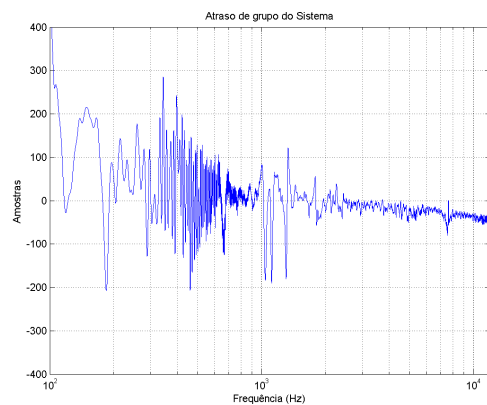


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

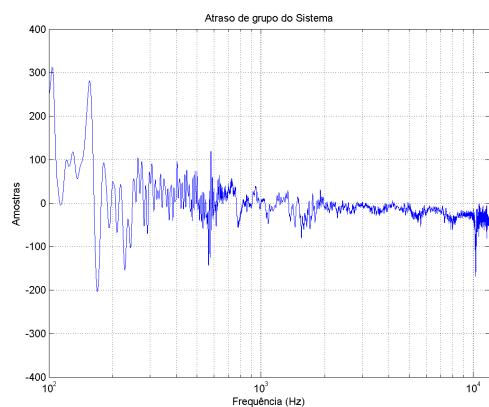
Figura D.1: Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: *sweep* linear (parte 1).



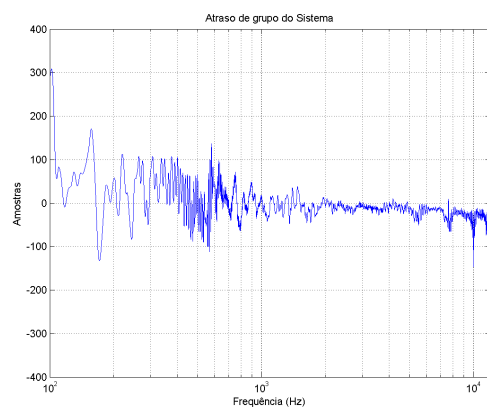
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



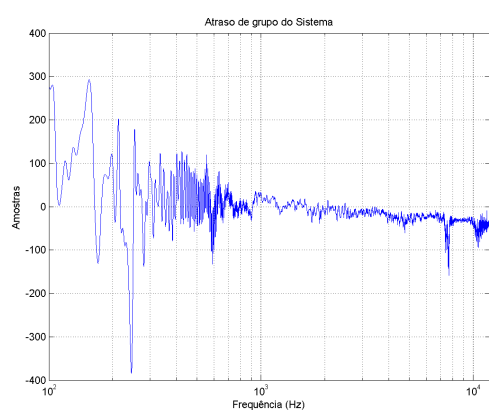
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



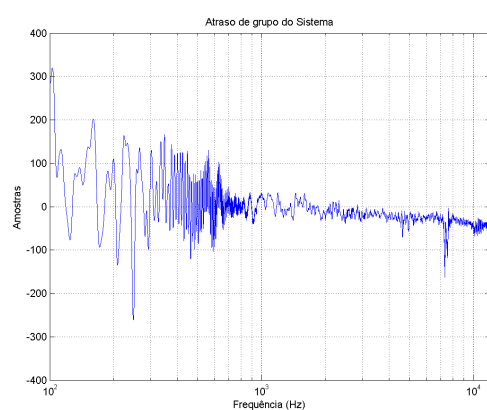
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.

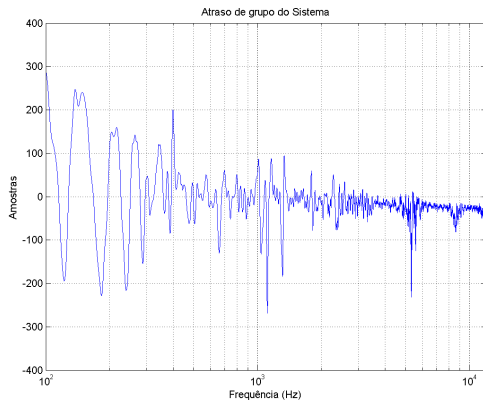


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.

