

**DANIEL RODRIGUES DE LIMA**

**Cancelamento de Interferência do Tipo**  
***Crosstalk***

São Carlos

2014



**DANIEL RODRIGUES DE LIMA**

# **Cancelamento de Interferência do Tipo *Crosstalk***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Carlos Dias Maciel

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

de Lima, Daniel Rodrigues  
D732c      Cancelamento de Interferência do Tipo Crosstalk /  
Daniel Rodrigues de Lima; orientador Carlos Dias  
Maciel. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. crosstalk. 2. áudio binaural. 3. modelar. 4.  
simular. 5. filtros. 6. MATLAB. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Daniel Rodrigues de Lima

Título: "Cancelamento de interferência do tipo Crosstalk"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 18 / 06 / 2014,

com NOTA 10,0 (dez, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado Carlos Dias Maciel - (Orientador - SEL/EESC/USP)*

*Prof. Dr. Wagner Endo - (UTFPR- Universidade Tecnológica Federal do Paraná)*

*Mestre Douglas Machado Tavares - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



*AOS MEUS PAIS, QUE ATÉ AQUI ME  
APOIARAM INCONDICIONALMENTE*





## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a meu Deus por realizar o sonho que eu tinha de estudar na USP. Agradeço também a Ele porque me guiou, trouxe e sustentou até aqui. Ainda O agradeço porque sei que o continuará a cumprir em mim a Sua vontade.

Agradeço aos meus pais que me apoiaram incondicionalmente abrindo mão de tudo por mim. Os agradeço porque me incentivaram desde quando eu quis estudar e buscar um futuro melhor. Sou grato a eles porque abriram mão de tudo, se dispondo do próprio conforto para me dar um teto na cidade onde estudo. Pai, Mãe, Muito Obrigado!

Sou grato aos amigos que me ajudaram desde o início dessa jornada. Obrigado, Irmãs do CFCM de Penápolis, por acreditarem em mim sem nem ao menos me conhecerem. Obrigado, Dona Adal, pelas orientações durante o ensino médio e também na época do vestibular. Obrigado, Seu Flávio, por me indicar o Pastor Jarbas quando eu ainda era um “caipira perdido” em São Carlos. Obrigado também ao Pastor Jarbas por me acolher em sua casa há quase cinco anos, sem o senhor eu provavelmente não conseguiria ficar aqui.

Obrigado aos amigos, aos poucos, porém verdadeiros que Deus colocou em minha vida. Agradeço aos amigos que fiz na universidade, vocês ultrapassaram a barreira de meros colegas de trabalho. Agradeço também aos amigos que fiz na igreja e na ABU, vocês foram fundamentais para que eu me mantivesse no Caminho.

Agradeço ao Professor Maciel que orientou meus trabalhos e que também se tornou um grande amigo. Obrigado também ao Fábio pela ajuda durante este trabalho, pela disponibilidade e paciência.

Por último, agradeço a Tatá, que entrou em minha vida há uns dois anos. Obrigado porque você está comigo, obrigado por “aguentar minhas crises”, obrigado por revisar meus textos, mas principalmente, obrigado por permitir que eu seja seu namorado.



# Sumário

Capítulo 1	Introdução .....	1
Capítulo 2	Teoria .....	3
2.1	Ondas Mecânicas .....	3
2.1.1	Interferência entre Ondas .....	3
2.1.2	Ondas Sonoras.....	5
2.2	Crosstalk e Áudio Binaural.....	5
2.3	Modelo de Propagação do Som.....	7
Capítulo 3	Modelagem do Problema.....	11
3.1	Sistema Físico .....	11
3.2	Estimativa das Distorções da Planta.....	12
3.3	Estimativa dos Sons nos Ouvidos.....	17
3.3.1	Aplicando Impulsos iguais .....	18
3.3.2	Aplicando Impulsos Fora de Fase.....	22
3.3.3	Aplicando Impulso em Apenas um dos Alto-Falantes .....	26
3.3.4	Aplicando Senoides de Frequências Diferentes.....	28
3.4	Modelagem da Planta.....	30
Capítulo 4	Cálculo dos Filtros de Cancelamento .....	33
4.1	Filtros de Cancelamento .....	33
4.2	Equacionamento Analítico .....	34
4.2.1	Restrições da Matriz H .....	35
4.3	Análise das Respostas em Frequência e Temporal dos filtros .....	36
Capítulo 5	Resultados e Discussões.....	41
5.1	Diagrama Completo do Sistema .....	41
5.2	Equacionamento do Sistema de Cancelamento .....	42
5.3	Simulações da Planta com o Sistema de Cancelamento de “ <i>Crosstalk</i> ” .....	42
5.3.1	Aplicando Impulsos Iguais .....	43
5.3.2	Aplicando Impulsos fora de Fase.....	44
5.3.3	Aplicando Impulso em Apenas um dos Alto-Falantes .....	45
5.3.4	Aplicando Senoides de Frequências Diferentes.....	47

Capítulo 6	Conclusões.....	49
6.1	Problemas do Sistema.....	49
6.2	Considerações Finais .....	50
6.3	Próximos Passos.....	51

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1.1 – Ondas com fases diferentes gerando interferências construtiva (topo) e destrutiva (base). Na interferência construtiva, é gerada uma onda de amplitude maior que a das ondas originais. Já na interferência destrutiva, a onda gerada tem amplitude menor que a das ondas originais. .... 4
- Figura 2.2.1 – “*Dummy Head*” para gravação *binaural*: Aparato em forma de cabeça com dois microfones nas orelhas e que simula fielmente a resposta acústica de uma cabeça humana..... 7
- Figura 2.3.1 – Variação da fase para frequências de 100Hz (topo), 1kHz (meio) e 10kHz (base) com raios variando no intervalo de 0m a 3,5m. Nota-se que aumentar a frequência, aumenta-se o número de vezes que a fase varia..... 9
- Figura 2.3.2 – Resposta em frequência (fase) para distancias de 0.1m (topo), 1,75m (meio) e 3,5m (base). Nota-se que aumentar a distância, aumenta-se o número de vezes que a fase varia. .... 10
- Figura 3.1.1 – Diagrama do sistema físico a ser estudado contendo: alto-falante esquerdo (FE) e alto-falante direito (FD); um campo livre de propagação; um ouvinte com os ouvidos indicados por YE (ouvido esquerdo) e YD (ouvido direito); e as distâncias entre os ouvidos e alto-falantes indicadas por  $r_1$  e  $r_2$ . .... 11
- Figura 3.2.1 – Representação em escala da planta do sistema estudado. As distâncias  $r_1$  e  $r_2$  são representadas pelas retas de 1,2m e 1,3m, respectivamente. .... 12
- Figura 3.2.2 –Análise da resposta em frequência do caminho  $C_{11}$  (alto-falante esquerdo para ouvido esquerdo) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência..... 13
- Figura 3.2.3 - Análise da resposta em frequência do caminho  $C_{12}$  (alto-falante direito para ouvido esquerdo) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência..... 14

Figura 3.2.4 – Resposta ao impulso dos caminhos  $C_{11}$  e  $C_{12}$ . Atenuação de 0,066 para  $C_{11}$  e 0,61 para  $C_{12}$ . Atraso de 3,5ms nos caminhos  $C_{11}$  e de 3,8ms no caminho  $C_{12}$ . ..... 14

Figura 3.2.5 - Análise da resposta em frequência do caminho  $c_{22}$  (alto-falante direito para ouvido direito) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência. .... 16

Figura 3.2.6 - Análise da resposta em frequência do caminho  $c_{21}$  (alto-falante esquerdo para ouvido direito) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência. .... 16

Figura 3.2.7– Resposta ao impulso dos caminhos  $C_{22}$  e  $C_{21}$ . Atenuação de 0,066 para  $C_{22}$  e 0,61 para  $C_{21}$ . Atraso de 3,5ms nos caminhos  $C_{22}$  e de 3,8ms no caminho  $C_{21}$ . .... 17

Figura 3.3.1 – Diagrama completo da planta: com dois alto-falantes FE e FD; com as distorções representadas por  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$  e  $C_{22}$ ; e um ouvinte com os ouvidos representados por YE e YD. .... 17

Figura 3.3.2 – Resposta em frequência da soma dos sinais no ouvido direito (YD). Apresentando o efeito de filtro “Comb”: interferência destrutiva em pontos onde ocorrem múltiplos inteiros de  $\lambda$  no caminho  $C_{22}$  e múltiplos de  $\lambda + \lambda/2$ , por conta das fases contrárias. .... 19

Figura 3.3.3– Resposta em frequência da soma dos sinais no ouvido esquerdo (YE). Apresentando o efeito de filtro “Comb”: interferência destrutiva em pontos onde ocorrem múltiplos inteiros de  $\lambda$  no caminho  $C_{22}$  e múltiplos de  $\lambda + \lambda/2$ , por conta das fases contrárias. .... 19

Figura 3.3.4 – Resposta da planta em YD para dois impulsos em fase, um em FD e outro em FE. Exibindo os atrasos e atenuações já calculados e apresentados anteriormente.. 20

Figura 3.3.5 – Resposta da planta em YE para dois impulsos em fase, um em FD e outro em FE. Exibindo os atrasos e atenuações já calculados e apresentados anteriormente.. 20

Figura 3.3.6 – Resposta em frequência de YD para impulsos fora de fase. Destaca-se o efeito de filtro “Comb” que continua a aparecer, mesmo mudando as entradas. .... 23

Figura 3.3.7 – Resposta em frequência de YE para impulsos fora de fase. Destaca-se o efeito de filtro “Comb” que continua a aparecer, mesmo mudando as entradas.....	23
Figura 3.3.8 - Resposta temporal de YD para dois impulsos fora de fase como entrada. Destaca-se que tanto o impulso negativo quanto o positivo possuem atrasos e atenuações compatíveis com o esperado. ....	24
Figura 3.3.9 – Resposta temporal de YE para dois impulsos fora de fase como entrada. Destaca-se que tanto o impulso positivo, quanto o negativo possuem atrasos e atenuações como era esperado.....	24
Figura 3.3.10 – Sinal enviados aos alto-falantes (topo) esquerdo (FE) e direito (FD). Resposta temporal (base) de YE e YD. Nota-se que mesmo não havendo som emitido por FD, em YD há sinal.....	27
Figura 3.3.11 – Sinal enviados aos alto-falantes (topo) esquerdo (FE) e direito (FD). Resposta temporal (base) de YE e YD. Nota-se que mesmo não havendo som emitido por FE, em YE há sinal. ....	28
Figura 3.3.12 – Resposta temporal de YE e YD (base) para entradas senoidais com: 1kHz em FD e 1,3kHz em FE (topo). Destaca-se a soma dos sinais senoidais, a atenuação e o atraso de mais de 3ms.....	29
Figura 3.3.13 - Análise de Fourier para os sinais YE (topo) e YD (base), contendo as raiais nas frequências de 1,0kHz e 1,3kHz, comprovando que houve a soma das duas senoides. ....	29
Figura 4.1.1 – Diagrama completo do sistema de filtros contendo: os sinais de áudio, AD e AE; filtros de cancelamento $H_{11}$ , $H_{12}$ , $H_{21}$ e $H_{22}$ ; e os sinais dos alto-falantes, FD e FE....	34
Figura 4.3.1 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro $H_{11}$ . Nota-se um alto valor para a amplitude, pois ele inverte a atenuação do sinal; nota-se também que há um comportamento de filtro do tipo “Comb” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD. ....	37

Figura 4.3.2 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro  $H_{22}$ . Nota-se um alto valor para a amplitude, pois ele inverte a atenuação do sinal; nota-se também que há um comportamento de filtro do tipo “Comb” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD.

..... 37

Figura 4.3.3 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro  $H_{12}$ . Nota-se um alto valor par a amplitude, pois o filtro inverte as atenuações dos sinais Y; nota-se ainda que há um comportamento de filtro do tipo “Comb” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD. .... 38

Figura 4.3.4 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro  $H_{21}$ . Nota-se um alto valor par a amplitude, pois o filtro inverte as atenuações dos sinais Y; nota-se ainda que há um comportamento de filtro do tipo “Comb” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD. .... 39

Figura 4.3.5 – Resposta ao impulso dos filtros da matriz H. Nota-se os vários pulsos com amplitude decrescente em todos os casos, o comportamento assemelha-se ao dos filtros do tipo IIR. .... 40

Figura 5.1.1 – Diagrama completo do Sistema, contendo as matrizes: A – vetor com as vias de áudio original (AE e AD); H – matriz dos filtros de cancelamento ( $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{21}$  e  $H_{22}$ ); F – vetor de alto-falantes (FE e FD); C –matriz de modelagem da planta ( $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$  e  $C_{22}$ ); e Y –som nos ouvidos (YE e YD). .... 41

Figura 5.3.1 – Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são os impulsos unitários desejados. .... 43

Figura 5.3.2 – Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são os impulsos unitários desfasados de  $180^\circ$ . .... 44

Figura 5.3.3– Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são: um impulso no ouvido esquerdo; e nada no ouvido direito. .... 45



Figura 5.3.4– Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são: um impulso no ouvido direito; e nada no ouvido esquerdo..... 46

Figura 5.3.5– Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são: uma senoide de frequência 1kHz no ouvido direito; e outra senoide de frequência ,3kHz no ouvido esquerdo. .... 47

Figura 5.3.6- Análise de Fourier para os sinais YE (topo) e YD (base). Apresentando apenas uma raia na frequência de 1,0kHz para YD e apenas uma raia na frequência de 1,3kHz para YE, comprovando que houve o cancelamento do “crosstalk” ..... 48



## RESUMO

Em um sistema com duas caixas acústicas, o som emitido pelo alto-falante direito atinge tanto o ouvido direito quanto o esquerdo, assim como o da caixa esquerda atinge a ambos. Em aplicações como o **áudio “binaural”**, não deseja-se que o som da caixa direita seja captado pelo ouvido esquerdo; do mesmo modo, não deseja-se que o som da caixa esquerda seja captado pelo ouvido direito. Entretanto, no sistema de caixas acústicas citado, ocorre essa interferência, que é chamada de “**crosstalk**”. Foram desenvolvidos algoritmos em ambiente **MATLAB** para **modelar e simular** um sistema com duas caixas de som e um ouvinte. Com base nas simulações, foram projetados **filtros** para cancelar a interferência entre as duas caixas nos ouvidos. Os métodos e as equações utilizadas para modelar e simular o sistema, além de calcular os filtros de cancelamento são descritos neste trabalho.

Palavras-chave: “**crosstalk**”, **áudio “binaural”**, **modelar, simular, filtros e MATLAB**.



## **ABSTRACT**

With a two-speaker system, the sound from the right speaker reaches both the right and the left ear, just as the sound from the left speaker reaches both ears. In applications such as binaural audio, it is required that the left ear does not capture any sound from right loudspeaker, and similarly the right ear does not capture from the left loudspeaker. However, on the mentioned system with two speakers, this interference occurs, which is known as **crosstalk**. Algorithms were developed in **MATLAB** to **model** and **simulate** the system with two loudspeakers plus a listener. Based on the simulations, **filters** were designed to cancel the interference between the two speakers on the ears were designed to cancel the cross-interference between the speakers and the. The methods and equations used to model and simulate the system and the calculus of the cancellation filters are described in this work.

Keywords: **crosstalk, binaural audio, model, simulate, filters and MATLAB.**



## Capítulo 1 INTRODUÇÃO

No modelo de fonte monopolo, as ondas deixam o ponto em que foram geradas e se propagam em forma esférica. Devido ao formato da propagação, a intensidade das ondas decai conforme o raio da esfera aumenta [1]. Com duas fontes sonoras, produz-se duas ondas que também sofrem atenuação de acordo com a distância percorrida. Como a propagação delas é esférica, um observador situado em frente às caixas ouve com o ouvido direito os sons emitidos pela caixa direita somados aos emitidos pela caixa esquerda, o mesmo ocorre para o ouvido esquerdo [2].

Em reproduções comuns, o fato de ter o som do canal esquerdo captado pelo ouvido direito não apresenta problemas, mas para determinadas aplicações (como o áudio “*binaural*” por exemplo) essa interferência é prejudicial e recebe o nome de “*crosstalk*”. No exemplo, os sinais dos canais contêm atrasos e intensidades controlados com o fim de criar uma sensação espacial no ouvinte [3], por isso o áudio do canal esquerdo não deve ser percebido pelo ouvido direito. Para aplicações como esta, recomenda-se utilizar fones de ouvido no lugar das caixas acústicas, pois neles não há “*crosstalk*”.

Cancelando o “*crosstalk*” entre duas fontes sonoras, pode-se reaproveitar arquivos de áudio “*binaural*” para reproduzi-los em sistemas com duas caixas acústicas. Portanto, o objetivo do trabalho é criar um sistema que cancele o efeito de “*crosstalk*”; e para isso foram feitas simulações que descrevem o meio de propagação; além disso, utilizou-as para validar o sistema de cancelamento. Em ambiente **MATLAB**<sup>1</sup>, as distorções inseridas no som pelo meio de propagação foram estimadas e modeladas matematicamente. Com o modelo gerado, foram calculados filtros que anulam as distorções. Com isso, o som no ouvido direito é somente o que está gravado na trilha “direita” do áudio; o mesmo ocorre para o ouvido esquerdo e a trilha “esquerda”.

Portanto, o presente trabalho apresentará os métodos e procedimentos utilizados para cancelar o “*crosstalk*”. No Capítulo 2, é apresentada uma breve discussão sobre a

---

<sup>1</sup> Software de simulação computacional da empresa MathWorks. Disponível em: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

teoria que serve de base para o trabalho. Já no Capítulo 3, a modelagem da planta é apresentada. O Capítulo 4 contém os cálculos dos filtros de cancelamento. Enquanto que o Capítulo 5 contém os resultados: simulações de um sistema de duas caixas de som com cancelamento de “*crosstalk*”. E, por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.



## Capítulo 2 TEORIA

Neste capítulo são apresentadas as teorias que serviram de base para o trabalho desenvolvido. No item 2.1 apresenta-se um resumo sobre as propriedades das ondas mecânicas (interferência e velocidade de propagação), que são fundamentais para compreender o comportamento dos filtros tipo *comb* (Capítulo 3 e Capítulo 4). No tópico 2.2 apresenta-se e define-se o *crosstalk* e, como motivação do trabalho, utiliza-se os problemas que ele causa na reprodução do áudio *binaural*. Por fim, o item 2.3 contém a equação de propagação do som para uma fonte tipo monopolo, na qual todo o trabalho se baseia.

### 2.1 ONDAS MECÂNICAS

As ondas mecânicas são as perturbações de um meio físico que se propagam por toda a extensão do mesmo meio. O som é o conjunto de ondas mecânicas cujo o espectro de frequências está contido entre os limites da audição humana (20Hz a 20kHz) [4]. Um fenômeno que ocorre com as ondas é a interferência, que pode ser do tipo construtiva ou destrutiva e é retratada no item 2.1.1. Já o tópico 2.1.2 apresentará a velocidade de propagação do som.

#### 2.1.1 INTERFERÊNCIA ENTRE ONDAS

Quando as ondas se encontram em um ponto há uma onda resultante cuja amplitude pode ser maior ou menor que a amplitude das ondas originais. O princípio da independência versa que mesmo havendo ondas que se cancelam ou somam pontualmente, a propagação de cada uma não é afetada [4]. Baseando-se nesse princípio, pode-se estudar os fenômenos de interferência e afirmar que sua ocorrência é apenas em pontos específicos.

Os dois tipos de interferência são a construtiva e a destrutiva [4]. A interferência construtiva ocorre quando duas ondas se encontram e a amplitude da resultante é a soma dos módulos das duas ondas. Já a interferência destrutiva se dá quando a amplitude da onda resultante é a diferença entre os módulos das amplitudes das duas ondas.

