

**CONTROLE ATIVO DE RUÍDO EM DUTOS DE VENTILAÇÃO EM NAVIOS E  
PLATAFORMAS OFFSHORE**

Elisa Moraes Lessa

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Orientadores: Sérgio Lima Netto;  
Luiz Antonio Vaz Pinto.

Aprovada por:

---

Prof. Sérgio Lima Netto, Ph.D.  
(Orientador)

---

Prof. Eduardo A. B. da Silva, Ph.D.

---

Thiago de Moura Prego, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
DEZEMBRO DE 2010

*“A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais voltará ao seu tamanho original.”*

(Albert Einstein)

## Agradecimentos

Ao escrever esta dissertação, indicando o final do curso de Engenharia de Controle e Automação, sinto que tenho muito a quem agradecer, dentro e fora da Universidade. Pessoas sem as quais não teria sido possível concluir minha graduação.

Início agradecendo a minha família que sempre acreditou no meu potencial e que poderia chegar onde eu quisesse. Obrigada pelo apoio.

Agradeço também à minha outra família, aquela que escolhemos durante nossa vida que são nossos amigos. Laura, Thayssa, Elly, Carlinha, Juliana, Vicente, meu primo Luiz, minha prima Marcela, obrigada por cuidarem de mim, obrigada por serem parte da minha vida. Cristiane Almeida e Antonio Luiz Sanfim, vocês são minha estrelas-guia. Obrigada.

Especificamente para este projeto encontrei profissionais brilhantes que me deram todo o suporte necessário para que o trabalho de uma iniciante pudesse seguir em frente. Agradeço a todos os funcionários do LEME que estavam sempre no meu dia-a-dia: Francisco, obrigada por partilhar seus vastos conhecimentos comigo. Hualber, obrigada pela força do todo dia e de tudo o que for possível. Denise, obrigada pelo carinho e dedicação que cuidou de todos os aspectos práticos para que não somente o meu trabalho fosse feito, mas também todos os trabalhos de todos os estudantes que passam pelo LEME. Obrigada D. Carmen pelo carinho. Obrigada Frederico e Ulisses pelas ajudas técnicas. Sarasa, muito obrigada por toda vez que precisei de um auxílio técnico, você estava lá, independente de dia e hora; com alegria e toda boa-vontade do mundo. Severino, obrigada pelo carinho, pelo apadrinhamento, pelas palavras certas nas horas certas.

E finalmente agradeço aos meus dois orientadores.

Professor Sérgio, obrigada por ter aceitado me orientar mesmo nunca tendo dado aula para o Curso de Engenharia de Controle e Automação. Obrigada pelo tempo, paciência, boa-vontade, dedicação. Obrigada por transformar muitos dos meus “dragões em moinhos de vento”. Muito obrigada.

Professor Luiz, obrigada por acolher no Laboratório de Naval uma aluna do curso de Controle e Automação e me dar todos os subsídios necessários para o desenvolvimento do projeto. Obrigada pela atenção, pelo tempo, paciência, carinho. Obrigada por ter me apoiado e me dado força no momento crítico da minha vida pessoal, me incentivando e me colocando para frente. Obrigada por acreditar em mim e me dar espaço. Muito obrigada.

## Resumo

A importância da qualidade de vida de um empregado tem sido muito grande nos últimos tempos. Entre os fatores mais importantes dessa qualidade de vida, principalmente na indústria do petróleo, é a Poluição Sonora.

Nesse projeto foi feito um estudo sobre uma das formas de Controle de Ruído: o Controle Ativo de Ruído (ANC), especializado em dutos de ventilação para unidades *offshore*. Para tanto foi utilizado um duto instalado no Laboratório de Ensaio de Modelo de Engenharia, LEME, da COPPE-UFRJ. Através dele foram retiradas amostras de ruído feito por um motor e o desempenho de diferentes técnicas de ANC foram verificados para estes sinais. Os principais resultados foram obtidos para a linha de estudo de Filtragem Adaptativa utilizando o algoritmo LMS que alcançou uma redução em até 10 dB do nível de ruído para este duto.

PALAVRAS CHAVES: ANC, Controle de Ruído, Processamento de Sinais, Filtragem Adaptativa, Algoritmo LMS.