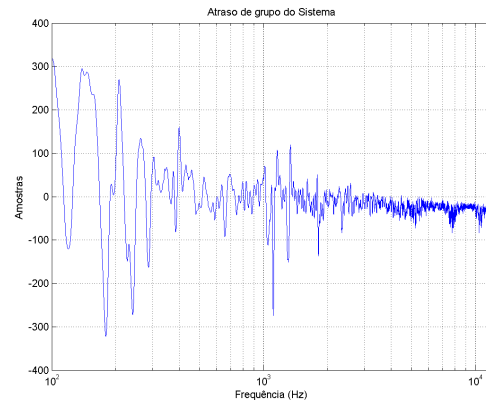


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

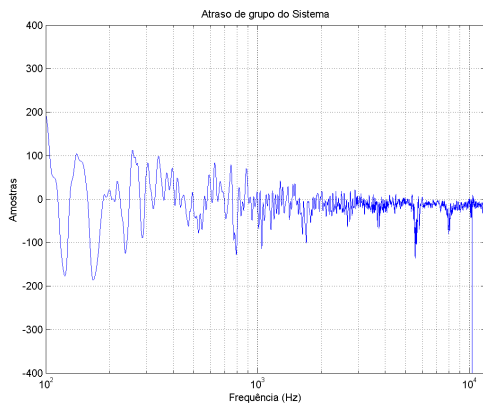
Figura D.2: Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: *sweep* linear (parte 2).



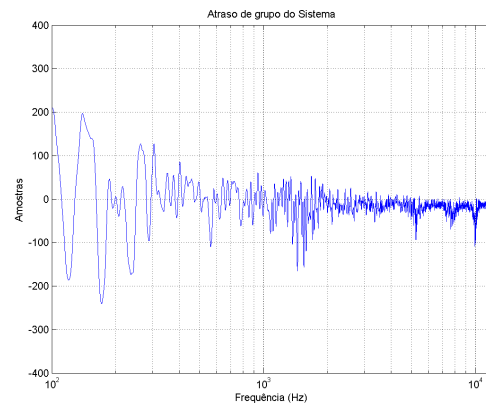
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



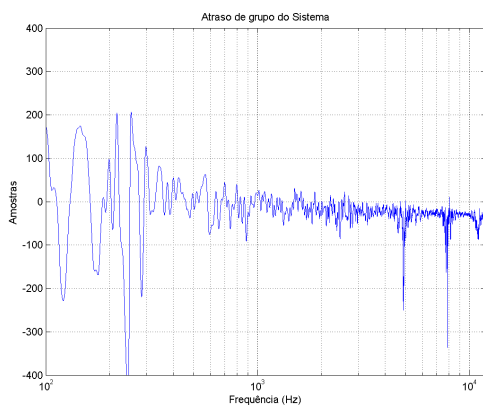
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



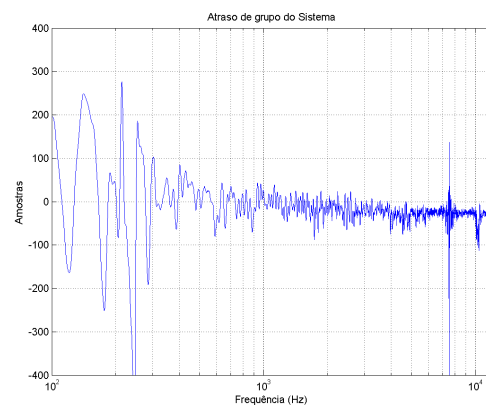
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