O fenômeno da interferência está relacionado com o comprimento de onda  $\lambda$  (em metros, unidades no SI [5]) e a alteração de fase (em graus ou radianos) durante a propagação. Para cada comprimento de onda inteiro ( $\lambda=1,2,3,\dots,n$ ) são adicionados  $360^\circ$

(ou  $2\pi$  radianos) de fase na onda. Logo, uma onda com fase  $0^\circ$  em  $\lambda=0$  terá  $0^\circ$  em  $\lambda = 1$ . Já para  $\lambda=k+0,5$  (com  $k=1,2,3,\dots,n$ ), são adicionados  $180^\circ$  (ou  $\pi$  radianos) de fase na onda para cada  $k$ , por isso, uma onda com  $0^\circ$  de fase em  $\lambda=0$  terá fase igual a  $180^\circ$  em  $\lambda=0,5$ .

O comprimento de onda determina a fase com a qual o sinal se apresenta e a fase determina o valor da função no ponto. Com fase de  $0^\circ$ , a amplitude da onda é igual a  $A$ , amplitude original em  $\lambda=0$ ; já com a fase de  $180^\circ$ , a amplitude é  $-A$ , que é o valor negativo da amplitude em  $\lambda=0$ .

Por fim, o encontro de duas ondas em um ponto do espaço, elas se somam e ocorre uma interferência construtiva ou destrutiva. Se no ponto de encontro as duas ondas possuem valor positivo ou se as duas possuem valor negativo, haverá uma interferência construtiva. Entretanto, se uma das ondas possui valor positivo e a outra negativo, haverá interferência destrutiva. Esses dois processos de interferência são apresentados na Figura 2.1.1 e serão úteis para o entendimento do efeito “comb filter” no Capítulo 3.

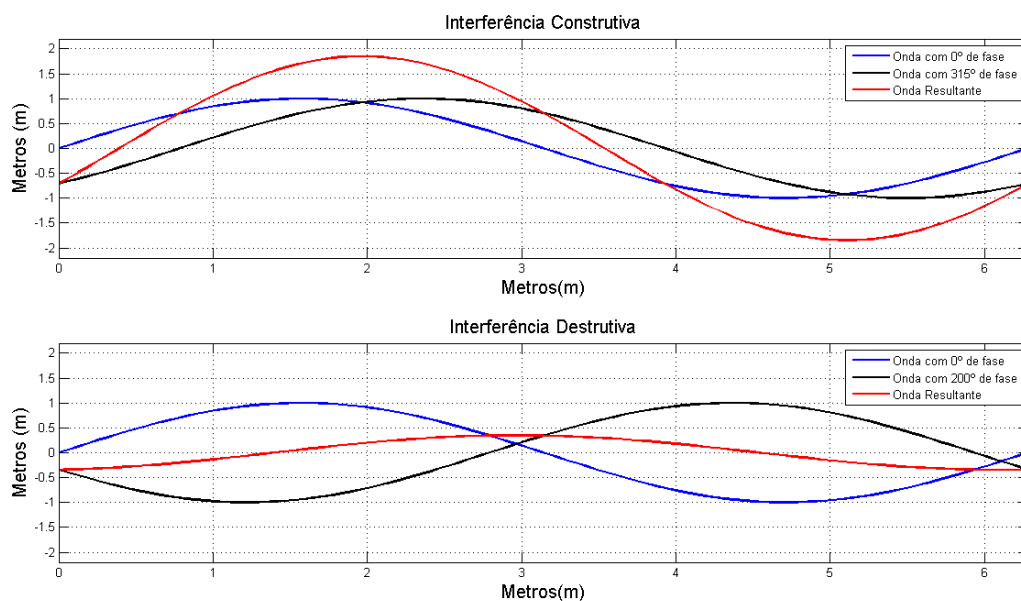


Figura 2.1.1 – Ondas com fases diferentes gerando interferências construtiva (topo) e destrutiva (base). Na interferência construtiva, é gerada uma onda de amplitude maior que a das ondas originais. Já na interferência destrutiva, a onda gerada tem amplitude menor que a das ondas originais.

### 2.1.2 ONDAS SONORAS

As ondas sonoras são ondas mecânicas contidas no intervalo de frequências que varia de 20 Hz a 20 kHz [4]. Os sons podem ser separados em três grupos, de acordo com a frequência do seu sinal. Sons de baixa frequência, 20 Hz a 200 Hz, são os graves. Os de média frequência, 200 Hz a 2 kHz, são os médios. E os de alta frequência, 2 kHz a 20 kHz, são os agudos [6].

A velocidade de propagação  $c_0$  em (m/s), é dada por:

$$c_0 = \lambda f, \quad \text{Equação 2.1.1}$$

Relacionando a frequência  $f$  (Hz) com o comprimento de uma onda  $\lambda$  (m) para calcular velocidade de propagação de uma onda. No caso das ondas sonoras,

$$c_0 = 343 \text{ m/s} \quad \text{Equação 2.1.2}$$

em ambientes com temperatura de 20°C.

A velocidade de propagação das ondas sonoras (velocidade do som) igual 343m/s é utilizada em todo o trabalho.

## 2.2 CROSSTALK E ÁUDIO BINAURAL

O fenômeno do “*crosstalk*” ocorre quando o sinal não chega apenas no destinatário, mas atinge outros pontos indesejados. Em telecomunicações, por exemplo, ele é um problema comum, pois o tráfego de dados gera um campo eletromagnético que por sua vez induz tensões em linhas de transmissão próximas. No sistema acústico estudado, ele aparece quando se deseja que o ouvido direito capte apenas o som do alto-falante direito e não o emitido pelo esquerdo.

Dois alto-falantes emitem sons que chegam aos ouvidos de uma pessoa em um sistema de reprodução com duas caixas acústicas. O ouvido esquerdo capta o som da caixa esquerda com mais intensidade que o som vindo da caixa direita. Já no ouvido direito, o som de maior intensidade é o da caixa direita e o de menor é o da esquerda. Normalmente,

essa interferência não causa problemas, pois não tem influência significativa sobre o áudio reproduzido. Entretanto, pode-se desejar reproduzir arquivos como o de áudio “*binaural*” no sistema com duas caixas acústicas e nesse caso, haverá problemas com o *crosstalk*.

*“ O áudio ‘binaural’ é utilizado para simular ambientes virtuais para um ouvinte. O princípio desta tecnologia consiste em controlar o campo sonoro nos ouvidos, para que o som reproduzido coincida com o que seria produzido quando ele está no campo sonoro real desejado. Uma maneira de conseguir isso é usar um par de alto-falantes (transdutores eletroacústicos) em diferentes posições de um espaço com a ajuda de processamento de sinais para garantir que os sinais ‘binaurais’ adequadas, que contém a informação espacial, sejam obtidos nos ouvidos do ouvinte. Com isso, o ouvinte experimenta um som ambiente tridimensional extremamente realista. ” [3] – Trecho traduzido livremente pelo autor.*

O cérebro utiliza as diferenças de tempo e amplitude entre os sons em cada ouvido para determinar a posição de uma fonte sonora [2]. O áudio “*binaural*” tem o objetivo de proporcionar uma sensação espacial para o ouvinte por meio da criação de fontes virtuais. Para tanto, ele envia sons de maior ou menor intensidade e com atrasos iguais aos provocados pela distância de propagação.

O *dummy head* é um aparato utilizado para as gravações dos arquivos de áudio “*binaural*”. Ele tem a função de simular a cabeça humana e possui microfones internos, os quais ficam nos ouvidos da “cabeça” apresentada na Figura 2.2.1<sup>1</sup>. O aparato é projetado para que a gravação seja o mais próximo possível do que uma pessoa escutaria se estivesse no mesmo lugar onde o áudio foi capturado.

A reprodução do áudio “*binaural*” é sensível ao “*crosstalk*”, pois trabalha com atrasos e atenuações calculados para proporcionar uma sensação espacial ao ouvinte. Quando há “*crosstalk*”, o som do alto-falante esquerdo atinge o ouvido direito, enquanto deveria atingir somente o ouvido esquerdo; o mesmo ocorre para o alto-falante direito e o ouvido esquerdo.

---

<sup>1</sup>Figura retirada da Loja Virtual DV247 – Disponível em: <http://www.dv247.com/microphones/neumann-ku-100-dummy-head-binaural-stereo-microphone--21004>



Figura 2.2.1 – “*Dummy Head*” para gravação *binaural*: Aparato em forma de cabeça com dois microfones nas orelhas e que simula fielmente a resposta acústica de uma cabeça humana.

Para simular uma fonte sonora à direita do ouvinte, lança-se primeiro o som (com maior intensidade) no ouvido direito, espera-se alguns instantes e então envia-se o som (com menor intensidade) ao ouvido esquerdo. Se o som do ouvido direito (maior intensidade) também chegar ao esquerdo, o ouvinte perceberá que o som se originou da fonte real (alto-falante) e não da fonte virtual. Por causa dessa interferência (“*crosstalk*”), a sensação tridimensional é prejudicada, pois perde-se a capacidade de simular fontes virtuais.

## 2.3 MODELO DE PROPAGAÇÃO DO SOM

Para calcular os filtros de cancelamento do *crosstalk* deve-se conhecer a planta do sistema. Faz-se necessário, portanto, estudar como ela distorce as ondas sonoras, como as atenua, como as atrasa e como desloca a fase delas. No modelo de fonte monopolo, o som se propaga esfericamente e sua amplitude decai conforme o raio  $r$  (metros) da esfera de propagação aumenta [1]. Logo, o som distorcido  $P(\omega, r)$  é da forma

$$P(\omega, r) = A(\omega)C(\omega, r), \quad \text{Equação 2.3.1}$$

descrevendo uma distorção  $C(\omega, r)$  inserida no sinal original de áudio  $A(\omega)$ .

A Equação 2.3.1 apresenta os sinais (P e A) e o sistema (C) envolvidos na modelagem da propagação. O termo  $C(\omega, r)$  se refere a distorção inserida pela planta que é [2]

$$C(\omega, r) = \frac{e^{\frac{-j\omega r}{c_0}}}{4\pi r} . \quad \text{Equação 2.3.2}$$

A Equação 2.3.2 apresenta uma exponencial complexa dividida por um fator dependente do raio. Nela (Equação 2.3.2), a exponencial altera a fase do sinal, enquanto que a divisão por  $r$  é responsável pela atenuação da amplitude do sinal durante a propagação. Os termos que aparecem na equação de propagação são: o raio  $r$  (m); a frequência angular  $\omega$  (rad/s); e a velocidade do som  $c_0$ .

A exponencial complexa não influencia no módulo do sinal, pois seu módulo é igual a um, logo

$$\left| e^{\frac{-j\omega r}{c_0}} \right| = 1 \Rightarrow |C(\omega, r)| = \frac{1}{4\pi r} . \quad \text{Equação 2.3.3}$$

Portanto, a atenuação depende apenas do raio, sendo igual para todos os pontos contidos na casca da esfera de raio  $r$  centrada no alto-falante.

A fase, não se altera com uma divisão por  $r$ , pois nela não há componente complexa, já na exponencial há número complexo e como se sabe que a fase de uma exponencial complexa é [4]

$$\varphi(e^{-jx}) = -x , \quad \text{Equação 2.3.4}$$

tem-se que

$$\varphi(C(\omega, r)) = \frac{\omega r}{c_0} . \quad \text{Equação 2.3.5}$$

Logo, segundo a Equação 2.3.5, a fase de  $C$  é devida a um termo com duas variáveis ( $\omega$  e  $r$ ). Para analisar a fase, fixou-se uma das variáveis e analisou-se a outra.

Fixando  $\omega$ , observa-se que para cada valor do raio  $r$  há um componente de fase diferente, Figura 2.3.1. E fixando  $r$ , pode-se analisar como a fase varia de acordo com a frequência, Figura 2.3.2. Analisando a fase nos dois casos, vê-se que ela varia linearmente conforme varia a distância dada pelo raio  $r$  (Figura 2.3.1) e também com a frequência dada por  $\omega$  (Figura 2.3.2).

Nota-se nas fases um comportamento do tipo “dente de serra”, caracterizado pela oscilação linear do valor da fase entre  $+\pi$  e  $-\pi$ . Pode-se suspeitar da falta de linearidade da fase devido a tal comportamento, entretanto, todos os valores de fase fora do intervalo em que elas são apresentadas podem ser reduzidos para ele (intervalo  $-\pi$  a  $+\pi$ ). O *software* utilizado (**MATLAB**) reduz automaticamente todos os valores de fase para tal intervalo, sendo assim, mesmo com o comportamento de “dente de serra”, a fase continua linear.

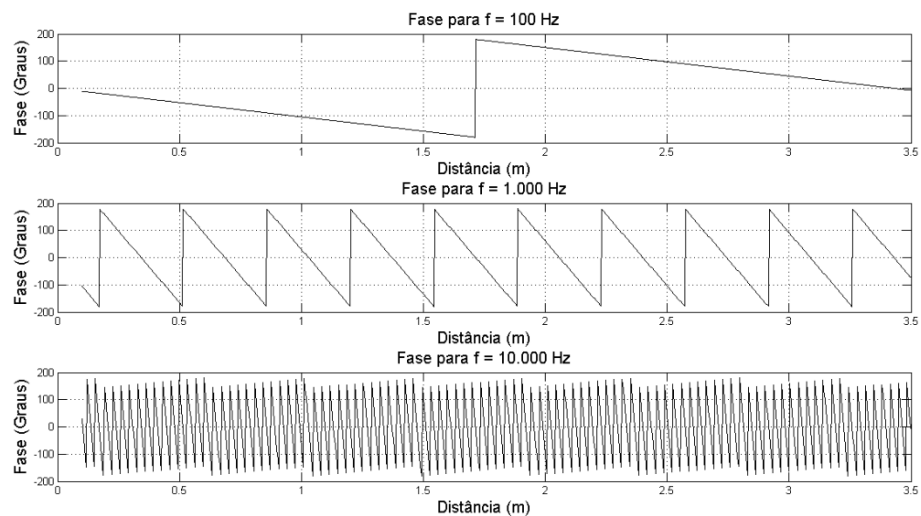


Figura 2.3.1 – Variação da fase para frequências de 100Hz (topo), 1kHz (meio) e 10kHz (base) com raios variando no intervalo de 0m a 3,5m. Nota-se que aumentar a frequência, aumenta-se o número de vezes que a fase varia.

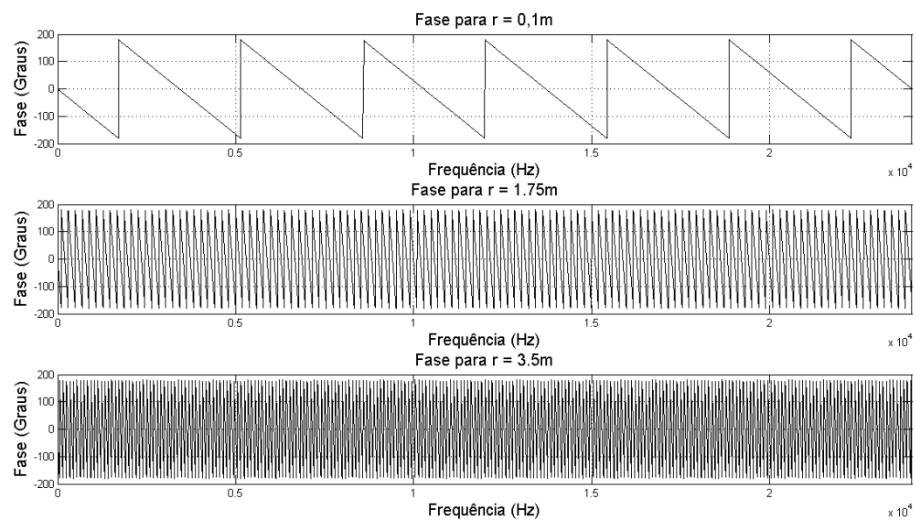


Figura 2.3.2 – Resposta em frequência (fase) para distancias de 0.1m (topo), 1,75m (meio) e 3,5m (base). Nota-se que aumentar a distância, aumenta-se o número de vezes que a fase varia.



## Capítulo 3 MODELAGEM DO PROBLEMA

Primeiramente, definiu-se o sistema físico que seria trabalhado especificando: o número de alto-falantes; os pontos do espaço e as distâncias envolvidas. O segundo passo foi a modelar matematicamente a planta, o que envolveu a Equação 2.3.2 e as distâncias previamente estabelecidas. Após a modelagem, validou-se os modelos realizando simulações e observando as respostas dos modelos aos sinais que lhes eram aplicados. Por último, sintetizou-se as equações em uma matriz que descreve o comportamento da planta.

### 3.1 SISTEMA FÍSICO

O sistema físico estudado é composto por: duas caixas de som; um campo de propagação livre; e um ouvinte, Figura 3.1.1.

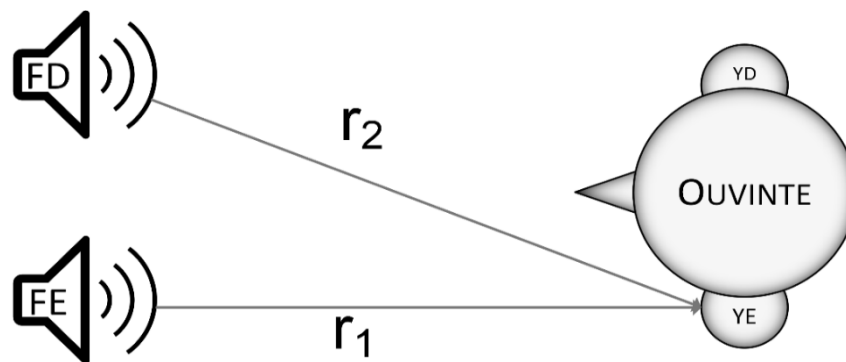


Figura 3.1.1 – Diagrama do sistema físico a ser estudado contendo: alto-falante esquerdo (FE) e alto-falante direito (FD); um campo livre de propagação; um ouvinte com os ouvidos indicados por YE (ouvido esquerdo) e YD (ouvido direito); e as distâncias entre os ouvidos e alto-falantes indicadas por  $r_1$  e  $r_2$ .

Pressupõe-se que os alto-falantes são ideais, logo não há perda de potência durante o processo de transdução. Portanto, pode-se afirmar que o som gerado tem intensidade sonora equivalente a amplitude do sinal de alimentação. Também é assumido que não há anteparos gerando reflexões.

Posiciona-se os alto-falantes e o ouvinte simetricamente. Consequentemente, a distância entre a fonte esquerda (FE) e o ouvido esquerdo (YE) é a mesma da fonte direita (FD) ao ouvido direito (YD). Assim como, FE e YD distam o mesmo que FD e YE.

Considera-se ainda que os dois ouvidos são dois microfones, logo, não é necessário expressar os cálculos em unidades de pressão. Se não houver perdas no processo de transdução, as amplitudes medidas dos sinais nos ouvidos podem ser expressas em unidades de Volts (V).

### 3.2 ESTIMATIVA DAS DISTORÇÕES DA PLANTA

Primeiramente, definiu-se as distâncias  $r_1$  e  $r_2$  dos alto-falantes até os ouvidos, impondo-se 1,2m ( $r_1$ ) e 1,3m ( $r_2$ ) para desenhar o diagrama da Figura 3.2.1. Como deseja-se um sistema de cancelamento de crosstalk que funcione em mais de uma geometria, as distâncias  $r_1$  e  $r_2$  podem ser alteradas no código que calcula os filtros de acordo com a geometria escolhida pelo usuário ou programador.