## **Lista de Símbolos**

**ANC-** *Active Noise Control*

**DC-** *Direct Current*

**DFT-** *Discrete Fourier Transform*

**FFT-** *Fast Fourier Transform*

**HVAC-** *Heating, Ventilation and Air Conditioning*

**LMS-** *Least Mean Square*

**NR-15** – Norma Regularizadora 15

**NR-17-** Norma Regularizadora 17

## Sumário

<b>Capítulo 1- Introdução</b> -----	<b>09</b>
1.1- Motivação -----	<b>09</b>
1.2- Objetivo e Organização do Projeto -----	<b>11</b>
<b>Capítulo 2- Acústica</b> -----	<b>12</b>
2.1- Introdução -----	<b>12</b>
2.2- Equação da Onda -----	<b>12</b>
2.2.1- Distúrbios Acústicos -----	<b>12</b>
2.2.2- Características das Ondas Planas -----	<b>12</b>
2.2.3- Equação de Ondas Planas -----	<b>13</b>
2.3- Controle de Ruídos -----	<b>13</b>
2.3.1- Controle Passivo -----	<b>13</b>
2.3.2- Controle Ativo -----	<b>14</b>
2.4- ANC- Breve Histórico -----	<b>15</b>
2.5- Apresentação do duto do LEME -----	<b>17</b>
Conclusão -----	<b>19</b>

<b>Capítulo 3- Métodos de Supressão de Ruído</b> -----	<b>20</b>
3.1- Introdução -----	<b>20</b>
3.2- Filtragem Digital -----	<b>20</b>
3.2.1- Transformada Discreta de Fourier -----	<b>20</b>
3.2.2- Um exemplo de DFT -----	<b>21</b>
3.2.3- Filtros Digitais -----	<b>22</b>
3.3- Filtragem Adaptativa -----	<b>24</b>
3.3.1- Definições e Características -----	<b>24</b>
3.3.2- Filtro de Wiener -----	<b>25</b>
3.3.3- Método do Gradiente -----	<b>26</b>
3.3.4- Algoritmo Least Mean Square (LMS) -----	<b>28</b>
3.3.5- LMS no Problema de Identificação de Sistemas -----	<b>29</b>
3.3.6- LMS no Problema de Cancelamento de Ruído -----	<b>34</b>
3.3.7- LMS normalizado -----	<b>37</b>
Conclusão -----	<b>37</b>

<b>Capítulo 4- Resultados Experimentais</b> -----	<b>38</b>
4.1- Introdução -----	<b>38</b>
4.2- Aquisição de Dados -----	<b>38</b>
4.3- Análise de Resultados- Experimento 0 -----	<b>41</b>
4.4- Análise de Resultados- Experimento 1 -----	<b>42</b>
4.5- Análise de Resultados- Experimento 2 -----	<b>43</b>
4.6- Análise de Resultados- Experimento 3 -----	<b>43</b>
4.7- Análise de Resultados- Experimento 4 -----	<b>45</b>
4.8- Análise de Resultados- Experimento 5 -----	<b>45</b>
4.9- Análise de Resultados- Experimento 6 -----	<b>51</b>
Conclusão -----	<b>55</b>
<b>Capítulo 5- Conclusão Final</b> -----	<b>56</b>
5.1- Sinopse -----	<b>56</b>
5.2- Trabalhos Futuros-----	<b>57</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> -----	<b>58</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 - Motivação

Atualmente há uma maior preocupação com a qualidade de vida dos seres humanos, que se estende também à área de trabalho das pessoas. Essa qualidade está voltada principalmente a manter saúde e tranquilidade para todos os trabalhadores. É nesse ínterim, por exemplo, que entra a questão da Poluição Sonora. Em um ambiente de trabalho há muitas fontes de ruído sonoro. Em uma unidade *offshore* o problema se agrava pelo espaço relativamente reduzido e com um grande número de equipamentos ruidosos (Pedrosa 2006).

O ouvido humano é capaz de captar sinais acústicos na faixa de 20 a 20.000 Hz e a medida normalmente utilizada é o Nível de Pressão Sonora, dado em decibéis (dB). Sabe-se que a questão do ruído ainda é extremamente subjetiva. Porém pesquisadores utilizam parâmetros físicos para definir a sensação subjetiva. São eles (Bistafa 2006):

- Conteúdo espectral e níveis sonoros associados;
- Complexidade do espectro e a existência de tons puros;
- Duração;
- Tempo de subida de sons impulsivos.

O ouvido humano começa a perceber sons a partir de 0 dB e chega ao limiar da dor em 120 dB. Porém os efeitos de poluição não acontecem somente em níveis de decibéis altos. A exposição continuada a ruídos de determinados níveis também pode causar danos à saúde. Estes danos à saúde são variados e incluem efeitos auditivos e não auditivos.