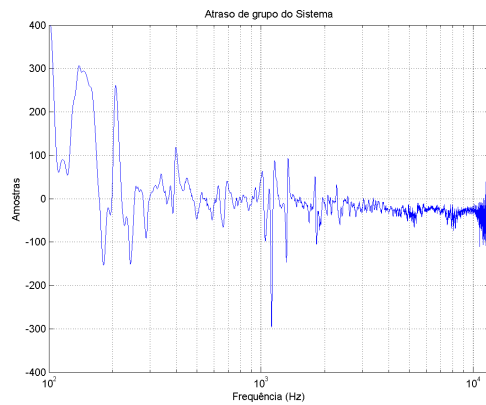


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

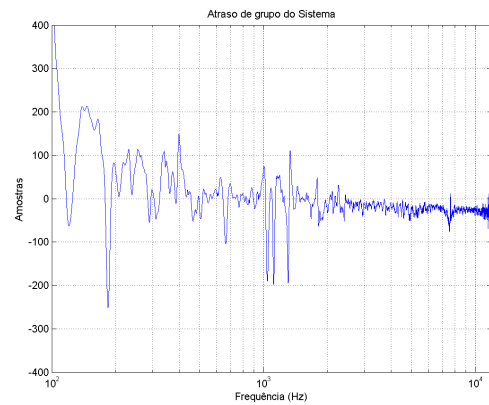


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

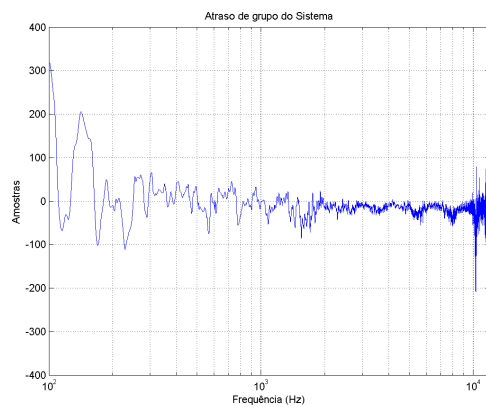
Figura D.3: Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: *sweep* logarítmico (parte 1).



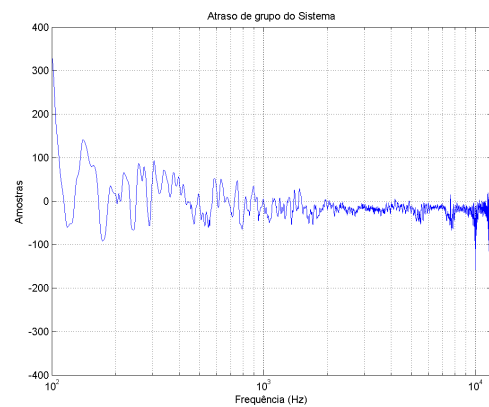
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



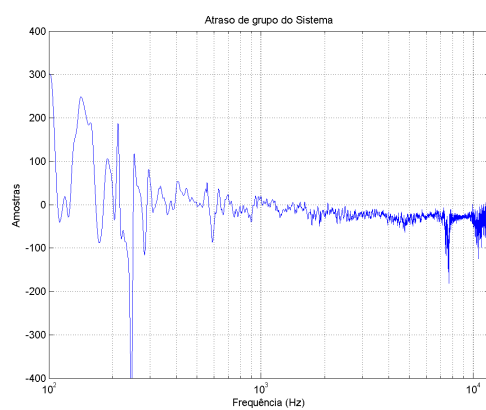
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



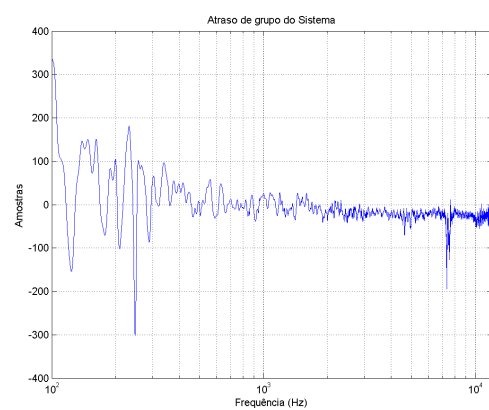
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.