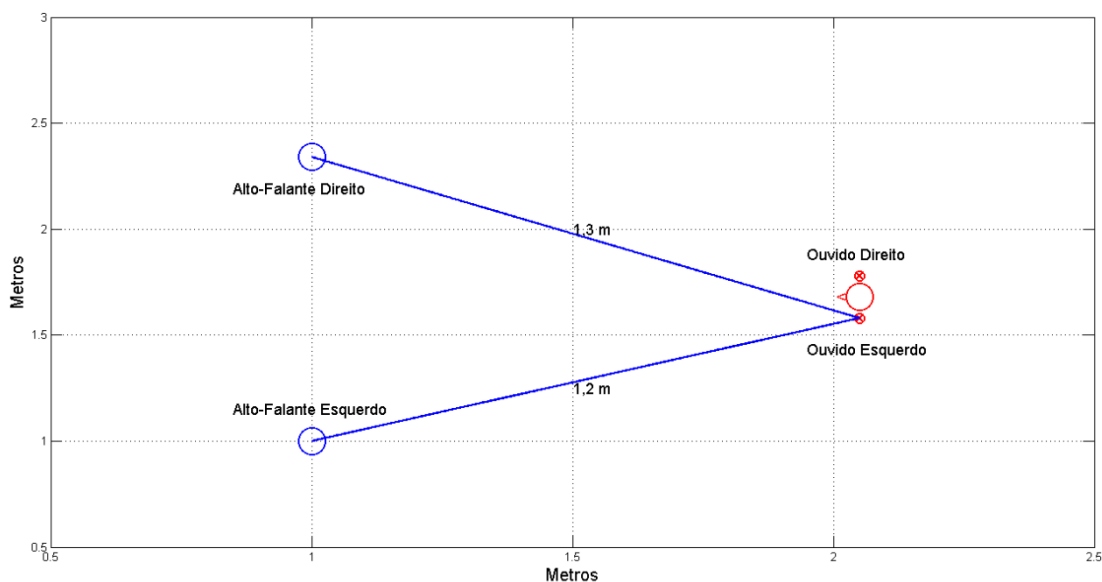


Figura 3.2.1 – Representação em escala da planta do sistema estudado. As distâncias  $r_1$  e  $r_2$  são representadas pelas retas de 1,2m e 1,3m, respectivamente.

No caminho do alto falante esquerdo até o ouvido esquerdo, a distância é 1,2m, então:

$$C_{11}(\omega) = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi}.$$

A atenuação e o atraso nesse caminho são:

$$|C(\omega)| = \frac{1}{4.8\pi} = 0,066 \quad \Delta t = \frac{1,2}{c_0} = 0,0035s.$$

Já no caminho do alto-falante direito até o ouvido esquerdo, a distância é 1,3m, então:

$$C_{12}(\omega) = \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi}.$$

A atenuação e o atraso nesse caminho são:

$$|C(\omega)| = \frac{1}{5.2\pi} = 0,061 \quad \Delta t = \frac{1,3}{c_0} = 0,0038s.$$

Segundo as equações que descrevem  $C_{11}$  e  $C_{12}$  (caminhos dos alto-falantes até o ouvido esquerdo) a resposta em frequência é dada pela Figura 3.2.2 e pela Figura 3.2.3.

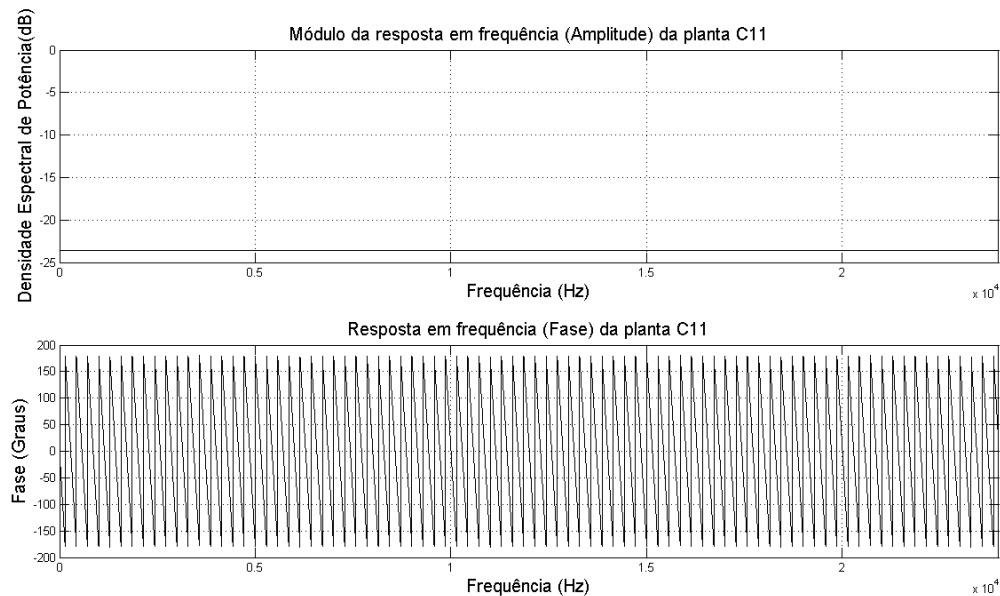


Figura 3.2.2 –Análise da resposta em frequência do caminho  $C_{11}$  (alto-falante esquerdo para ouvido esquerdo) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência.

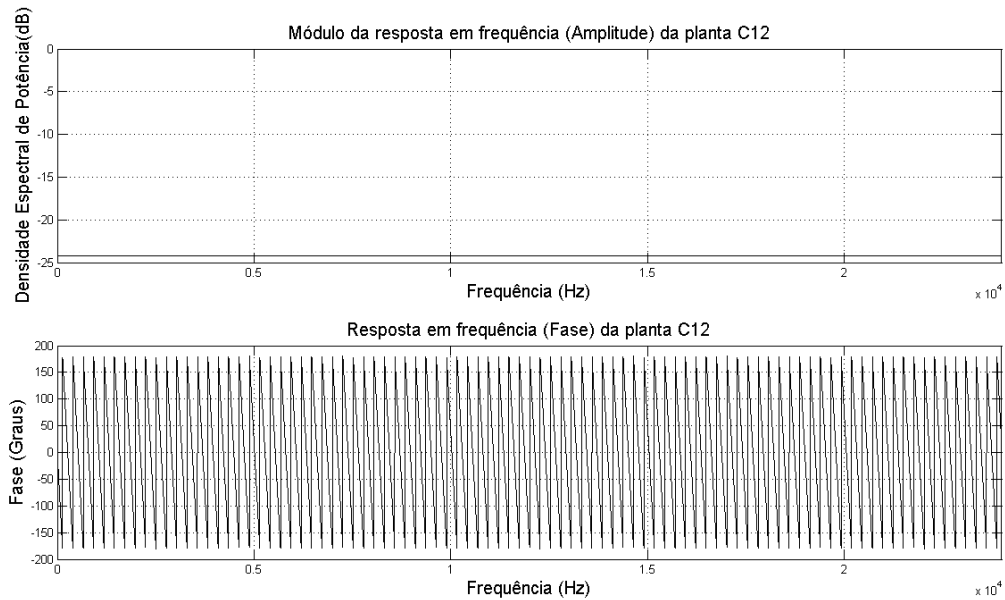


Figura 3.2.3 - Análise da resposta em frequência do caminho C<sub>12</sub> (alto-falante direito para ouvido esquerdo) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência.

Pode-se ainda observar a resposta ao impulso dos dois caminhos, Figura 3.2.4.

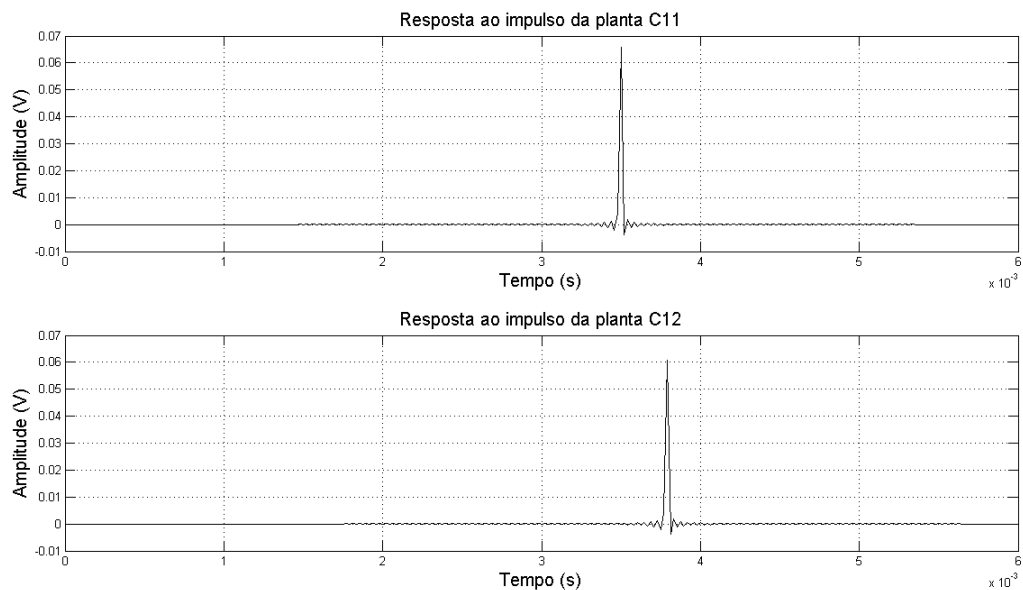


Figura 3.2.4 – Resposta ao impulso dos caminhos C<sub>11</sub> e C<sub>12</sub>. Atenuação de 0,066 para C<sub>11</sub> e 0,61 para C<sub>12</sub>. Atraso de 3,5ms nos caminhos C<sub>11</sub> e de 3,8ms no caminho C<sub>12</sub>.

Devido a simetria do sistema físico, no caminho do alto falante direito até o ouvido direito, a distância é 1,2m, então:

$$C_{22}(\omega) = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} .$$

A atenuação e o atraso desse caminho são:

$$|C(\omega)| = \frac{1}{4.8\pi} = 0,066 \quad \Delta t = \frac{1,2}{c_0} = 0,0035s .$$

Já no caminho do alto-falante esquerdo até o ouvido direito, a distância é 1,3m, então:

$$C_{21}(\omega) = \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} .$$

A atenuação e o atraso desse caminho são:

$$|C(\omega)| = \frac{1}{5.2\pi} = 0,061 \quad \Delta t = \frac{1,3}{c_0} = 0,0038s .$$

Segundo as equações que descrevem  $C_{21}$  e  $C_{22}$  (caminhos dos alto-falantes até o ouvido direito), a resposta em frequência é dada pela Figura 3.2.5 e pela Figura 3.2.6.

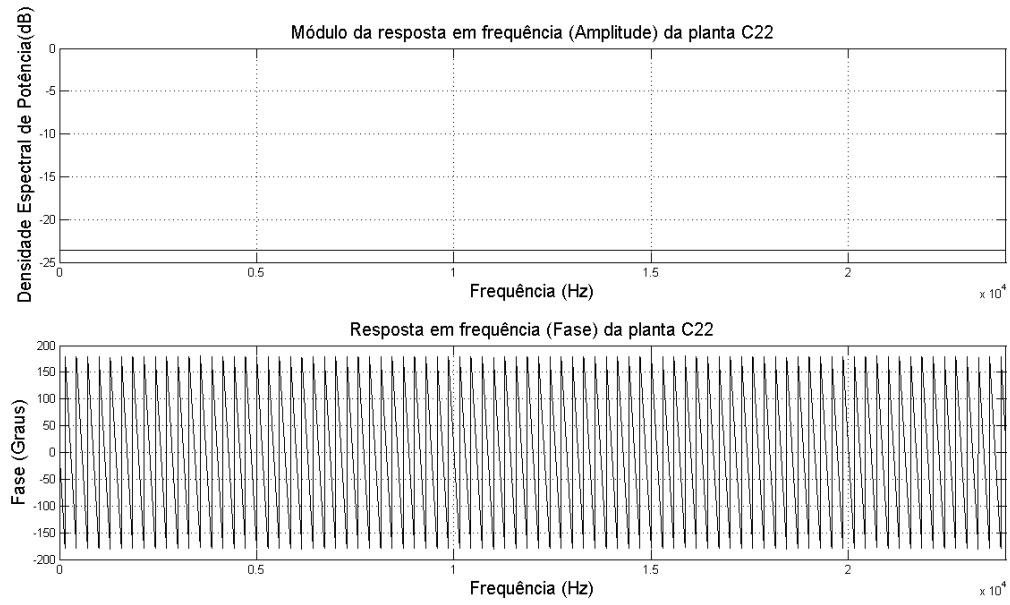


Figura 3.2.5 - Análise da resposta em frequência do caminho c22 (alto-falante direito para ouvido direito) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência.

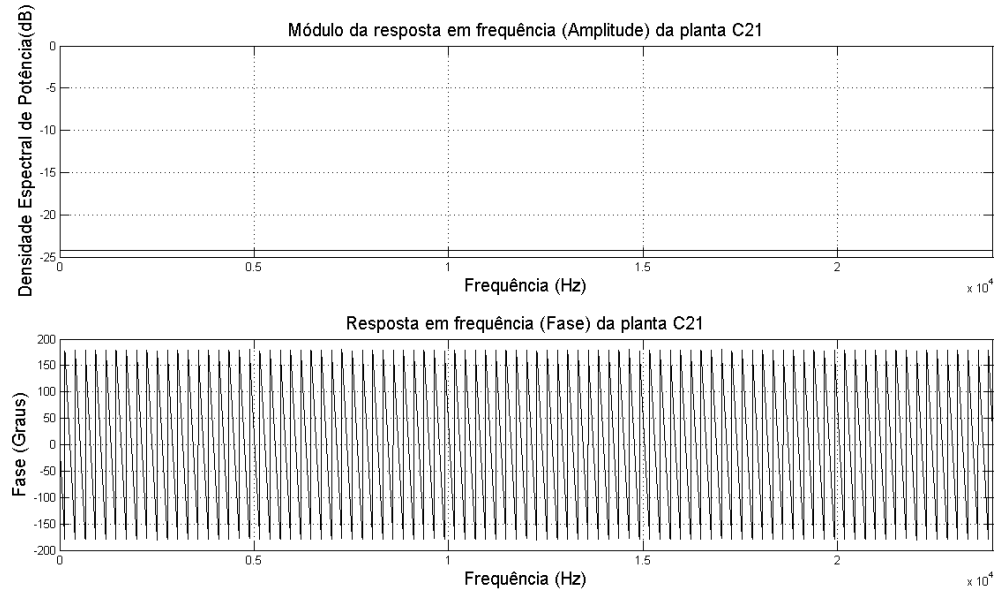


Figura 3.2.6 - Análise da resposta em frequência do caminho c21 (alto-falante esquerdo para ouvido direito) da planta. Módulo da atenuação em dB (topo) e variação da fase em graus (base) de acordo com a frequência.

Pode-se ainda observar a resposta ao impulso dos dois caminhos, Figura 3.2.7.

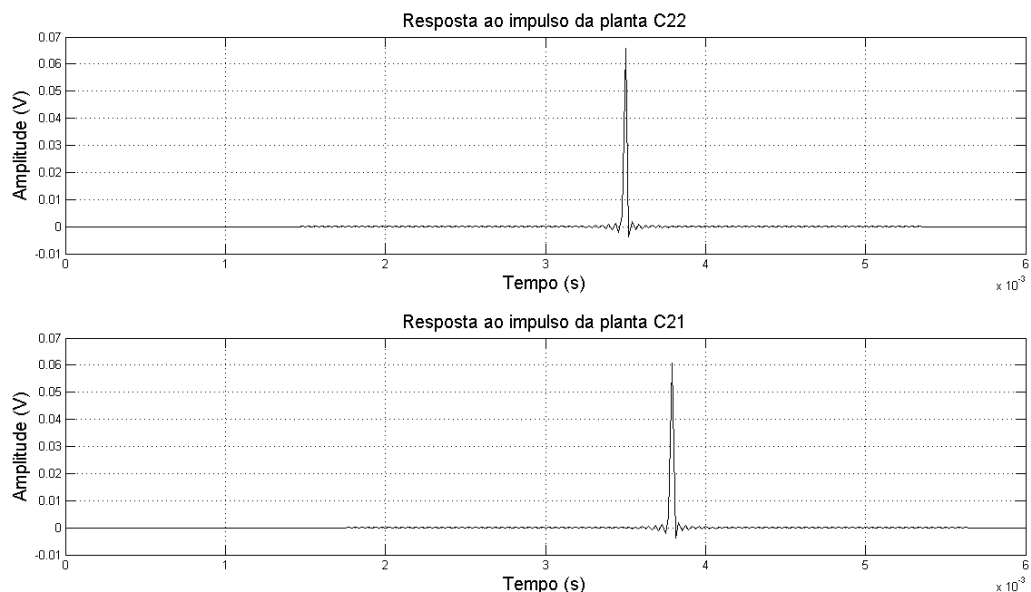


Figura 3.2.7– Resposta ao impulso dos caminhos  $C_{22}$  e  $C_{21}$ . Atenuação de 0,066 para  $C_{22}$  e 0,61 para  $C_{21}$ .  
Atraso de 3,5ms nos caminhos  $C_{22}$  e de 3,8ms no caminho  $C_{21}$ .

### 3.3 ESTIMATIVA DOS SONS NOS OUVIDOS

Com as estimativas das distorções causadas pela planta, pode-se calcular os sinais nos dois ouvidos, YE e YD da Figura 3.1.1.

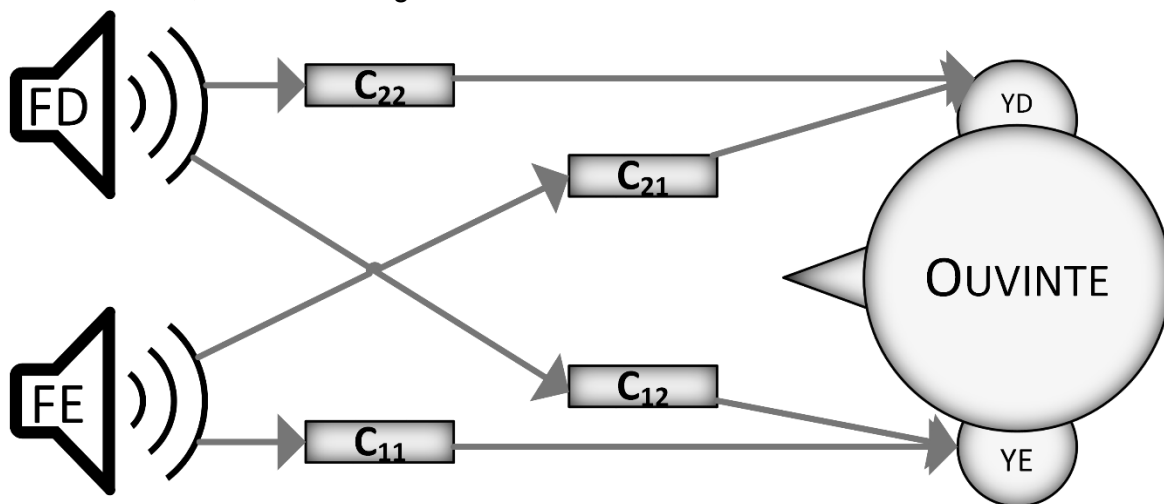


Figura 3.3.1 – Diagrama completo da planta: com dois alto-falantes FE e FD; com as distorções representadas por  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$  e  $C_{22}$ ; e um ouvinte com os ouvidos representados por YE e YD.

O som que chega ao ouvido direito (YD) é a soma da multiplicação do som vindo do alto falante direito (FD) com a distorção  $C_{22}$  com a multiplicação do som de FE e a distorção  $C_{21}$ ,

$$YD = FD \times C_{22} + FE \times C_{21} . \quad \text{Equação 3.3.1}$$

Já o som que chega ao ouvido esquerdo (YE) é a soma da multiplicação do som vindo do alto falante esquerdo (FE) e a distorção  $C_{11}$  com a multiplicação do som de FD e a distorção  $C_{12}$ ,

$$YE = FE \times C_{11} + FD \times C_{12} . \quad \text{Equação 3.3.2}$$

### 3.3.1 APLICANDO IMPULSOS IGUAIS

Se os sinais nos alto-falantes forem dois impulsos em fase, espera-se que nos ouvidos também apareçam dois impulsos em fase. Mais especificamente, é esperado em YE dois impulsos de fase igual a inicial e com amplitude atenuada de acordo com a propagação, no ouvido direito espera-se o mesmo. A Equação 3.3.3 expressa matematicamente os sinais de YE e YD:

$$FD = FE = \delta(t) \Rightarrow YD(\omega) = YE(\omega) = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} + \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} . \quad \text{Equação 3.3.3}$$

A resposta em frequência dos sinais YD e YE são apresentadas na Figura 3.3.2 e na Figura 3.3.3, respectivamente.