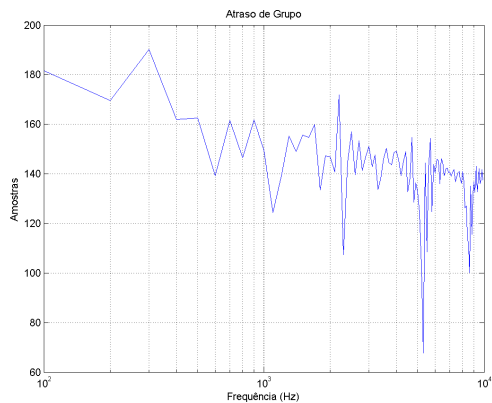


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.

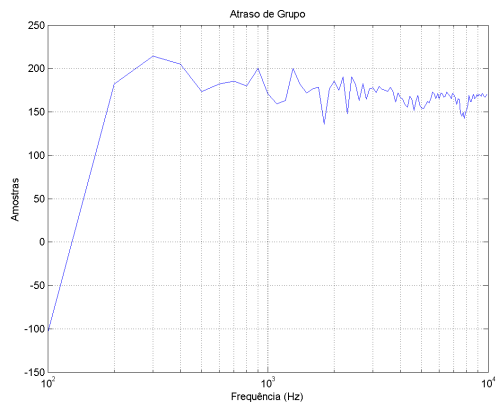


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

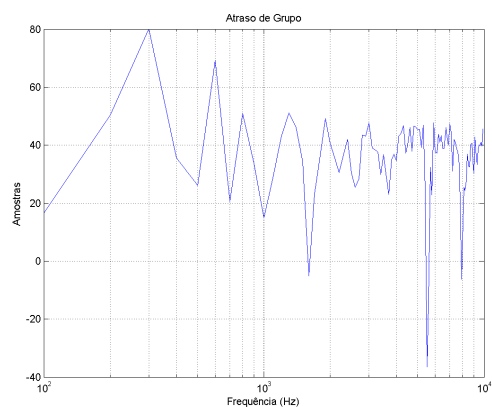
Figura D.4: Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: *sweep* logarítmico (parte 2).



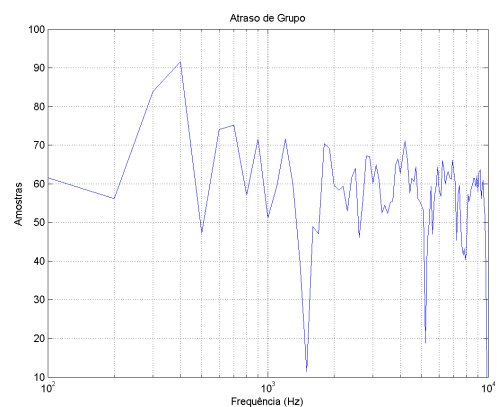
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Earthworks.



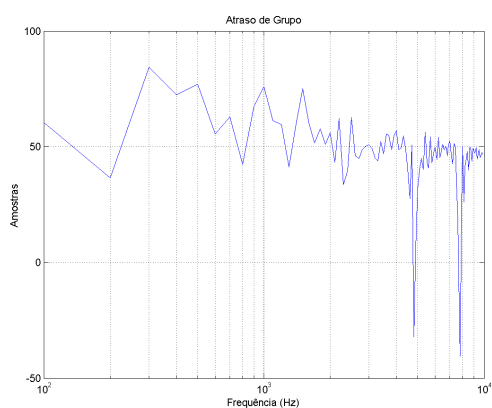
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Sennheiser.



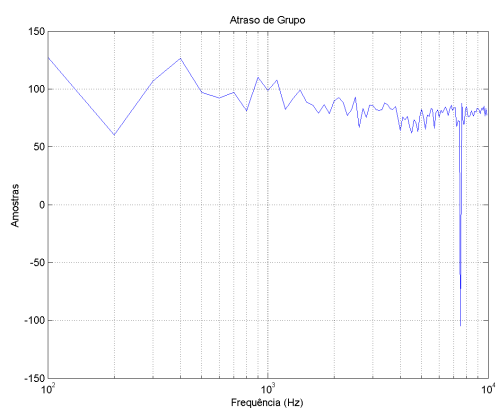
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Earthworks.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Sennheiser.