Já a resposta ao impulso de YD é apresentada na Figura 3.3.4 e observa-se as mesmas características de atraso e atenuação da Figura 3.2.4 e da Figura 3.2.7.

Do mesmo modo, a resposta ao impulso de YE é apresentada na Figura 3.3.5 e também apresenta as mesmas características de atraso e atenuação da Figura 3.2.4 e da Figura 3.2.7.



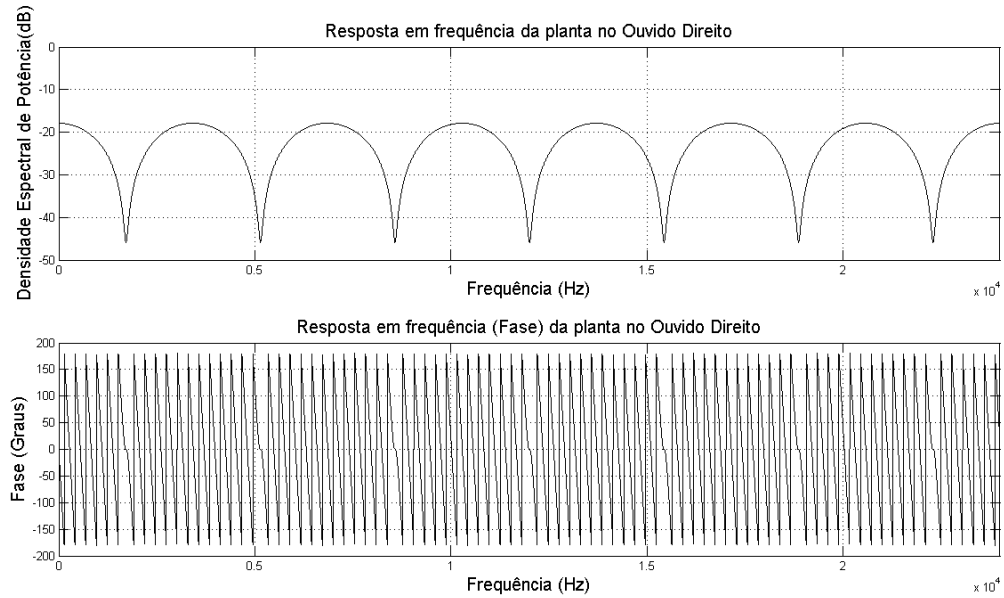


Figura 3.3.2 – Resposta em frequência da soma dos sinais no ouvido direito (YD). Apresentando o efeito de filtro “Comb”: interferência destrutiva em pontos onde ocorrem múltiplos inteiros de  $\lambda$  no caminho  $C_{22}$  e múltiplos de  $\lambda + \lambda/2$ , por conta das fases contrárias.

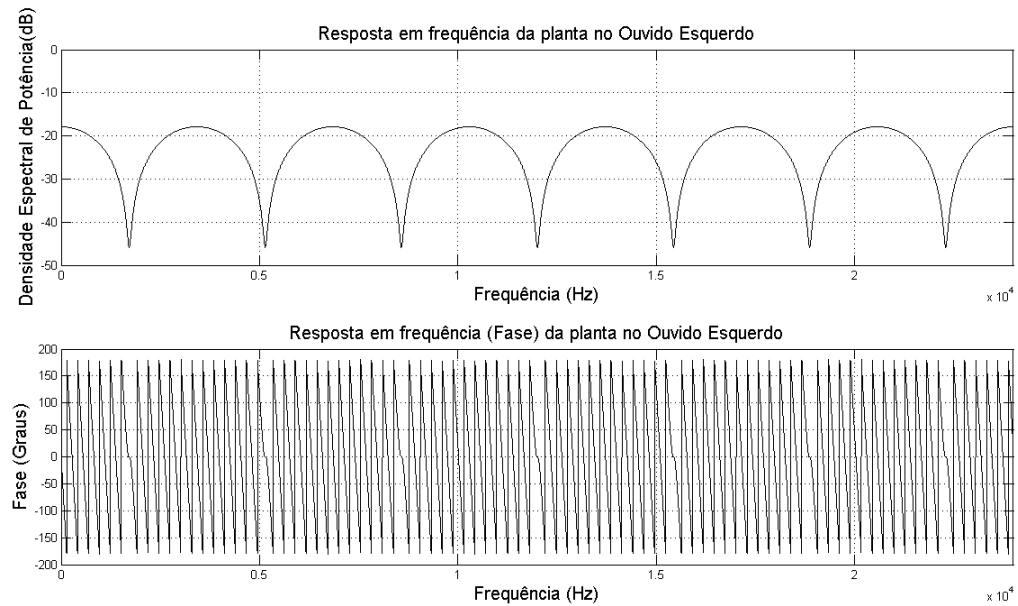


Figura 3.3.3– Resposta em frequência da soma dos sinais no ouvido esquerdo (YE). Apresentando o efeito de filtro “Comb”: interferência destrutiva em pontos onde ocorrem múltiplos inteiros de  $\lambda$  no caminho  $C_{22}$  e múltiplos de  $\lambda + \lambda/2$ , por conta das fases contrárias.

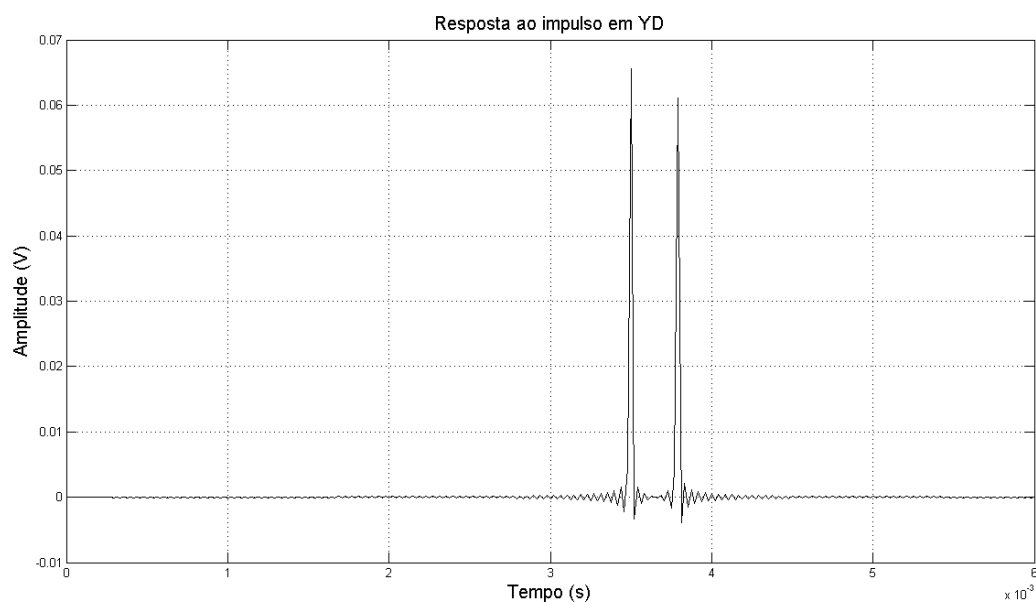


Figura 3.3.4 – Resposta da planta em YD para dois impulsos em fase, um em FD e outro em FE. Exibindo os atrasos e atenuações já calculados e apresentados anteriormente.

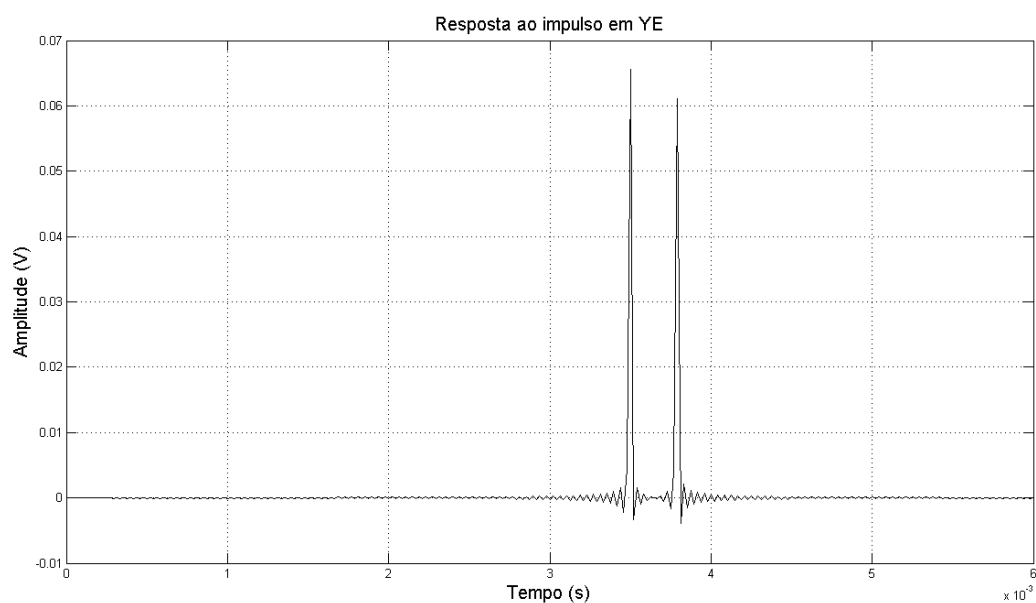


Figura 3.3.5 – Resposta da planta em YE para dois impulsos em fase, um em FD e outro em FE. Exibindo os atrasos e atenuações já calculados e apresentados anteriormente.

Analisando a Figura 3.3.2, pode-se observar o comportamento “*Comb Filter*”. O termo “*Comb*” é utilizado porque a resposta em frequência da amplitude de YD lembra um pente de cabelo. Isso ocorre por causa das fases de FD e FE. Em pontos que os dois sinais chegam com a mesma fase há interferência construtiva (item 2.1.1), resultando nos pontos de máximo; já nos pontos em que eles chegam com fases opostas, ocorre interferência destrutiva.

Um dos pontos de interferência destrutiva foi na frequência de 1,7kHz:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{343}{1715} = 0.2m .$$

Se  $\lambda$  vale 0,2m, então:

$$1.3m = 6,5\lambda \text{ e } 1.2m = 6\lambda .$$

Como em 1,2m houve  $6\lambda$ , a fase nesse ponto é igual a inicial. Já na distância de 1,3m há  $6,5\lambda$ , ou seja, há seis ciclos (fase nula) e meio da onda, por isso nesse ponto a fase é igual a original mais  $180^\circ$ . Somando esses dois sinais, eles tendem a se cancelar, logo há interferência destrutiva.

Um dos pontos de interferência construtiva foi na frequência de 3,46kHz, com isso:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{343}{3457} = 0.1m .$$

Se  $\lambda$  vale 0,1m, então:

$$1.3m = 13\lambda \text{ e } 1.2m = 12\lambda .$$

Como em 1,2m houve  $12\lambda$ , a fase nesse ponto é igual a original. Na distância de 1,3m há  $13\lambda$  e a fase se mantém como a original. Somando esses dois sinais, ocorre uma interferência construtiva, que se manifesta como um ponto de máximo.

### 3.3.2 APLICANDO IMPULSOS FORA DE FASE

Se os sinais nos alto-falantes forem dois impulsos fora de fase, espera-se que nos ouvidos também apareçam dois impulsos fora de fase. Mais especificamente, é esperado em YE um impulso negativo de amplitude maior seguido de um impulso positivo de amplitude menor. Já no ouvido direito espera-se o inverso, um impulso positivo de amplitude maior seguido de um impulso negativo de amplitude menor. A Equação 3.3.4 expressa matematicamente os sinais da matriz Y nos ouvidos direito e esquerdo:

$$\begin{cases} FD = \delta(t) \\ FE = -\delta(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} YD(\omega) = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} - \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} \\ YE(\omega) = -\frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} + \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} \end{cases} \quad \text{Equação 3.3.4}$$

As respostas em frequência de YD e YE expressas pela Equação 3.3.4 são apresentadas na Figura 3.3.6 e Figura 3.3.7, respectivamente.

Já a resposta ao impulso de YD é apresentada na Figura 3.3.8 e tem as mesmas características de atraso e atenuação da Figura 3.2.4 e da Figura 3.2.7.

Do mesmo modo, a resposta ao impulso de YE é apresentada na Figura 3.3.9 e também tem as mesmas características de atraso e atenuação que foram apresentadas na Figura 3.2.4 e da Figura 3.2.7.

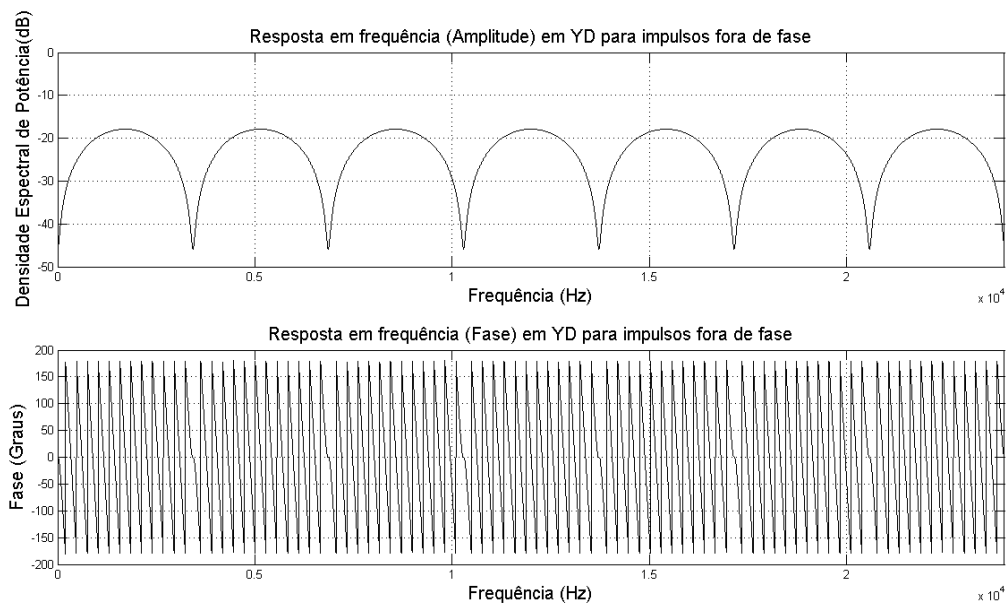


Figura 3.3.6 – Resposta em frequência de YD para impulsos fora de fase. Destaca-se o efeito de filtro “Comb” que continua a aparecer, mesmo mudando as entradas.

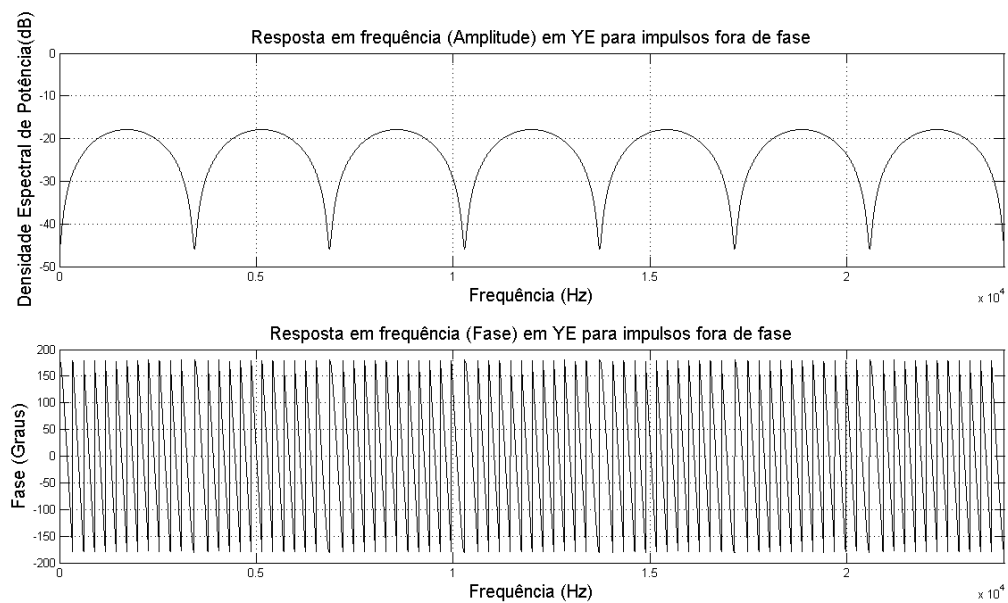


Figura 3.3.7 – Resposta em frequência de YE para impulsos fora de fase. Destaca-se o efeito de filtro “Comb” que continua a aparecer, mesmo mudando as entradas.

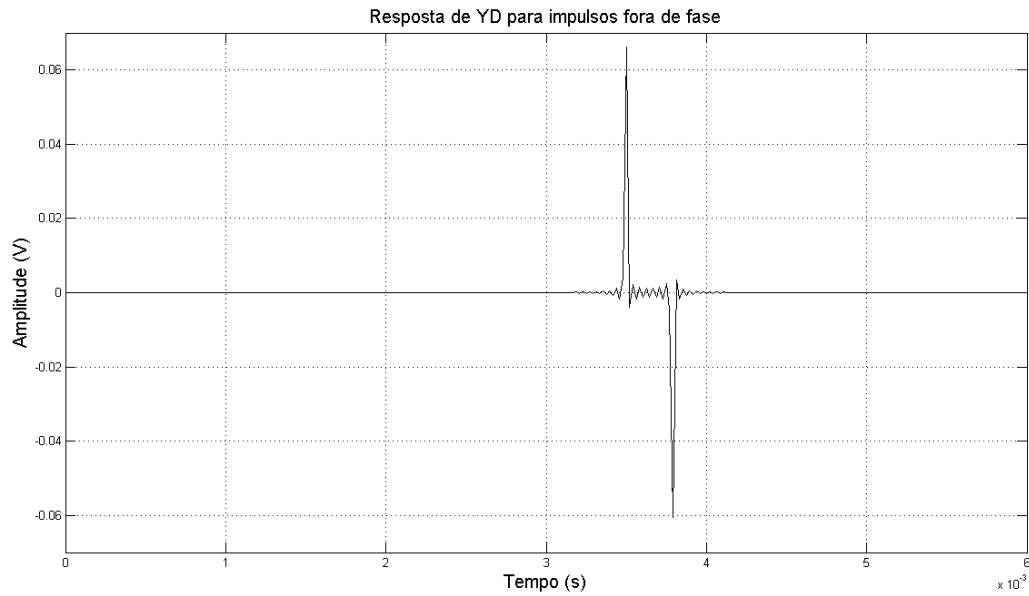


Figura 3.3.8 - Resposta temporal de YD para dois impulsos fora de fase como entrada. Destaca-se que tanto o impulso negativo quanto o positivo possuem atrasos e atenuações compatíveis com o esperado.