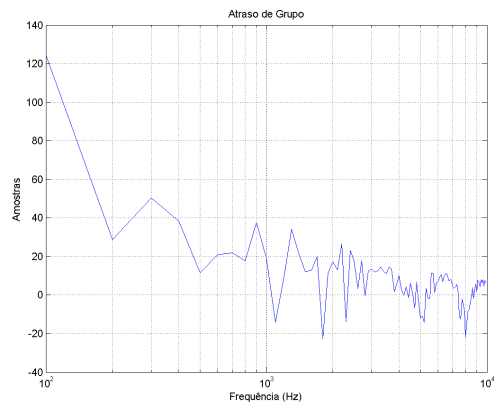


(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Earthworks.

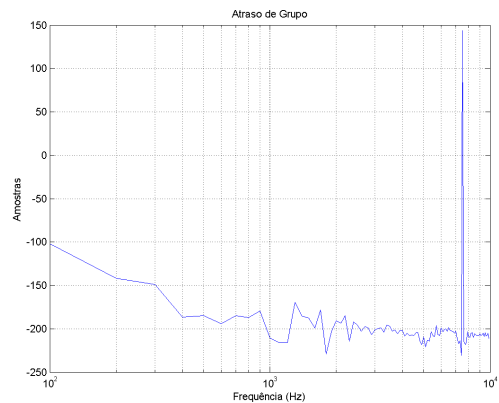


(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Sennheiser.

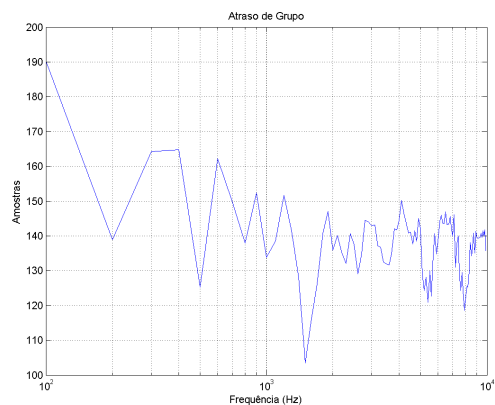
Figura D.5: Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: dente de serra (parte 1).



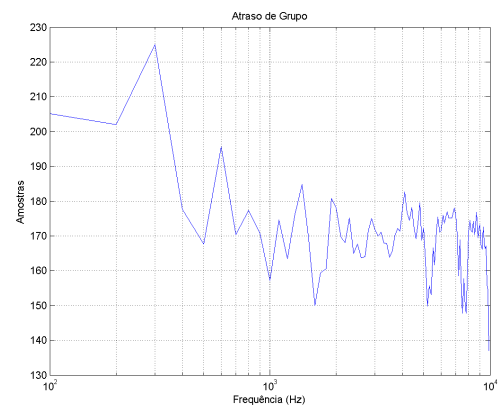
(a) Altifalante: Adam | Microfone: Shure.



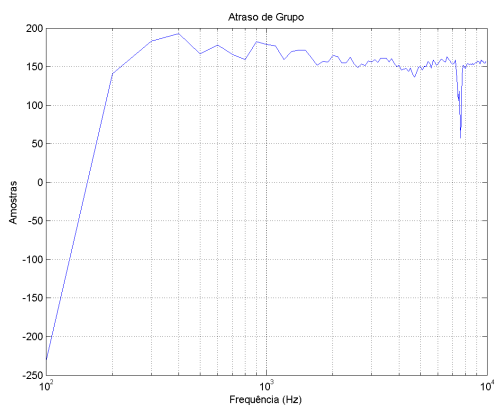
(b) Altifalante: Adam | Microfone: Work.



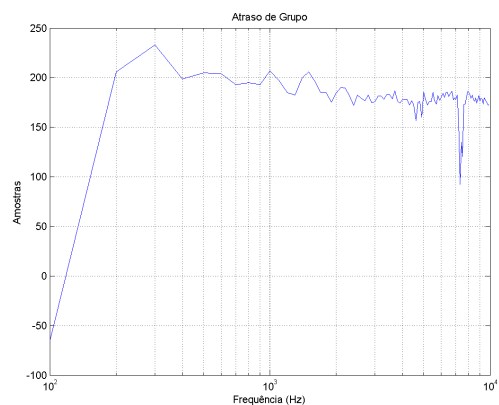
(c) Altifalante: B&W | Microfone: Shure.



(d) Altifalante: B&W | Microfone: Work.



(e) Altifalante: Yamaha | Microfone: Shure.



(f) Altifalante: Yamaha | Microfone: Work.

Figura D.6: Atraso de grupo do conjunto. Estímulo usado: dente de serra (parte 2).

Anexo E

Coeficientes de correlação de Pearson

Neste anexo são apresentadas tabelas que contêm os valores dos coeficientes de correlação de Pearson. Estes valores foram retirados efetuando esta correlação entre dois gráficos (atraso de grupo ou magnitude da resposta em frequência) onde apenas um dos dispositivos é diferente.

E.1 Comparação de altifalantes

Comparação feita entre os diferentes altifalante, com um microfone em comum. As tabelas encontram-se organizadas pelo microfone utilizado.

Tabela E.1: Comparação de altifalantes. Microfone comum: *Earthworks*.

Earthworks			
		Resposta em Frequência	Atraso de Grupo
Sweep Linear	Adam e B&W	0,2353	0,1777
	Adam e Yamaha	0,231	0,5721
	B&W e Yamaha	0,1514	0,1874
Sweep Logarítmico	Adam e B&W	0,2001	0,1176
	Adam e Yamaha	0,197	0,5182
	B&W e Yamaha	0,1261	0,1091
Dente de serra	Adam e B&W	0,4854	0,1371
	Adam e Yamaha	0,3037	0,3276
	B&W e Yamaha	0,2815	0,0537
Média		0,2457	0,2445

Tabela E.2: Comparação de altifalantes. Microfone comum: *Sennheiser*.

Sennheiser			
		Resposta em Frequência	Atraso de Grupo
Sweep Linear	Adam e B&W	0,5094	0,5265
	Adam e Yamaha	0,7744	0,3102
	B&W e Yamaha	0,4258	0,282
Sweep Logarítmico	Adam e B&W	0,4852	0,4999
	Adam e Yamaha	0,7643	0,2802
	B&W e Yamaha	0,408	0,2382
Dente de serra	Adam e B&W	0,6347	0,3412
	Adam e Yamaha	0,7334	0,3933
	B&W e Yamaha	0,4391	0,1826
Média		0,5749	0,3393

Tabela E.3: Comparação de altifalantes. Microfone comum: *Shure*.

Shure			
		Resposta em Frequência	Atraso de Grupo
Sweep Linear	Adam e B&W	0,5905	0,5591
	Adam e Yamaha	0,6216	0,6462
	B&W e Yamaha	0,5098	0,6516
Sweep Logarítmico	Adam e B&W	0,5835	0,4355
	Adam e Yamaha	0,6183	0,5661
	B&W e Yamaha	0,5088	0,4702
Dente de serra	Adam e B&W	0,7324	0,4138
	Adam e Yamaha	0,6997	0,5048
	B&W e Yamaha	0,4975	0,2794
Média		0,5958	0,5030

Tabela E.4: Comparação de altifalantes. Microfone comum: *Work*.

Work			
		Resposta em Frequência	Atraso de Grupo
Sweep Linear	Adam e B&W	0,6107	0,467
	Adam e Yamaha	0,7767	0,5541
	B&W e Yamaha	0,4485	0,6431
Sweep Logarítmico	Adam e B&W	0,6154	0,44
	Adam e Yamaha	0,7706	0,5682
	B&W e Yamaha	0,4539	0,4987
Dente de serra	Adam e B&W	0,7133	0,5886
	Adam e Yamaha	0,8173	0,6109
	B&W e Yamaha	0,5717	0,4343
Média		0,6420	0,5339

E.2 Comparação de microfones

Comparação feita entre os diferentes microfones, com um altifalante em comum. As tabelas encontram-se organizadas pelo altifalante utilizado.