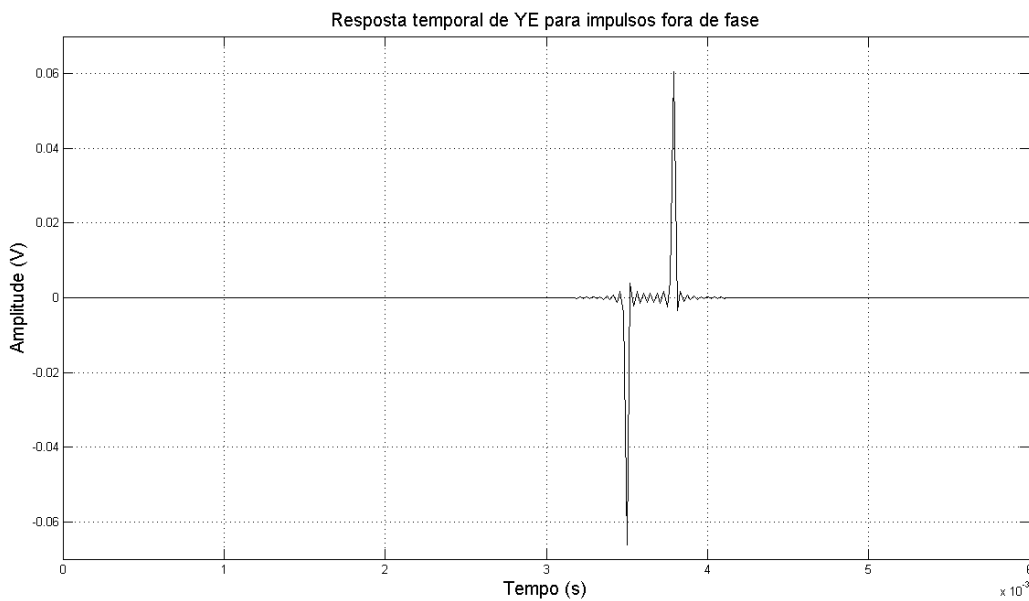


Figura 3.3.9 – Resposta temporal de YE para dois impulsos fora de fase como entrada. Destaca-se que tanto o impulso positivo, quanto o negativo possuem atrasos e atenuações como era esperado.

Analisando a Figura 3.3.6, pode-se observar novamente o comportamento de “Comb Filter”. Mesmo com as entradas diferentes (impulsos defasados de  $180^\circ$ ), o efeito ocorre igualmente para YE e YD devido a simetria do sistema físico. Entretanto, as frequências em que ocorre a interferência construtiva e a destrutiva não são mais as mesmas.

Um dos pontos de interferência destrutiva foi na frequência de 3,4kHz:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{343}{3431} = 0.1m .$$

Se  $\lambda$  vale 0,1m, então:

$$1.3m = 13\lambda \text{ e } 1.2m = 12\lambda .$$

Como em 1,2m houve  $12\lambda$ , não há alteração de fase nesse ponto, logo tem-se a fase original, que foi admitida igual a  $0^\circ$ . Igualmente, na distância de 1,3m há  $13\lambda$ , e mantém-se a fase inicial, que era de  $180^\circ$ . Somando esses dois sinais, eles tendem a se cancelar, logo há interferência destrutiva.

Um dos pontos de interferência construtiva foi na frequência de 3,46kHz:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{343}{5149} = 0.066m .$$

Se  $\lambda$  vale 0,066m, então:

$$1.3m = 19,5\lambda \text{ e } 1.2m = 18\lambda .$$

Como em 1,2m houve  $18\lambda$ , não há alteração de fase nesse ponto, logo tem-se a fase original que foi admitida igual a  $0^\circ$ . Na distância de 1,3m há  $19,5\lambda$ , ou seja, aumentou-se  $180^\circ$  na fase original, a qual já era de  $180^\circ$ , resultando em fase nula  $0^\circ$ . Somando esses dois sinais, ocorre uma interferência construtiva, que se manifesta como um ponto de máximo.

### 3.3.3 APLICANDO IMPULSO EM APENAS UM DOS ALTO-FALANTES

Viu-se que aplicando um impulso em cada alto-falante tem-se sinais Y compostos por dois impulsos em cada ouvido. Foi visto também que aplicar impulsos defasados nos alto-falantes resulta em impulsos defasados nos ouvidos, o que evidencia que a planta obedece ao princípio da superposição. A superposição está relacionada com a linearidade do sistema além do fato de YD e YE não dependerem apenas de certo tipo de entrada, mas responderem da mesma forma para qualquer entrada aplicada.

Como deseja-se verificar mais sobre o princípio da superposição que ocorre no sistema, aplicou-se um impulso em um e nada em outro.

#### 3.3.3.1 IMPULSO NO ALTO-FALANTE ESQUERDO

Aplicou-se um impulso unitário apenas no alto-falante esquerdo (Figura 3.3.10) e espera-se obter dois sinais do tipo impulso: um em YE e outro em YD. Espera-se ainda que o impulso em YD seja mais atrasado e atenuado que o impulso em YE. A Equação 3.3.5 descreve matematicamente os sinais YD e YE que são usados para determinar as respostas temporais da Figura 3.3.10:

$$\begin{cases} FD = 0 \\ FE = \delta(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} YD = \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} \\ YE = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} \end{cases} . \quad \text{Equação 3.3.5}$$



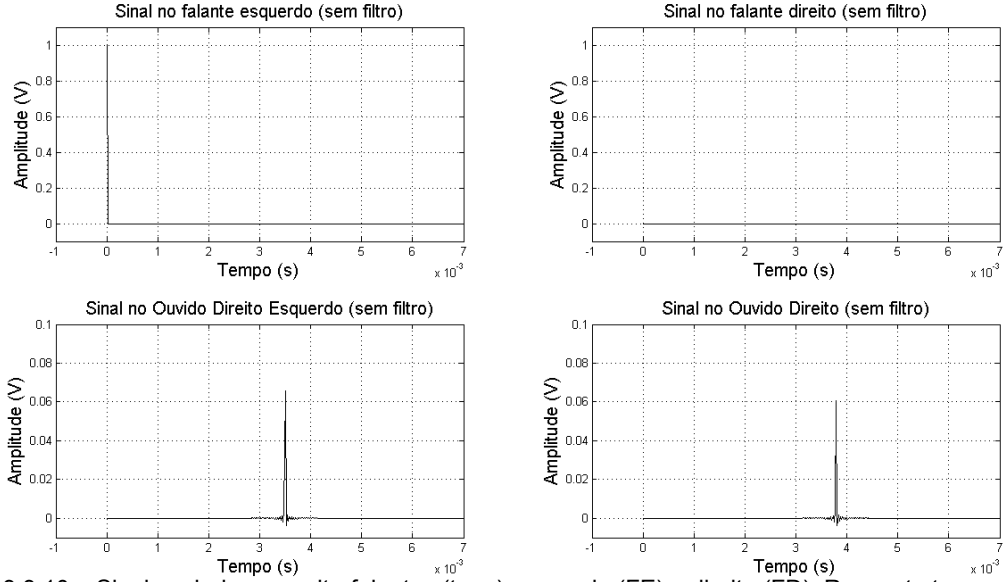


Figura 3.3.10 – Sinal enviados aos alto-falantes (topo) esquerdo (FE) e direito (FD). Resposta temporal (base) de YE e YD. Nota-se que mesmo não havendo som emitido por FD, em YD há sinal.

### 3.3.3.2 IMPULSO NO ALTO-FALANTE DIREITO

Aplicou-se um impulso unitário apenas no alto-falante direito (Figura 3.3.11) e espera-se obter dois sinais do tipo impulso: um em YE e outro em YD. Espera-se ainda que o impulso em YE seja mais atrasado e atenuado que o impulso em YD. A Equação 3.3.6 descreve matematicamente os sinais YD e YE que são usados para determinar as respostas temporais da Figura 3.3.11:

$$\begin{cases} FD = \delta(t) \\ FE = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} YD = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} \\ YE = \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} \end{cases} . \quad \text{Equação 3.3.6}$$

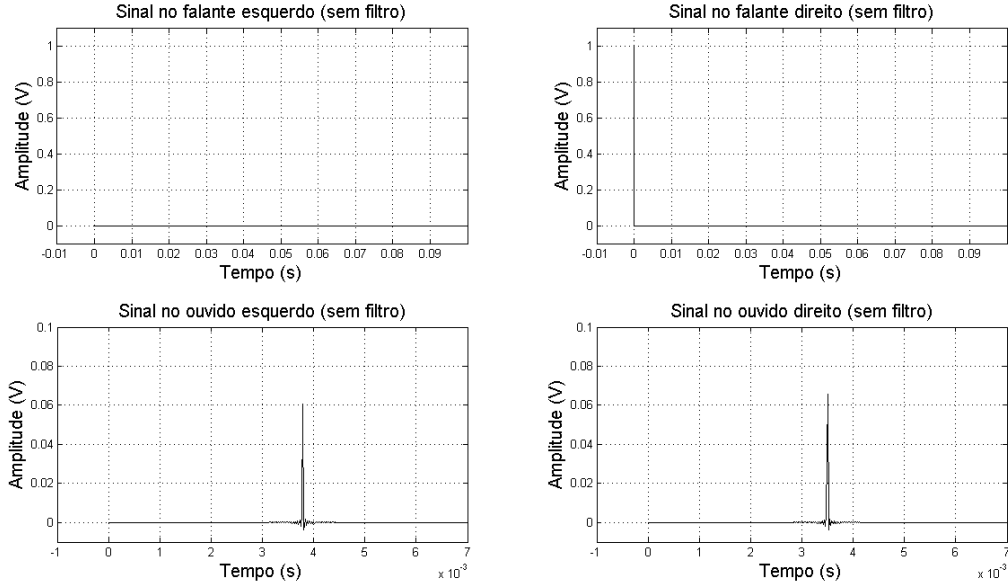


Figura 3.3.11 – Sinal enviados aos alto-falantes (topo) esquerdo (FE) e direito (FD). Resposta temporal (base) de YE e YD. Nota-se que mesmo não havendo som emitido por FE, em YE há sinal.

### 3.3.4 APLICANDO SENOIDES DE FREQUÊNCIAS DIFERENTES

Ao aplicar impulsos em apenas um dos alto-falantes, a planta apresentou os resultados esperados. Como último teste, deseja-se aplicar uma senoide de frequência 1kHz no alto-falante direito e outra de 1,3kHz no alto-falante esquerdo. Dessa forma, pode-se reescrever as equações como apresentado na Equação 3.3.7:

$$\begin{cases} FD = sen(2\pi 1000t) \\ FE = sen(2\pi 1300t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} YD(\omega) = FD \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} + FE \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} \\ YE(\omega) = FE \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} + FD \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} \end{cases} \quad \text{Equação 3.3.7}$$

Como isso, gerou-se a resposta temporal de YD e YE, Figura 3.3.12. Entretanto, extrair informações sobre a frequência de um sinal no domínio do tempo não é trivial, logo apresenta-se uma análise de Fourier para YE e YD na Figura 3.3.13. Dela, destaca-se que houve a soma das duas senoides nos ouvidos, provando obtém-se nos ouvidos a soma dos sinais que foram enviados por cada alto-falante.

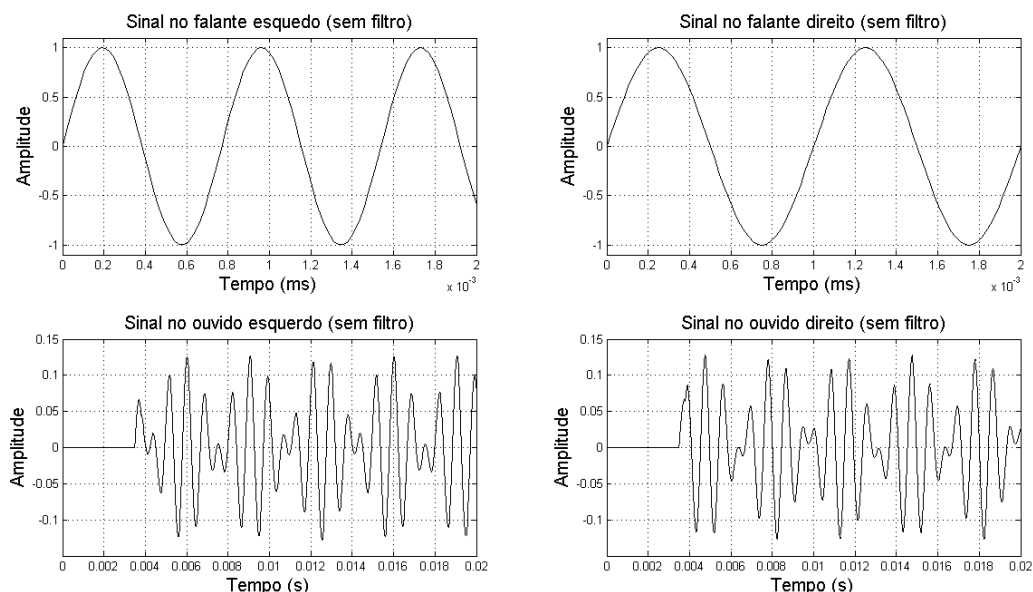


Figura 3.3.12 – Resposta temporal de YE e YD (base) para entradas senoidais com: 1kHz em FD e 1,3kHz em FE (topo). Destaca-se a soma dos sinais senoidais, a atenuação e o atraso de mais de 3ms.

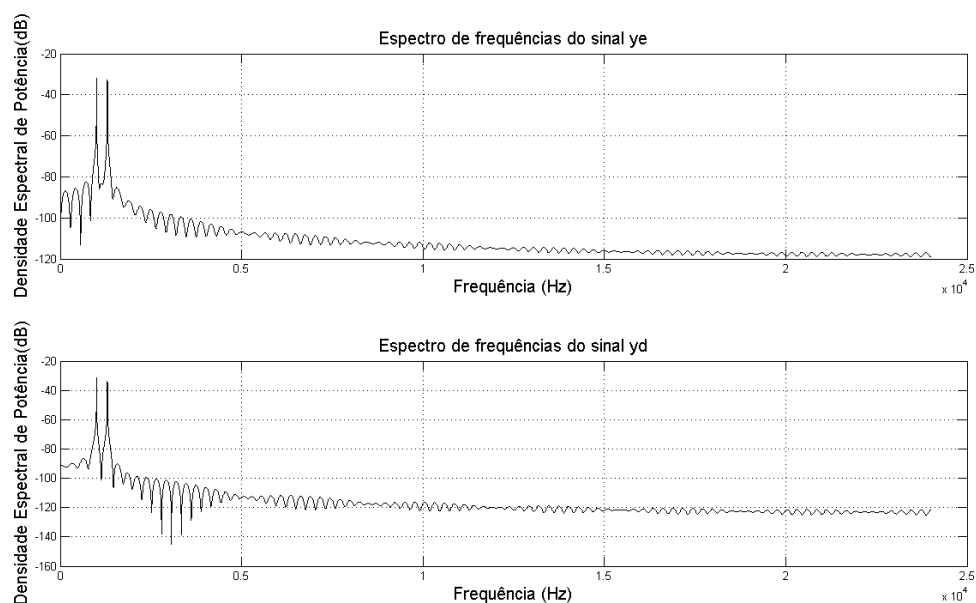


Figura 3.3.13 - Análise de Fourier para os sinais YE (topo) e YD (base), contendo as raias nas frequências de 1,0kHz e 1,3kHz, comprovando que houve a soma das duas senoides.

### 3.4 MODELAGEM DA PLANTA

Antes de calcular os filtros, é interessante sintetizar os modelos de propagação para simplificar e sistematizar os cálculos. Portanto, esse tópico destina-se a transferir as equações que calculam as distorções da planta para uma única matriz C.

As equações de propagação são:

$$\begin{cases} C_{11}(\omega, r) = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} & C_{12}(\omega, r) = \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} \\ C_{21}(\omega, r) = \frac{e^{\frac{-1.3j\omega}{c_0}}}{5.2\pi} & C_{22}(\omega, r) = \frac{e^{\frac{-1.2j\omega}{c_0}}}{4.8\pi} \end{cases} \quad \text{Equação 3.4.1}$$

e sabe-se que os sinais Y são devidos a multiplicação de cada sinal do alto-falante pela distorção que o caminho inseriu:

$$\begin{cases} YE = FE \times C_{11} + FD \times C_{12} \\ YD = FD \times C_{22} + FE \times C_{21} \end{cases} \quad \text{Equação 3.4.2}$$

Reescrevendo a Equação 3.4.2 em formato vetorial, tem-se:

$$\begin{cases} YE = [C_{11} \quad C_{12}] \times \begin{bmatrix} FE \\ FD \end{bmatrix} \\ YD = [C_{21} \quad C_{22}] \times \begin{bmatrix} FE \\ FD \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{Equação 3.4.3}$$

Pode-se portanto resumir a planta em uma única matriz:

$$\begin{bmatrix} YE \\ YD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} FE \\ FD \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 3.4.4}$$

Como mostra a Equação 3.4.5, as matrizes da Equação 3.4.4 possuem dois coeficientes:  $m$ , que é relativo ao número de microfones; e  $f$ , que é relativo ao número de alto-falantes:

$$Y_{m \times f} = C_{m \times f} \times F_{f \times 1}. \quad \text{Equação 3.4.5}$$

Os equacionamentos foram feitos no domínio da frequência, por isso utiliza-se multiplicações no cálculo matricial. No domínio do tempo, a multiplicação é substituída por uma convolução [7], logo a Equação 3.4.2 pode ser reescrita como na Equação 3.4.6, na qual o símbolo  $\otimes$  se refere à operação de convolução dos sinais:

$$\begin{cases} YE = FE \otimes C_{11} + FD \otimes C_{12} \\ YD = FD \otimes C_{22} + FE \otimes C_{21} \end{cases}. \quad \text{Equação 3.4.6}$$



## Capítulo 4 CÁLCULO DOS FILTROS DE CANCELAMENTO

A Equação 3.4.4 apresenta três matrizes: a  $Y$ , que contém os sinais dos ouvidos; a  $C$ , que caracteriza as distorções da planta; e a  $F$ , que representa os sinais dos alto-falantes. Após emitir os sinais de  $F$  (sons) é impossível processá-los, pois já são ondas mecânicas se propagando no espaço. Logo, o processamento foi realizado antes dos alto-falantes.

### 4.1 FILTROS DE CANCELAMENTO

Como o processamento é feito antes dos alto-falantes,  $F$  deve ser o resultado do processo de filtragem, e ter dimensões  $f \times 1$  (Equação 3.4.5).

Define-se uma matriz de filtros  $H$ , de dimensão  $f \times s$ , com  $s$  correspondendo ao número de canais de áudio do sistema original e  $f$  o número de alto-falantes:

$$F_{f \times 1} = H_{f \times s} \times A_{s \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} FE \\ FD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} AE \\ AD \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 4.1.1}$$

Os filtros  $H$  são aplicados em uma matriz  $A$  com os sinais de áudio originais e que possui dimensão  $s \times 1$ . A Figura 4.1.1 apresenta o diagrama de sinais e filtros antes dos alto-falantes.

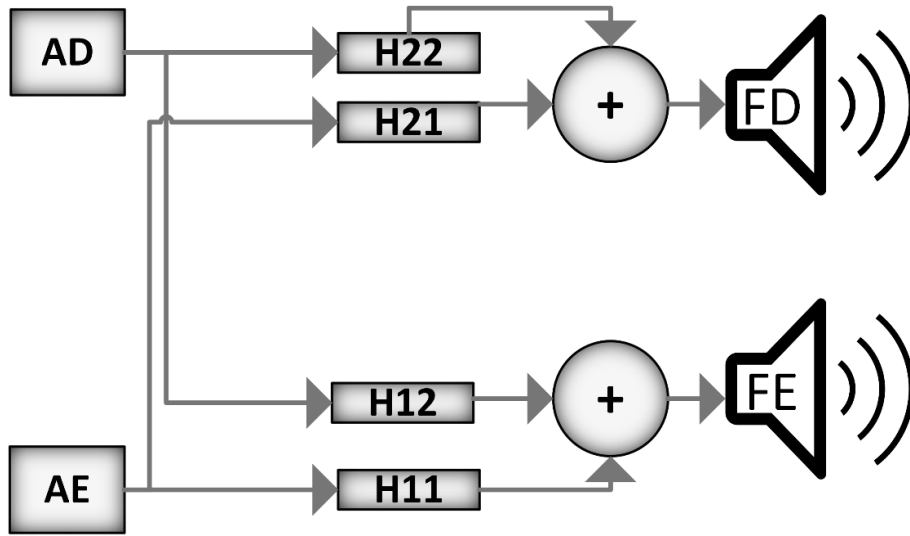


Figura 4.1.1 – Diagrama completo do sistema de filtros contendo: os sinais de áudio, AD e AE; filtros de cancelamento H<sub>11</sub>, H<sub>12</sub>, H<sub>21</sub> e H<sub>22</sub>; e os sinais dos alto-falantes, FD e FE.