Tabela E.5: Comparação de microfones. Altifalante comum: *Adam*.

Adam			
		Resposta em Frequência	Atraso de Grupo
Sweep Linear	Earthworks e Sennheiser	0,1636	0,77
	Earthworks e Shure	0,5067	0,7321
	Earthworks e Work	0,2867	0,7286
	Sennheiser e Shure	0,5574	0,8775
	Sennheiser e Work	0,7561	0,7079
	Shure e Work	0,7354	0,7998
Sweep Logarítmico	Earthworks e Sennheiser	0,1235	0,7619
	Earthworks e Shure	0,4659	0,6742
	Earthworks e Work	0,2595	0,6978
	Sennheiser e Shure	0,5422	0,7715
	Sennheiser e Work	0,7385	0,6768
	Shure e Work	0,7258	0,7305
Dente de Serra	Earthworks e Sennheiser	0,3468	0,5366
	Earthworks e Shure	0,571	0,6113
	Earthworks e Work	0,3135	0,5966
	Sennheiser e Shure	0,8598	0,9174
	Sennheiser e Work	0,8563	0,7626
	Shure e Work	0,835	0,7662
Média		0,5358	0,7289

Tabela E.6: Comparação de microfones. Altifalante comum: *B&W*.

B&W			
		Resposta em Frequência	Atraso de Grupo
Sweep Linear	Earthworks e Sennheiser	0,5002	0,2508
	Earthworks e Shure	0,8079	0,3457
	Earthworks e Work	0,5013	0,2888
	Sennheiser e Shure	0,6115	0,7107
	Sennheiser e Work	0,7826	0,6281
	Shure e Work	0,7625	0,6861
Sweep Logarítmico	Earthworks e Sennheiser	0,4742	0,1724
	Earthworks e Shure	0,8037	0,2439
	Earthworks e Work	0,486	0,1911
	Sennheiser e Shure	0,6065	0,5736
	Sennheiser e Work	0,7803	0,5201
	Shure e Work	0,7585	0,4863
Dente de Serra	Earthworks e Sennheiser	0,6914	0,2614
	Earthworks e Shure	0,806	0,5624
	Earthworks e Work	0,6245	0,4338
	Sennheiser e Shure	0,8767	0,7678
	Sennheiser e Work	0,8677	0,5814
	Shure e Work	0,8728	0,546
Média		0,7008	0,4584

Tabela E.7: Comparação de microfones. Altifalante comum: *Yamaha*.

Yamaha			
		Resposta em Frequência	Atraso de Grupo
Sweep Linear	Earthworks e Sennheiser	0,3896	0,3118
	Earthworks e Shure	0,6957	0,6515
	Earthworks e Work	0,3847	0,5054
	Sennheiser e Shure	0,704	0,3515
	Sennheiser e Work	0,7964	0,2911
	Shure e Work	0,7805	0,677
Sweep Logarítmico	Earthworks e Sennheiser	0,3771	0,2646
	Earthworks e Shure	0,6885	0,5506
	Earthworks e Work	0,3751	0,3907
	Sennheiser e Shure	0,7013	0,3079
	Sennheiser e Work	0,7919	0,2388
	Shure e Work	0,7806	0,5597
Dente de Serra	Earthworks e Sennheiser	0,5858	0,2929
	Earthworks e Shure	0,7224	0,4355
	Earthworks e Work	0,4635	0,3056
	Sennheiser e Shure	0,8702	0,4535
	Sennheiser e Work	0,8631	0,5585
	Shure e Work	0,8763	0,5662
Média		0,6582	0,4285

E.3 Média dos coeficientes

Nesta última secção dos anexos, encontra-se uma tabela com o cálculo da média dos coeficientes. A média foi aplicada para todos os microfones e altifalantes, e está separada pelo atraso de grupo e magnitude da resposta em frequência. É visível por esta tabela a maior semelhança entre microfones relativamente à semelhança entre altifalantes.

Tabela E.8: Média dos coeficientes de correlação de Pearson

	Média dos coeficientes (Resposta em Frequência)	Média dos coeficientes (Atraso de Grupo)
Microfone	0,631568519	0,538564815
Altifalante	0,514611111	0,405172222

Referências

- [1] Hideki Banno, Kazuya Takeda, e Fumitada Itakura. The effect of group delay spectrum on timbre. *Acoustical Science and Technology*, 23(1):1–9, 2002.
- [2] P. Laws J. Blauert. Group delay distortions in electroacoustical systems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63(5):1478–1483, 1978.
- [3] Luís L. Henrique. *Acústica musical*. Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [4] Syed Hamid Nawab Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky. *Signals systems*. Prentice Hall, 2ª edição, 1997.
- [5] Phase (waves). Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_%28waves%29 [Acesso em fevereiro/2012].
- [6] Linear phase. Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_phase [Acesso em fevereiro/2012].
- [7] Physics - source to consumer. Disponível em http://www.bbc.co.uk/scotland/learning/bitesize/standard/physics/energy_matters/source_to_consumer_rev1.shtml [Acesso em fevereiro/2012].
- [8] Piezoelectric sensor. Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_sensor [Acesso em fevereiro/2012].
- [9] Microphones: How to choose. Disponível em <http://en.audiofanzine.com/microphone/editorial/articles/microphones-how-to-choose.html> [Acesso em fevereiro/2012].
- [10] Glen Ballou. *Electroacoustic devices : microphones and loudspeakers*. Focal, 2009.
- [11] Herch Moysés Nussenzveig. *Curso de física básica*. Editora Edgard Blucher, 1997.
- [12] Microphones | dynamic microphone. Disponível em [http://www.sennheiser.com/sennheiser/products.nsf/resources/DC5FF0648B51E647C12574330041AA8C/\\$File/evo_845_GB.pdf](http://www.sennheiser.com/sennheiser/products.nsf/resources/DC5FF0648B51E647C12574330041AA8C/$File/evo_845_GB.pdf) [Acesso em fevereiro/2012].
- [13] Magnetic forces and fields. Disponível em http://sdsu-physics.org/physics180/physics180B/Chapters/magnetic_forces.htm [Acesso em fevereiro/2012].
- [14] Flex units loudspeaker drivers. Disponível em <http://www.audiotechnology.dk/iz.asp?id=4|a|119|||> [Acesso em fevereiro/2012].

- [15] Cm centre 2. Disponível em http://www.bowers-wilkins.eu/Speakers/Home_Audio/CM_Series/CM-Centre-2.html [Acesso em fevereiro/2012].
- [16] Swen Müller e Paulo Massarani. Transfer-function measurement with sweeps. *J. Audio Eng. Soc.*, 49(6):443–471, 2001.
- [17] Sawtooth wave. Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Sawtooth_wave [Acesso em abril/2012].
- [18] Steven W. Smith. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. California Technical Pub., 1997.
- [19] Aníbal Ferreira. Análise e representação de sistemas LIT nas frequências. Apontamentos de apoio à unidade curricular Processamento Digital de Sinal do MIEEC, FEUP, 2011.
- [20] Dsprelated. Disponível em <http://www.dsprelated.com/showarticle/69.php> [Acesso em maio/2012].
- [21] T. Thiruvaran, E. Ambikairajah, e M. Epps. Group delay features for speaker recognition. Em *Proceedings of the 6th International Conference on Information, Communications Signal Processing*, páginas 1–5, dezembro 2007.
- [22] R.M. Hegde, H.A. Murthy, e G.V.R. Rao. Application of the modified group delay function to speaker identification and discrimination. Em *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '04)*, volume 1, páginas 517–520, maio 2004.
- [23] Ricardo Sousa e Aníbal Ferreira. Singing voice analysis using relative harmonic delays. Em *INTERSPEECH*, páginas 1997–2000, 2011.
- [24] Richard J. Harris. *A primer of multivariate statistics*. Lawrence Erlbaum Associates, 3ª edição, 2001.