## 4.2 EQUACIONAMENTO ANALÍTICO

A matriz de filtros H apresentada na se relaciona com o sistema da forma:

$$Y = C \times H \times A. \quad \text{Equação 4.2.1}$$

Como o objetivo de cancelar o “*crosstalk*” é tornar o som em Y igual ao áudio em A, faz-se H ser o inverso de C:

$$Y = A \Rightarrow H = C^{-1}. \quad \text{Equação 4.2.2}$$

A inversa matricial de uma matriz  $A_{2 \times 2}$  é uma matriz  $A_{2 \times 2}^{-1}$ , que é dada por:

$$A^{-1} = \frac{1}{A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}} \begin{bmatrix} A_{22} & -A_{21} \\ -A_{21} & A_{11} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 4.2.3}$$



Para simplificar os cálculos define-se:

$$\begin{cases} g = \frac{r_1}{r_2} \\ \tau = \frac{r_2 - r_1}{c_0} \end{cases} \quad \text{Equação 4.2.4}$$

Reescrevendo a Equação 3.4.1, tem-se:

$$C = \frac{e^{\frac{-r_1 j \omega}{c_0}}}{4\pi r_1} \begin{bmatrix} 1 & g e^{-j \omega \tau} \\ g e^{-j \omega \tau} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 4.2.5}$$

Portanto, invertendo-se a matriz C, obtém-se matriz:

$$H = C^{-1} = \frac{4\pi r_1 e^{\frac{-r_1 j \omega}{c_0}}}{1 - g e^{-2j \omega \tau}} \begin{bmatrix} 1 & -g e^{-j \omega \tau} \\ -g e^{-j \omega \tau} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 4.2.6}$$

#### 4.2.1 RESTRIÇÕES DA MATRIZ H

Como a matriz de filtros é calculada invertendo a matriz C, podem haver casos em que a matriz H não existe porque a matriz da planta não é inversível. A Equação 4.2.3 mostra que a inversa é dividida pelo determinante da matriz original, logo ela não será definida se tal determinante for igual a zero. Entretanto, para que o determinante seja igual a zero, não há condição real:

$$\begin{aligned} \det A = 0 &\Rightarrow A_{11}A_{22} = A_{12}A_{21} \Rightarrow \frac{1}{g^2} = e^{-2j \omega \tau} \\ -2 \ln(g) &= -2j \omega \tau \Rightarrow \frac{\omega \tau}{\ln(r_1) - \ln(r_2)} = -j \end{aligned} \quad \text{Equação 4.2.7}$$

Outra restrição quanto a inversão é se a exponencial que multiplica a matriz for igual a zero. Entretanto, isso ocorrerá apenas se a distância  $r_1$  for muito grande ou a frequência do sinal  $\omega$  for muito alta. Logo, isso ocorrerá se uma das variáveis tender a infinito ou ambas tenderem simultaneamente:

$$e^{\frac{-jr_1\omega}{c_0}} = 0 \Rightarrow \ln(0) = \frac{-jr_1\omega}{c_0} \Rightarrow \frac{jr_1\omega}{c_0} = +\infty, \quad \text{Equação 4.2.8}$$

Pode-se então afirmar que nos pontos do espaço e da frequência trabalhados os filtros são definidos, pois em todos a matriz  $C$  é definida.

### 4.3 ANÁLISE DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA E TEMPORAL DOS FILTROS

Os filtros  $H_{11}$  e  $H_{22}$  são iguais e dados por:

$$H_{11} = H_{22} = \frac{4\pi r_1}{e^{\frac{-r_1 j \omega}{c_0}}} \frac{1}{1 - g e^{-2j\omega \tau}}. \quad \text{Equação 4.3.1}$$

A Figura 4.3.1 apresenta a resposta em frequência do filtro  $H_{11}$  e a Figura 4.3.2 a resposta em frequência do Filtro  $H_{22}$ . Das duas figuras dos dois filtros destaca-se o comportamento “*comb filter*”, que neste caso é contrário ao apresentado pela planta nos sinais  $Y$  (Figura 3.3.2 e Figura 3.3.3).

Os sinais  $Y$  que chegam aos ouvidos passam pela planta e quando são captados, já estão atenuados. Consequentemente, o filtro apresentará ganho elevado, com a finalidade de inverter tais atenuações. Portanto, as características apresentadas na Figura 4.3.1 e na Figura 4.3.2 correspondem ao que era esperado dos filtros  $H$ .

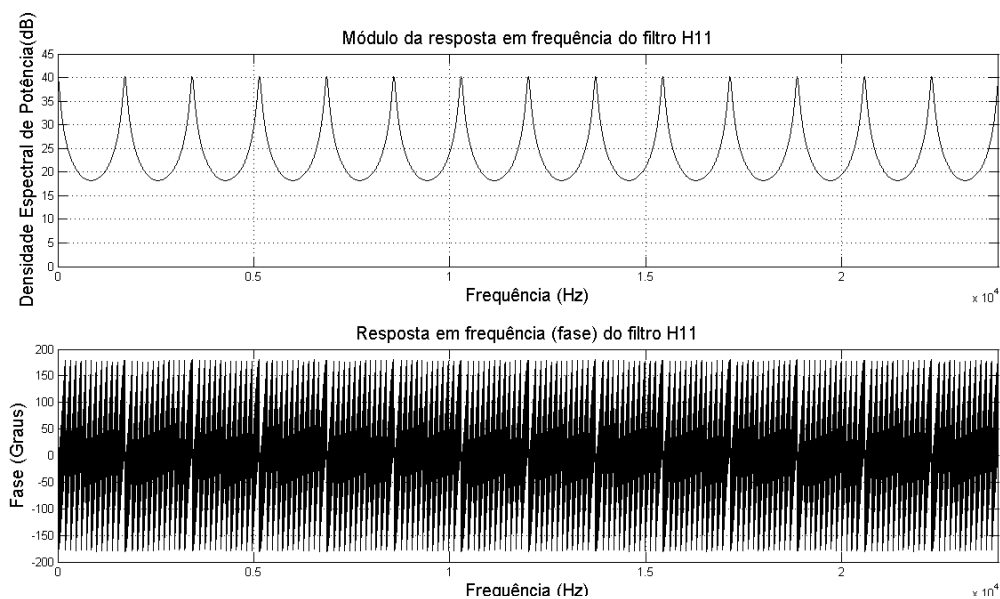


Figura 4.3.1 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro H<sub>11</sub>. Nota-se um alto valor para a amplitude, pois ele inverte a atenuação do sinal; nota-se também que há um comportamento de filtro do tipo “Comb” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD.

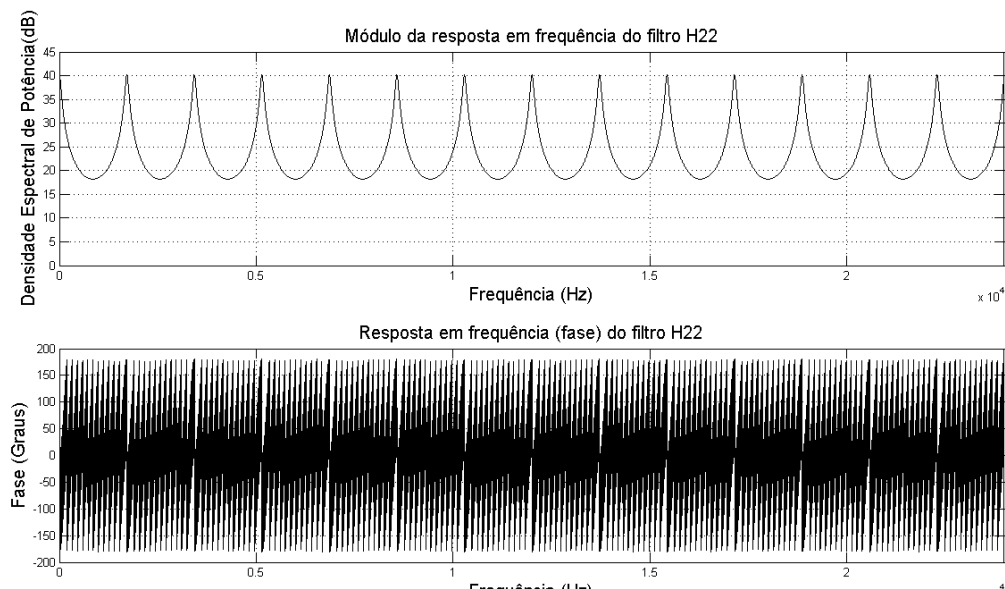


Figura 4.3.2 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro H<sub>22</sub>. Nota-se um alto valor para a amplitude, pois ele inverte a atenuação do sinal; nota-se também que há um comportamento de filtro do tipo “Comb” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD.

Os filtros  $H_{12}$  e  $H_{21}$  são iguais e dados por:

$$H_{12} = H_{21} = -\frac{4\pi r_1}{e^{\frac{-r_1 j \omega}{c_0}}} \frac{1}{1 - g e^{-2j \omega \tau}} g e^{-j \omega \tau} \quad \text{Equação 4.3.2}$$

A Figura 4.3.3 apresenta a resposta em frequência do filtro  $H_{12}$  e a Figura 4.3.4 a resposta em frequência do Filtro  $H_{21}$ . Das duas figuras dos dois filtros destaca-se o comportamento “*comb filter*”, que de modo semelhante ao do caso dos filtros  $H_{11}$  e  $H_{22}$  é contrário ao apresentado pela planta nos sinais Y (Figura 3.3.2 e Figura 3.3.3).

Os sinais Y que chegam aos ouvidos passam pela planta e quando são captados, já estão atenuados. Consequentemente, o filtro apresentará ganho elevado, com a finalidade de inverter tais atenuações. Portanto, as características apresentadas na Figura 4.3.1 e na Figura 4.3.2 correspondem ao que era esperado dos filtros H.

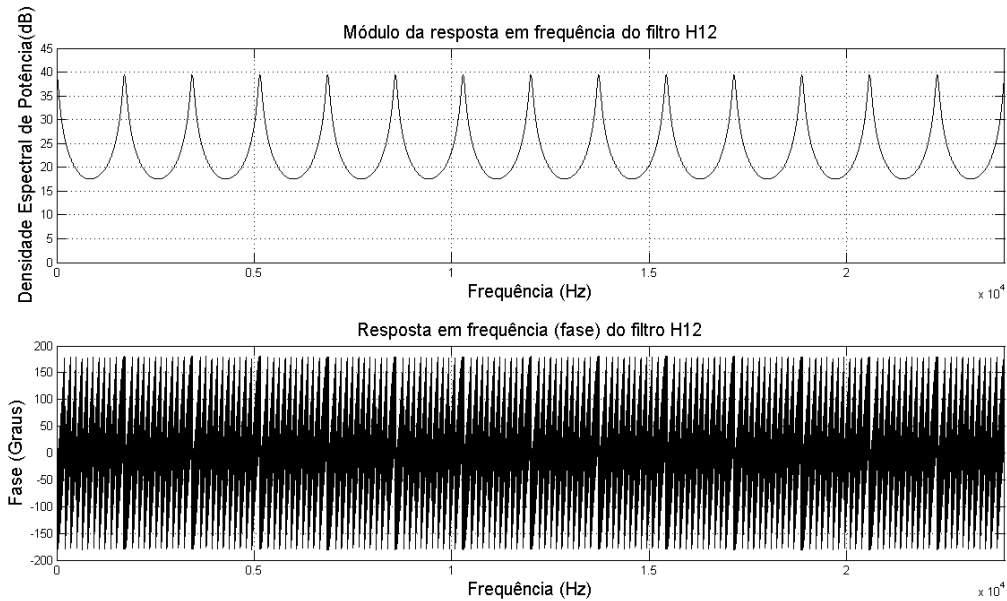


Figura 4.3.3 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro  $H_{12}$ . Nota-se um alto valor par a amplitude, pois o filtro inverte as atenuações dos sinais Y; nota-se ainda que há um comportamento de filtro do tipo “*Comb*” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD.

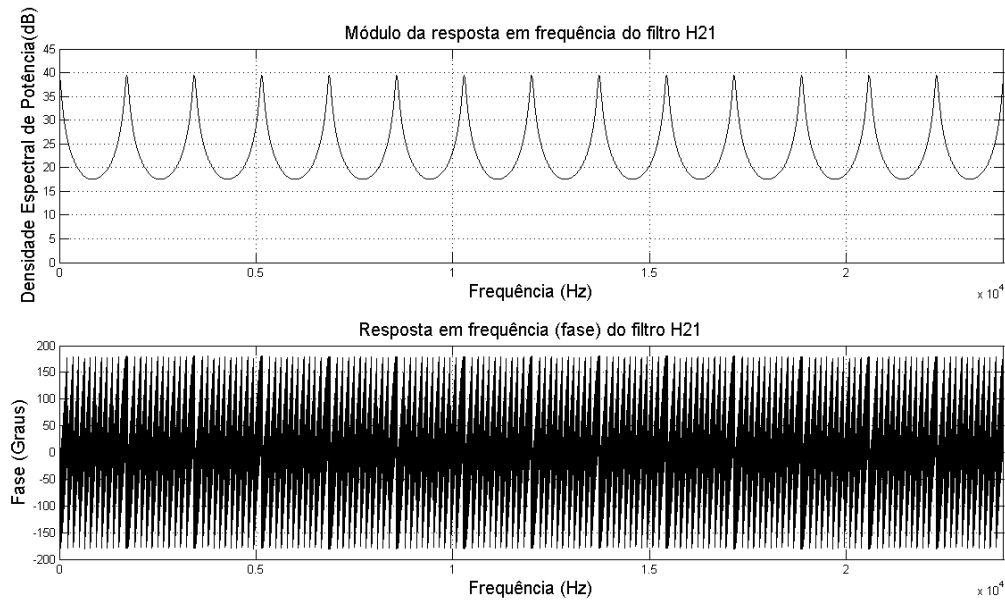


Figura 4.3.4 – Resposta em frequência ganho (topo) e fase (base) do filtro H<sub>21</sub>. Nota-se um alto valor para a amplitude, pois o filtro inverte as atenuações dos sinais Y; nota-se ainda que há um comportamento de filtro do tipo “Comb” inverso ao apresentado pelos sinais YE e YD.

A Figura 4.3.5 apresenta a resposta ao impulso dos elementos da matriz H (filtros de cancelamento), que foi obtida por meio da Transformada Inversa de Fourier (função IFFT<sup>I</sup> do software de simulação **MATLAB**) que utiliza métodos numéricos. Nota-se que a resposta temporal dos filtros é um conjunto de impulsos com amplitude decrescente. Esse comportamento é característico de filtros de Resposta Infinita ao Impulso [7] (filtro IIR – “*Infinity Impulse Response*”) [4]. A grande preocupação com esses filtros, é a estabilidade do sistema, pois o grande número de raios implica em sinais com energia muito elevada. Entretanto, pode-se ver pela Figura 4.3.5 que mesmo havendo um grande número de raios (alta potência enviada aos alto-falantes), as amplitudes de todos os filtros decrescem exponencialmente tendendo a zero. Com isso, pode-se afirmar que o filtro apresenta resposta ao impulso estável.

---

<sup>I</sup> Transformada Inversa de Fourier (IFFT) do software **MATLAB**. Documentação: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/iff.html>

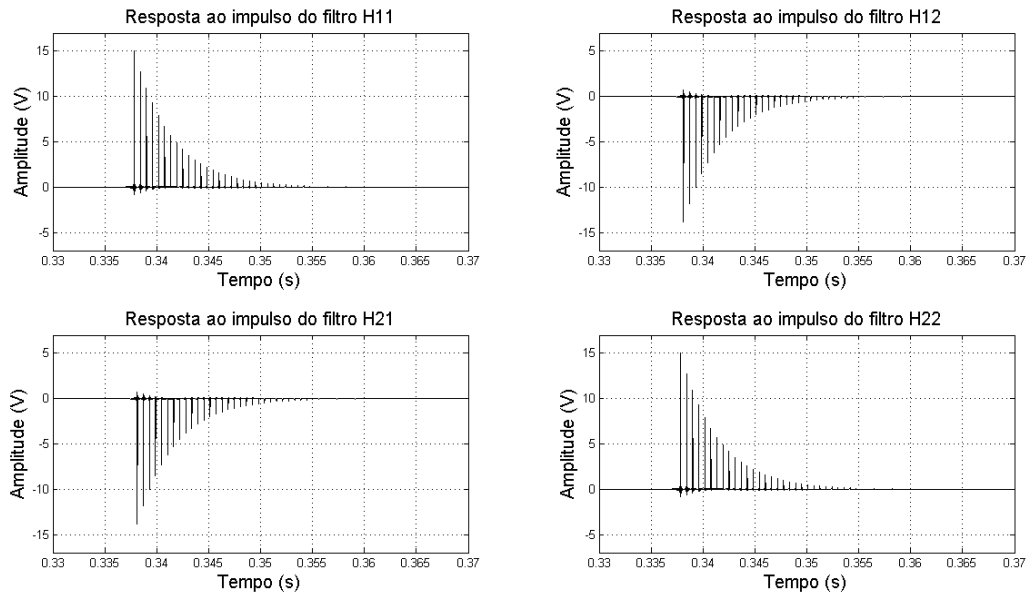


Figura 4.3.5 – Resposta ao impulso dos filtros da matriz H. Nota-se os vários pulsos com amplitude decrescente em todos os casos, o comportamento assemelha-se ao dos filtros do tipo IIR.

## Capítulo 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Capítulo 3, modelou-se a planta descrevendo-a por meio de equações que foram sintetizadas em uma matriz,  $C$ . Já no Capítulo 4, utilizou-se as estimativas da planta para calcular os filtros de cancelamento e eles também foram reunidos em uma matriz,  $H$ . Antes de fazer simulações do sistema completo (filtros mais planta), é importante reunir em uma única equação todos os elementos do trabalho (matrizes  $C$ ,  $H$ ,  $Y$ ,  $F$  e  $A$ ) e elaborar um diagrama completo do sistema. Com isso, pode-se repetir as simulações do Capítulo 3 e verificar se de fato o “*crosstalk*” foi cancelado.

### 5.1 DIAGRAMA COMPLETO DO SISTEMA

O sistema físico foi descrito na Figura 3.3.1 e ele apresentava os alto-falantes (vetor  $F$ ), os caminhos de propagação (matriz  $C$ ) e os ouvidos (vetor  $Y$ ). Já os filtros (matriz  $H$ ) foram apresentados no diagrama da Figura 4.1.1 contendo também os alto-falantes e as vias de áudio original (vetor  $A$ ). Faz-se necessário unir os dois diagramas em um para possibilitar uma melhor compreensão do sistema como um todo, tal diagrama é apresentado na Figura 5.1.1.

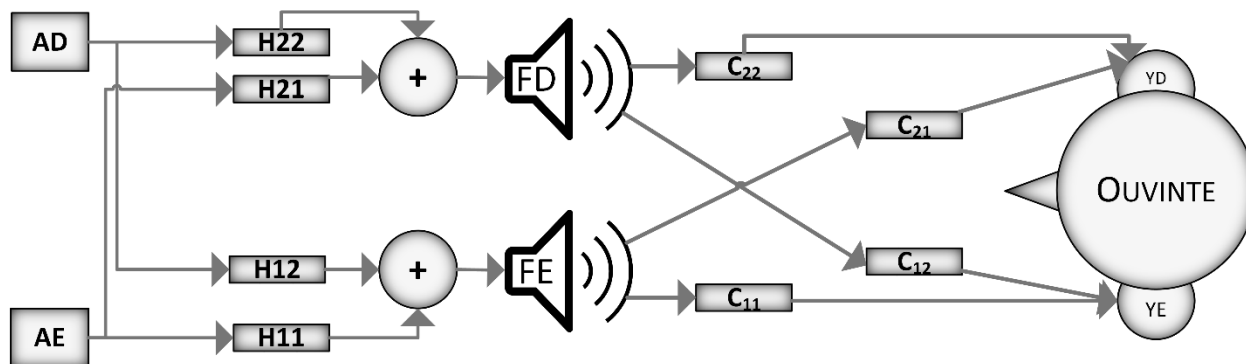


Figura 5.1.1 – Diagrama completo do Sistema, contendo as matrizes:  $A$  – vetor com as vias de áudio original ( $AE$  e  $AD$ );  $H$  – matriz dos filtros de cancelamento ( $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{21}$  e  $H_{22}$ );  $F$  – vetor de alto-falantes ( $FE$  e  $FD$ );  $C$  – matriz de modelagem da planta ( $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$  e  $C_{22}$ ); e  $Y$  – som nos ouvidos ( $YE$  e  $YD$ ).

## 5.2 EQUACIONAMENTO DO SISTEMA DE CANCELAMENTO

Observando a Figura 5.1.1, pode-se escrever a equação que descreve o sistema completo:

$$Y = C \times F = C \times H \times A. \quad \text{Equação 5.2.1}$$

Multiplicando as matrizes C e H tem-se:

$$\begin{bmatrix} YE \\ YD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} AE \\ AD \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.2.2}$$

$$C \times H = \begin{bmatrix} (C_{11}H_{11} + C_{12}H_{21}) & (C_{11}H_{12} + C_{12}H_{22}) \\ (C_{21}H_{11} + C_{22}H_{21}) & (C_{21}H_{12} + C_{22}H_{22}) \end{bmatrix}.$$

Pode-se escrever então:

$$\begin{bmatrix} YE \\ YD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{11}H_{11} + C_{12}H_{21})AE & (C_{11}H_{12} + C_{12}H_{22})AD \\ (C_{21}H_{11} + C_{22}H_{21})AE & (C_{21}H_{12} + C_{22}H_{22})AD \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.2.3}$$

Que é a relação dos sinais Y com a planta, os filtros de cancelamento e os vetores com o áudio original.

## 5.3 SIMULAÇÕES DA PLANTA COM O SISTEMA DE CANCELAMENTO DE “CROSSTALK”

Deseja-se aplicar no sistema com cancelamento de “*crosstalk*” da Figura 5.1.1 as mesmas entradas do Capítulo 3. Como lá não havia os filtros H, no vetor F foi aplicado diretamente os sinais de A, logo, os sinais utilizados neste capítulo são os mesmos utilizados em F quando no caso sem filtros.



### 5.3.1 APLICANDO IMPULSOS IGUAIS

Aplicou-se dois sinais do tipo impulso unitário,  $\delta(t)$ , em fase no vetor A:

$$Y = C \times H \times \begin{bmatrix} \delta(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.1}$$

O objetivo de cancelar o “*crosstalk*” é tornar os sinais em Y iguais aos sinais em A, logo:

$$Y = A = \begin{bmatrix} \delta(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.2}$$

Portanto, pode-se notar pela Figura 5.3.1 que o “*crosstalk*” foi cancelado.

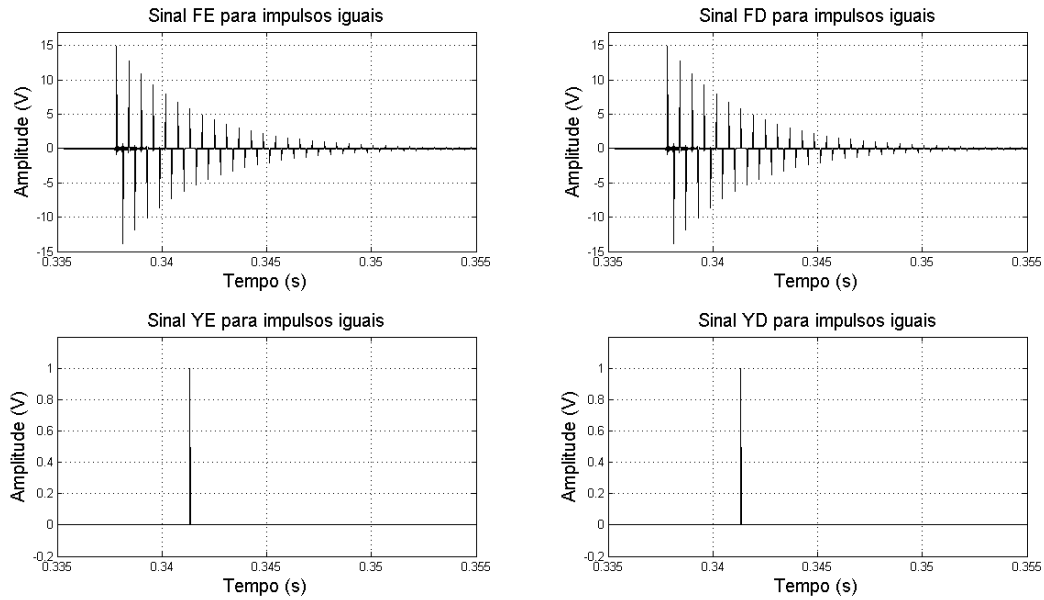


Figura 5.3.1 – Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são os impulsos unitários desejados.

### 5.3.2 APLICANDO IMPULSOS FORA DE FASE

Aplicou-se dois sinais do tipo impulso unitário,  $\delta(t)$ , defasados em  $180^\circ$  no vetor A:

$$Y = C \times H \times \begin{bmatrix} -\delta(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.3}$$

O objetivo de cancelar o “*crosstalk*” é tornar os sinais em Y iguais aos sinais em A, logo:

$$Y = A = \begin{bmatrix} -\delta(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.4}$$

Portanto, pode-se notar pela Figura 5.3.2 que o “*crosstalk*” foi cancelado.

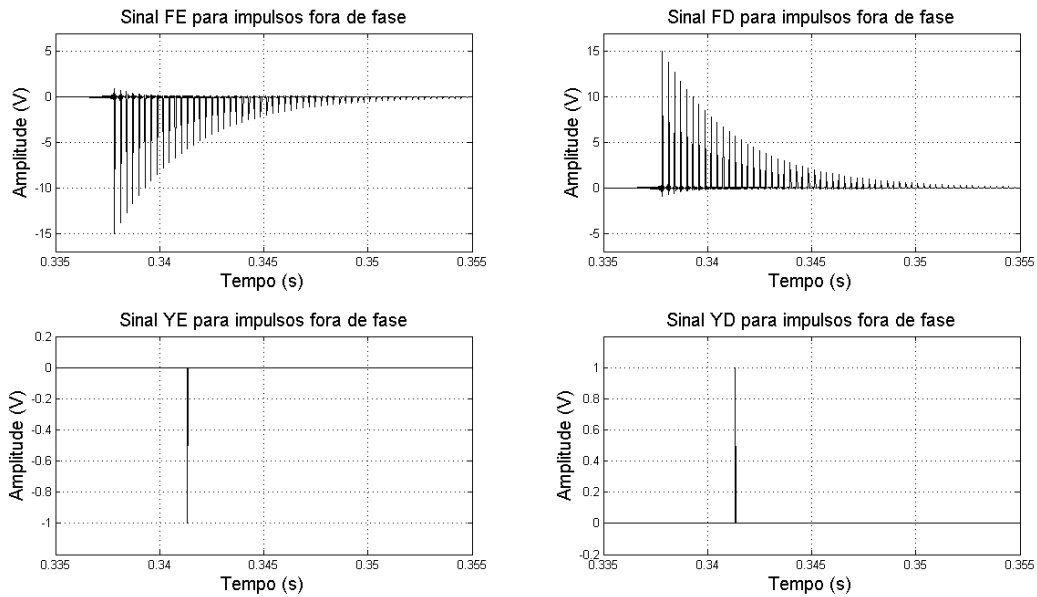


Figura 5.3.2 – Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são os impulsos unitários desfasados de  $180^\circ$ .

### 5.3.3 APLICANDO IMPULSO EM APENAS UM DOS ALTO-FALANTES

#### 5.3.3.1 IMPULSO NO ALTO-FALANTE ESQUERDO

Aplicou-se um sinal do tipo impulso unitário,  $\delta(t)$ , no elemento AE do vetor A:

$$Y = C \times H \times \begin{bmatrix} \delta(t) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.5}$$

O objetivo de cancelar o “*crosstalk*” é tornar os sinais em Y iguais aos sinais em A, logo:

$$Y = \begin{bmatrix} \delta(t) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.6}$$

Portanto, pode-se notar pela Figura 5.3.3 que o “*crosstalk*” foi cancelado.

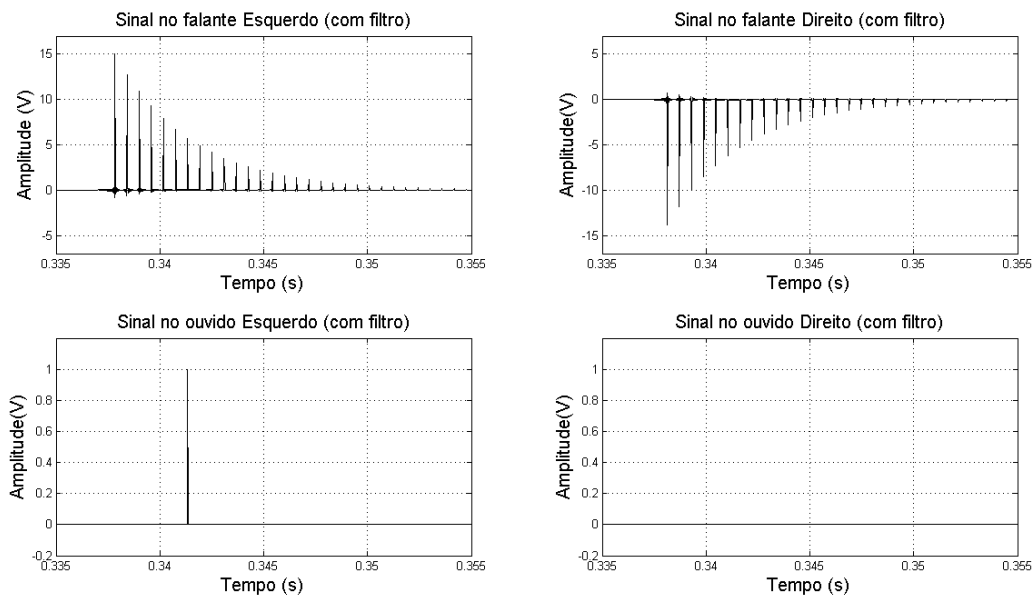


Figura 5.3.3– Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são: um impulso no ouvido esquerdo; e nada no ouvido direito.

### 5.3.3.2 IMPULSO NO ALTO-FALANTE DIREITO

Aplicou-se um sinal do tipo impulso unitário,  $\delta(t)$ , no elemento AD do vetor A:

$$Y = C \times H \times \begin{bmatrix} 0 \\ \delta(t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.7}$$

O objetivo de cancelar o “*crosstalk*” é tornar os sinais em Y iguais aos sinais em A, logo:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta(t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.8}$$

Portanto, pode-se notar pela Figura 5.3.4 que o “*crosstalk*” foi cancelado.

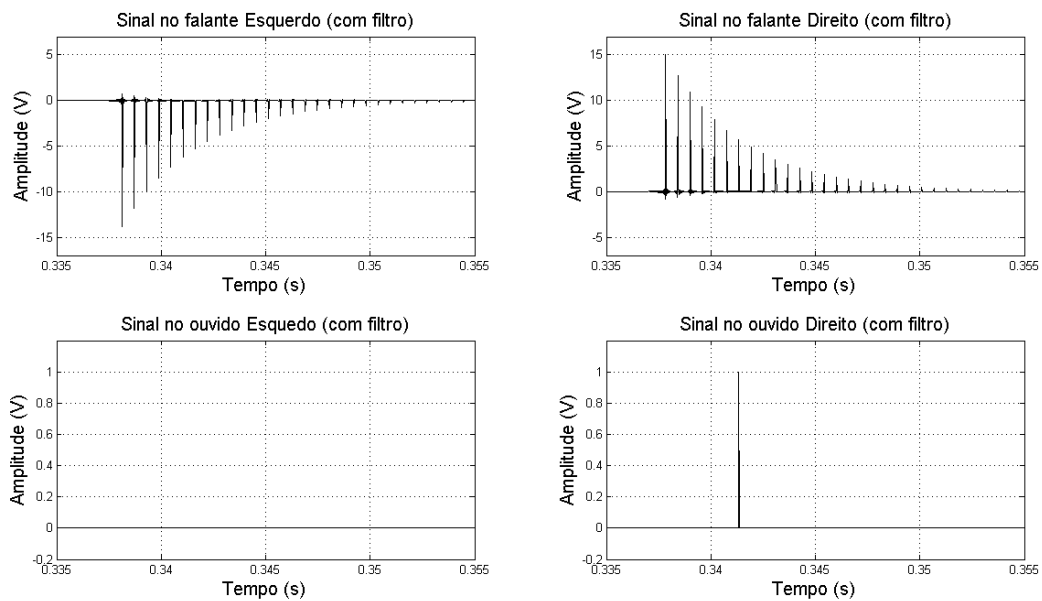


Figura 5.3.4— Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são: um impulso no ouvido direito; e nada no ouvido esquerdo.

### 5.3.4 APLICANDO SENOIDES DE FREQUÊNCIAS DIFERENTES

Como último teste, aplicou-se uma senoide de frequência 1kHz em AD e outra de 1,3kHz em YE:

$$Y = C \times H \times \begin{bmatrix} \text{sen}(2\pi 1300t) \\ \text{sen}(2\pi 1000t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.9}$$

O objetivo de cancelar o “*crosstalk*” é tornar os sinais em Y iguais aos sinais em A, logo:

$$Y = \begin{bmatrix} \text{sen}(2\pi 1300t) \\ \text{sen}(2\pi 1000t) \end{bmatrix}. \quad \text{Equação 5.3.10}$$

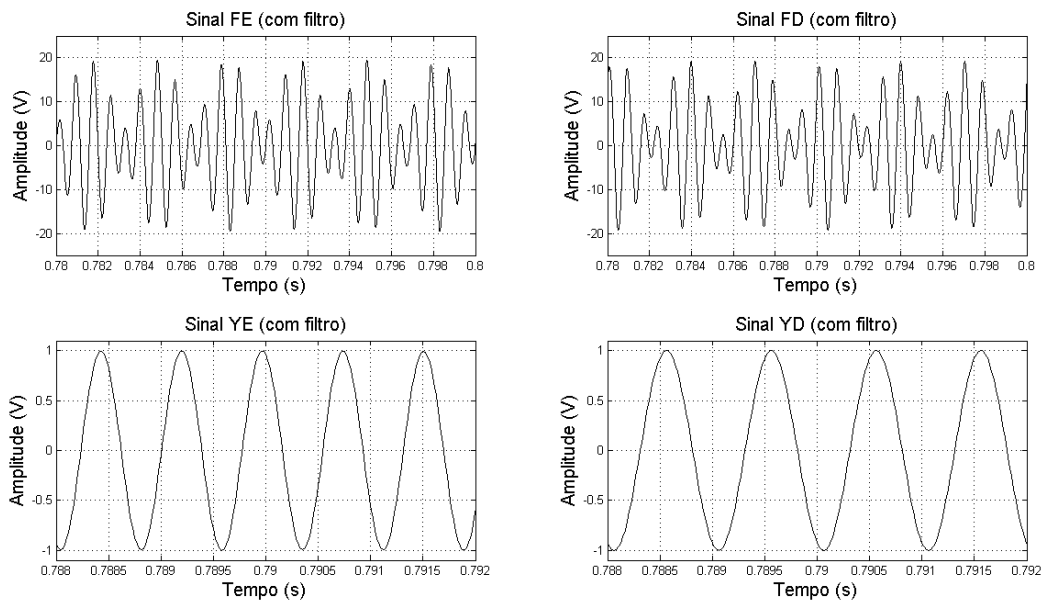


Figura 5.3.5– Sinais F – alto-falantes (topo) e Y - ouvidos (base). Os sinais F apresentam os sons enviados para a planta (C) que os distorce gerando os sinais Y, os quais são: uma senoide de frequência 1kHz no ouvido direito; e outra senoide de frequência ,3kHz no ouvido esquerdo.

Assim como no item 3.3.4, não se pode inferir sobre a frequência dos sinais da Figura 5.3.5, por isso, calcula-se a Transformada de Fourier dos sinais Y para analisar suas componentes em frequência, Figura 5.3.6.

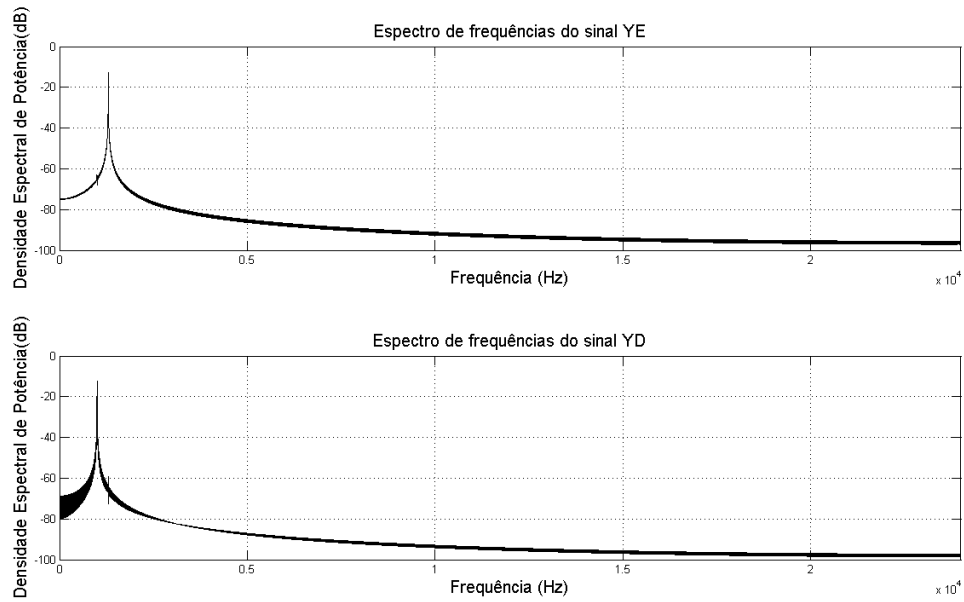


Figura 5.3.6- Análise de Fourier para os sinais YE (topo) e YD (base). Apresentando apenas uma raia na frequência de 1,0kHz para YD e apenas uma raia na frequência de 1,3kHz para YE, comprovando que houve o cancelamento do “crosstalk”.

Para comprovar que houve cancelamento do *crosstalk*, basta analisar a FFT dos dois sinais Y apresentada na Figura 5.3.6. Pode-se observar nela que há apenas uma raia em cada análise de Fourier, diferentemente da Figura 3.3.13 na qual haviam componentes nas frequências das duas senoides aplicadas (1 kHz e 1,3 kHz). Portanto, a Figura 5.3.6 mostra que houve o cancelamento do *crosstalk* como desejado.

## Capítulo 6 CONCLUSÕES

Criou-se um sistema de filtros para resolver um problema acústico e para isso foi necessário estudá-lo, entendendo como e onde ocorria, além de buscar na literatura modelos que permitiram modelá-lo matematicamente. Após essa etapa de revisão bibliográfica, estudou-se o comportamento dos modelos criados e como usá-los no cálculo dos filtros de cancelamento. Gerando os filtros, integrou-se o sistema de cancelamento com a planta (modelos gerados) e verificou-se que o problema foi de fato resolvido.

### 6.1 PROBLEMAS DO SISTEMA

Foi visto no Capítulo 4 que os filtros projetados são do tipo IIR e também foi citado que a grande preocupação com relação a eles é a estabilidade do sistema. Devido às raias de amplitude elevada na resposta ao impulso, o sinal carrega muita potência. Em algum caso, a amplitude dessas raias pode não tender a zero, e o sistema se tornaria instável. Felizmente, o sistema de cancelamento de crosstalk projetado é estável.

Com o cancelamento utilizando a inversa matricial surge o problema da alta potência enviada aos alto-falantes (altas amplitudes das respostas ao impulso da Figura 4.3.5). Como o sistema é estável, o principal problema decorrente das altas amplitudes é a saturação de transistores e a consequente distorção dos sons. Se as amplitudes forem muito elevadas, os amplificadores não responderão adequadamente, pois os transistores entrarão na região de saturação causando distorções, pois os sinais são ceifados. Havendo essas distorções, o processamento que cancelou o “*crosstalk*” é perdido e o som fica com qualidade inferior a original.

Pode-se utilizar uma abordagem de filtros com regularização para corrigir as altas amplitudes dos sinais [8]. Entretanto, há soluções mais simples como diminuir o “volume” do aparelho de som durante a reprodução. Por isso, optou-se por manter os códigos como projetados, pois sabe-se que de qualquer modo o ouvinte ajustará seu amplificador de modo que o “volume” lhe seja o mais confortável possível.

## 6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações do Capítulo 3 mostram que modelou-se corretamente a planta do sistema. Pode-se afirmar isso, pois tanto os atrasos, quanto as atenuações apresentam as características esperadas. Além disso, o efeito “*comb filter*” nos sinais Y da planta apresenta interferências construtiva e destrutiva em frequências esperadas.

Para calcular os filtros no Capítulo 4, foi necessário manipular matematicamente o modelo matricial criado no Capítulo 3. Verificou-se que os elementos da matriz de filtros também apresentam comportamento “*comb filter*”. Os filtros de H compensam as baixas amplitudes dos sinais Y e isso se reflete em altas amplitudes na resposta ao impulso.

No Capítulo 5, as simulações comprovam que houve cancelamento de “*crosstalk*”. Pode-se observar claramente na Figura 5.3.1 que tanto a atenuação, quanto a interferência foram anuladas, consequentemente, os sinais nos ouvidos são os impulsos unitários que se desejava. Ainda investigando o cancelamento, aplicou-se entradas como impulsos defasados (Figura 5.3.2), impulso em um ouvido e no outro não (Figura 5.3.3 e Figura 5.3.4) e tons senoidais (Figura 5.3.5 e Figura 5.3.6), repetindo as simulações do Capítulo 3. Em todos os casos obteve-se êxito com os sinais em YD e YE, pois eles eram os mesmos de AD e AE, respectivamente.

Dentre as entradas aplicadas, destaca-se os tons senoidais, pois segundo o princípio de Fourier, todo sinal pode ser decomposto na soma de senoides. Com base nisso, pode-se dizer que um sinal de áudio é composto pela soma de tons senoidais com amplitudes diferentes. Como foi possível gerar duas senoides com frequências diferentes, uma em YD e outra em YE, pode-se então usar o sistema de cancelamento para manipular arquivos de áudio, os quais são compostos pela soma de tons senoidais.

Por fim, o sistema de cancelamento do “*crosstalk*” deve atuar tanto nas interferências, quanto nas atenuações da planta e, por isso, projetou-se uma matriz de filtros H que é a inversa da matriz de modelagem da planta. No Capítulo 5 pôde-se ver pelos resultados que os objetivos de cancelar o “*crosstalk*” foram atingidos. Destacando-se a Figura 5.3.6, que apresenta o cancelamento do crosstalk e das atenuações da planta quando aplicadas duas senoides de frequências diferentes no vetor A.



## 6.3 PRÓXIMOS PASSOS

Realizou-se a modelagem de um sistema com duas caixas de som e um ouvinte. Com base nos modelos criados, calculou-se filtros de cancelamento da interferência do tipo *crosstalk*. O produto final do trabalho são os códigos em **MATLAB** (Anexos) para a descrição da planta, cálculo e validação dos filtros.

A sequência do trabalho envolve migrar os códigos em **MATLAB** para um processador de sinais que realize a filtragem em tempo real, um processador recomendado é o DSP TMS320C5515<sup>1</sup>. Migrando os códigos para um DSP, pode-se trabalhar com sistemas reais de áudio e para isso, seria necessário estudar e modelar os alto-falantes utilizados com o fim de cancelar também as distorções inseridas por eles.

Trabalhar com um sistema real de cancelamento de *crosstalk* seria proveitoso para a sonorização de ambientes residenciais. Pode-se criar aparelhos *home theater* que reproduzam áudio binaural sem fones de ouvido e isso possui aplicações tanto para filmes, quanto jogos eletrônicos.

---

<sup>1</sup> Processador Digital de Sinais (DSP) de baixo custo e alta performance para processamento de sinais de áudio. Produzido pela empresa Texas Instruments. Referência: <http://www.ti.com/tool/tmdx5515ezdsp>.



## Referências Bibliográficas:

- [1] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppins e J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, Fourth Edition ed., 2005.
- [2] F. Fazi, K. Frampton, T. Takeuchi e P. Nelson, "Binaural hearing and crosstalk cancellation," Southampton .
- [3] P. A. Nelson e T. Takeuchi, "Optimal source distribution for binaural synthesis over loudspeakers," *J. Acoust. Soc. Am.*, pp. 2786-2797, December 2002.
- [4] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentals of Physics*, Eighth ed., vol. I, Wiley, 2008.
- [5] BIPM, "Système International d'Unités," Bureau International des Poids et Mesures, 1960. [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/11/12/>. [Acesso em 23 05 2014].
- [6] D. Self, *Audio engineering explained : professional audio recording*, First ed., Focal Press, 2010.
- [7] A. V. Oppenheim e R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Third ed., Prentice Hall Press.
- [8] O. Kirkeby, P. A. Nelson, H. Hamada e F. Orduna-Bustamante, "Fast Deconvolution of Multichannel Systems Using Regularization," *IEEE TRANSACTIONS ON SPEECH AND AUDIO PROCESSING*, vol. VOL. 6, pp. 189-195, 1998.
- [9] P. A. Nelson, H. Hamada e E. S. J., "Adaptive Inverse Filters for Stereophonic Sound," *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, July 1992.
- [10] M. Talbot-Smith, *Audio Engineer's Reference Book*, Second ed., 1999.
- [11] S. Yoo, Y. Kim, K.-S. Lee, K. Yoon, S. Y. Kim e S.-P. Lee, "A Novel Adaptive Stereo Sound System with Self-Generating Sound-Based Listener Tracking," em *IEEE 14th International Symposium on Consumer Electronics*, 2010 .
- [12] Lacouture-Parodi, Yesenia; Habets, Emanuel A.P., "CROSSTALK CANCELLATION SYSTEM USING A HEAD TRACKER BASED ON INTERAURAL TIME DIFFERENCES," em *International Workshop on Acoustic Signal Enhancement 2012*, Aachen, 4-6 September 2012.
- [13] D. Self, *Small signal audio design.*, Focal Press, 2010.

- [14] T. Takeuchi e P. A. Nelson, "Extension of the Optimal Source Distribution for Binaural Sound Reproduction," *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, vol. 94, pp. 981-987, 2008.

## Anexos

### Código para modelagem da planta

```
% Código para modelagem da planta
clear all
close all
clc
%% Frequência de Amostragem
Fs = 48000;
%% Velocidade do som no meio (ar)
co = 343; %Velocidade aproximada em m/s
%% Número de Pontos na FFT
N_fft = 2^15;
%% Vetor de Frequências
f = linspace(0,Fs/2,N_fft/2);
w = f.*(2*pi);

%% Constantes
r1 = 1.2;      % Caminho menor
r2 = 1.3;      % Caminho maior
tau = (r2-r1)/co;
g = r1/r2;

%% Simulação da planta (frequência)

C = zeros(2,2,N_fft/2);

C(1,1,:) = (exp((-1i.*w*r1)/(co)))/(4*pi*r1);

C(2,2,:) = C(1,1,:);

C(1,2,:) = squeeze(C(1,1,:)).*(g*(exp(-1i*tau.*w))).';

C(2,1,:) = C(1,2,:);

%% Resposta em frequência da planta

%cll
figure,subplot(2,1,1),plot(f,squeeze(mag2db(abs(C(1,1,:)))),'k')
title('Módulo da resposta em frequência (Amplitude) da planta C11','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (dB)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -25 0])
grid
```

```

subplot(2,1,2),plot(f,squeeze(radtodeg(angle(C(1,1,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (Fase) da planta C11','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Fase (Graus)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -200 200])
grid

%c12
figure,subplot(2,1,1),plot(f,squeeze(mag2db(abs(C(1,2,:)))), 'k')
title('Módulo da resposta em frequência (Amplitude) da planta C12','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (dB)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -25 0])
grid
subplot(2,1,2),plot(f,squeeze(radtodeg(angle(C(1,2,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (Fase) da planta C12','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Fase (Graus)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -200 200])
grid

%c21
figure,subplot(2,1,1),plot(f,squeeze(mag2db(abs(C(2,1,:)))), 'k')
title('Módulo da resposta em frequência (Amplitude) da planta C21','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (dB)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -25 0])
grid
subplot(2,1,2),plot(f,squeeze(radtodeg(angle(C(2,1,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (Fase) da planta C21','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Fase (Graus)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -200 200])
grid

%c22
figure,subplot(2,1,1),plot(f,squeeze(mag2db(abs(C(2,2,:)))), 'k')
title('Módulo da resposta em frequência (Amplitude) da planta C22','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V) (dB)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -25 0])
grid
subplot(2,1,2),plot(f,squeeze(radtodeg(angle(C(2,2,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (Fase) da planta C22','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Fase (Graus)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -200 200])
grid

```

```

%% Resposta ao impulso da planta
C_time = zeros(2,2,N_fft);

for x = 1:2
    for y=1:2
        C_time(x,y,:) = ifft(squeeze(C(x,y,:)),N_fft,'symmetric');
    end
end

max = size(C_time);
time = linspace(0,max(3)/Fs,max(3));

figure,subplot(2,1,1),plot(time,squeeze(C_time(1,1,:))','k')
title('Resposta ao impulso da planta C11','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0 0.006 -0.01 0.07]);
grid

subplot(2,1,2),plot(time,squeeze(C_time(1,2,:))','k')
title('Resposta ao impulso da planta C12','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0 0.006 -0.01 0.07]);
grid

figure,subplot(2,1,1),plot(time,squeeze(C_time(2,2,:))','k')
title('Resposta ao impulso da planta C22','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0 0.006 -0.01 0.07]);
grid

subplot(2,1,2),plot(time,squeeze(C_time(2,1,:))','k')
title('Resposta ao impulso da planta C21','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0 0.006 -0.01 0.07]);
grid

%% Resposta em frequência de Y
% YD
figure,subplot(2,1,1),plot(f,squeeze(mag2db(abs(C(1,1,:) +
C(1,2,:))))','k')
title('Resposta em frequência da planta no Ouvido Direito','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (dB)','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
axis([0 Fs/2 -50 0])
grid

```

```

subplot(2,1,2),plot(f,squeeze(radtodeg(angle(C(1,1,:) + C(1,2,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (Fase) da planta no Ouvido
Direito','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Fase (Graus)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -200 200])
grid

% YE
figure,subplot(2,1,1),plot(f,squeeze(mag2db(abs(C(2,2,:) +
C(2,1,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência da planta no Ouvido
Esquerdo','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (dB)','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
axis([0 Fs/2 -50 0])
grid

subplot(2,1,2),plot(f,squeeze(radtodeg(angle(C(2,2,:) + C(2,1,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (Fase) da planta no Ouvido
Esquerdo','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Fase (Graus)','FontSize',15)
axis ([0 Fs/2 -200 200])
grid

%% Resposta ao impulso dos sinais Y
% YE
figure,plot(time,squeeze(C_time(1,1,:) + C_time(1,2,:))', 'k')
title('Resposta ao impulso em YE','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
axis([0 0.006 -0.01 0.07]);
grid

% YD
figure,plot(time,squeeze(C_time(2,2,:) + C_time(2,1,:))', 'k')
title('Resposta ao impulso em YD','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
axis([0 0.006 -0.01 0.07]);
grid

```



## Código Para Cálculo dos Filtros

```
% Cálculo dos filtros de cancelamento de crosstalk
clear all
close all
clc

%% Frequência de Amostragem
Fs = 48000;
%% Velocidade do som no meio (ar)
co = 343; %Velocidade aproximada em m/s
%% Número de Pontos na FFT
N_fft = 2^15;
%% Vetor de Frequências
f = linspace(0,Fs/2,N_fft/2);
w = f.*(2*pi);

%% Constantes
r1 = 1.2;          % Caminho menor
r2 = 1.3;          % Caminho maior
tau = (r2-r1)/co;
g = r1/r2;

%% Simulação da planta (frequência)

C = zeros(2,2,N_fft/2);

C(1,1,:) = (exp((-1i.*w*r1)/(co)))/(4*pi*r1);

C(2,2,:) = C(1,1,:);

C(1,2,:) = squeeze(C(1,1,:)).*(g*(exp(-1i*tau.*w))).';

C(2,1,:) = C(1,2,:);

%% Cálculo dos filtros de cancelamento

% Atraso de modelagem
k = linspace(0,(N_fft/2)-1,(N_fft/2));
delay = exp(-1i*pi.*k);

% Filtros H
H = zeros(2,2,N_fft/2);

for x = 2:N_fft/2
    H(:, :, x) = delay(x)*inv(C(:, :, x));
end
```

```

%% Resposta em frequência do filtro H
% H11
figure, subplot(2,1,1), plot(f, squeeze(mag2db(abs(H(1,1,:)))), 'k')
title('Módulo da resposta em frequência do filtro H11', 'FontSize', 15)
xlabel('Frequência (Hz)', 'FontSize', 15)
ylabel('Amplitude (dB)', 'FontSize', 15)
axis ([0 Fs/2 0 45])
grid
subplot(2,1,2), plot(f, squeeze(rad2deg(angle(H(1,1,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (fase) do filtro H11', 'FontSize', 15)
xlabel('Frequência (Hz)', 'FontSize', 15)
ylabel('Fase (Graus)', 'FontSize', 15)
axis([0 Fs/2 -200 200])
grid

% H12
figure, subplot(2,1,1), plot(f, squeeze(mag2db(abs(H(1,2,:)))), 'k')
title('Módulo da resposta em frequência do filtro H12', 'FontSize', 15)
xlabel('Frequência (Hz)', 'FontSize', 15)
ylabel('Amplitude (dB)', 'FontSize', 15)
axis ([0 Fs/2 0 45])
grid
subplot(2,1,2), plot(f, squeeze(rad2deg(angle(H(1,2,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (fase) do filtro H12', 'FontSize', 15)
xlabel('Frequência (Hz)', 'FontSize', 15)
ylabel('Fase (Graus)', 'FontSize', 15)
axis([0 Fs/2 -200 200])
grid

% H22
figure, subplot(2,1,1), plot(f, squeeze(mag2db(abs(H(2,2,:)))), 'k')
title('Módulo da resposta em frequência do filtro H22', 'FontSize', 15)
xlabel('Frequência (Hz)', 'FontSize', 15)
ylabel('Amplitude (dB)', 'FontSize', 15)
axis ([0 Fs/2 0 45])
grid
subplot(2,1,2), plot(f, squeeze(rad2deg(angle(H(2,2,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (fase) do filtro H22', 'FontSize', 15)
xlabel('Frequência (Hz)', 'FontSize', 15)
ylabel('Fase (Graus)', 'FontSize', 15)
axis([0 Fs/2 -200 200])
grid

% H21
figure, subplot(2,1,1), plot(f, squeeze(mag2db(abs(H(2,1,:)))), 'k')
title('Módulo da resposta em frequência do filtro H21', 'FontSize', 15)
xlabel('Frequência (Hz)', 'FontSize', 15)
ylabel('Amplitude (dB)', 'FontSize', 15)
axis ([0 Fs/2 0 45])
grid

```

```

subplot(2,1,2),plot(f,squeeze(radtodeg(angle(H(2,1,:)))), 'k')
title('Resposta em frequência (fase) do filtro H21','FontSize',15)
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',15)
ylabel('Fase (Graus)','FontSize',15)
axis([0 Fs/2 -200 200])
grid

%% Resposta ao impulso
H_time = zeros(2,2,N_fft);

for x = 1:2
    for y=1:2
        H_time(x,y,:) = ifft(squeeze(H(x,y,:)),N_fft,'symmetric');
    end
end

max = size(H_time);
time = linspace(0,max(3)/Fs,max(3));

% H11
figure,subplot(2,2,1),plot(time,squeeze(H_time(1,1,:))', 'k')
title('Resposta ao impulso do filtro H11','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0.33 0.37 -7 17])
grid

% H12
subplot(2,2,2),plot(time,squeeze(H_time(1,2,:))', 'k')
title('Resposta ao impulso do filtro H12','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0.33 0.37 -17 7])
grid

%H22
subplot(2,2,4),plot(time,squeeze(H_time(2,2,:))', 'k')
title('Resposta ao impulso do filtro H22','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0.33 0.37 -7 17])
grid

%H21
subplot(2,2,3),plot(time,squeeze(H_time(2,1,:))', 'k')
title('Resposta ao impulso do filtro H21','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0.33 0.37 -17 7])
grid

```

## Código Para Validação dos Filtros de Cancelamento

```
% Código para validação dos algoritmos de cancelamento de crosstalk
clear all
close all
clc
%% Frequência de Amostragem
Fs = 48000;
%% Velocidade do som no meio (ar)
co = 343; %Velocidade aproximada em m/s
%% Número de Pontos na FFT
N_fft = 2^15;
%% Vetor de Frequências
f = linspace(0,Fs/2,N_fft/2);
w = f.*(2*pi);
%% Constantes
r1 = 1.2;          % Caminho menor
r2 = 1.3;          % Caminho maior
tau = (r2-r1)/co;
g = r1/r2;

%% Simulação da planta (frequência)

C = zeros(2,2,N_fft/2);

C(1,1,:) = (exp((-1i.*w*r1)/(co)))/(4*pi*r1);

C(2,2,:) = C(1,1,:);

C(1,2,:) = squeeze(C(1,1,:)).*(g*(exp(-1i*tau.*w))).';

C(2,1,:) = C(1,2,:);

%% Cálculo dos filtros de cancelamento (matriz H)

% Atraso de modelagem

k = linspace(0,(N_fft/2)-1,(N_fft/2));
delay = exp(-1i*pi.*k);

% Filtros H
H = zeros(2,2,N_fft/2);

for x = 2:N_fft/2
    H(:, :, x) = delay(x)*inv(C(:, :, x));
end
```

```

%% Sinais de Áudio nos dois ouvidos (esquerdo e direito)
Y = zeros(2,2,N_fft/2);

for x=1:N_fft/2
    Y(:, :, x) = C(:, :, x)*H(:, :, x);
end

%% Resposta ao impulso do sinal nos ouvidos
max = N_fft;
time = linspace(0,max/Fs,max);
figure,plot(time,squeeze(ifft((Y(1,1,:) +
Y(1,2,:)),N_fft,'symmetric')),'+')
hold

plot(time,squeeze(ifft((Y(2,2,:) + Y(2,1,:)),N_fft,'symmetric')),'k')
legend('Resposta ao impulso no Ouvido Esquerdo','Resposta ao impulso no
Ouvido Direito','FontSize',15)
title('Resposta temporal ao impulso do sinal nos Ouvidos','FontSize',15)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',15)
ylabel('Amplitude (V)','FontSize',15)
axis([0.34 0.3425 -0.1 1.1])
grid

```