Os efeitos não auditivos podem ser classificados em fisiológicos e de desempenho (Bistafa, 2006). Entre estes efeitos podemos citar:

- Estresse e tensão;
- Perturbação do sono;
- Perda de concentração;
- Tensões musculares;
- Problemas cardiorrespiratórios;
- Problemas psicológicos.

Os efeitos auditivos são aqueles que causam perda temporária ou permanente de audição. E essas perdas se diferenciam em (Musafir 1999):

- Reflexo Acústico, perdas temporárias causadas por uma reação de defesa do ouvido;
- Perda permanente progressiva, perda devido ao excesso de perdas temporárias a níveis intensos;
- Perda traumática, devido à exposição a um único evento de nível de ruído extremamente intenso e em geral em um tempo relativamente curto.

A Legislação Brasileira de Ruídos tem como objetivo regulamentar para evitar perdas auditivas nos trabalhadores e não considera o conforto. Essa Legislação sobre ruído no ambiente de trabalho está presente na NR-15 (anexos 1 e 2) e NR-17. Na tabela abaixo um resumo com os principais pontos da NR-15 e NR-17:

*Tabela 1.1- Níveis de Ruído permitidos de acordo com a Legislação Brasileira*

<b>Tipo de Ruído/Localização</b>	<b>Nível Máximo Permitido</b>	<b>Tempo de duração</b>	<b>Regra</b>
Ruído Intermitente (qualquer localização)	85 dB(A)	8 h	Para cada aumento de 5 dB(A) reduz o tempo de exposição pela metade.
Ruído Intermitente (atividades envolvendo solicitação intelectual)	65 dB(A)	Independente	-----
Ruído Intermitente (dormitórios)	45 dB(A)	Independente	-----
Ruído Impulsivo (qualquer localização)	140 dB	Impulsivo	-----

Por todos os motivos descritos acima, é de interesse da empresa controlar o Nível de Ruído a que estão expostos seus empregados. Há para isso várias formas de controle, cada uma com suas características e suas principais utilizações.

## **1.2- Objetivo e Organização do Projeto**

O Objetivo deste trabalho é fazer um estudo prático do problema de Controle Ativo de Ruídos (*Active Noise Control- ANC*) em dutos de ventilação, principalmente para unidades OFFSHORE. Para isso é utilizado um duto feito especificamente para este tipo de estudo presente no Laboratório de Ensaios de Modelo de Engenharia, LEME, na COPPE- UFRJ.

Neste contexto, o projeto está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 tem como objetivo explicitar as principais propriedades acústicas de dutos e as formas de controle devido a cada uma delas.

O Capítulo 3 tem como objetivo inicializar o leitor no estudo de Processamento de Sinais, que será de fundamental importância para fazer a análise de ANC no duto.

O Capítulo 4 demonstra as atividades experimentais realizadas a partir de dados do duto e como o estudo do ANC foi evoluindo dentro desse projeto. Também demonstra os principais resultados deste estudo.

O Capítulo 5 faz uma análise final de todo o projeto, ressaltando suas características e contribuições, além de sugerir modos de continuação do estudo do tema.

# Capítulo 2

## Acústica

### 2.1- Introdução

A base teórica para a idéia do Controle Ativo de Ruídos está na Acústica. É através do estudo do som e de suas propriedades que se formou a idéia básica para a construção deste projeto. O objetivo deste capítulo será discutir as bases teóricas para o Controle Ativo.

O capítulo iniciará discutindo as principais características da onda sonora. Logo após serão caracterizadas as principais formas de controle de ruído existentes. Uma breve história das pesquisas na área de Controle Ativo de Ruído virá em seguida e por último será apresentado o duto no qual serão realizados os experimentos.

### 2.2- Equação da Onda

#### 2.2.1- Distúrbios Acústicos

O ruído pode ser considerado um distúrbio acústico e como tal é uma onda mecânica que produz variações de pressão no ar em torno da pressão atmosférica. Em um local aberto, o ruído se propaga em todo o meio, sendo portanto considerado uma onda esférica. No entanto, no caso em estudo, o ruído, dentro do espaço do duto não se propagará em todas as direções. Considerando que este duto tem uma área de seção  $S$  e comprimento  $x$  então o som se propagará na direção de  $x$ .

Distúrbios acústicos nos quais a pressão é uniforme e normal à direção de propagação são chamados de Ondas Planas.

#### 2.2.2- Características das Ondas Planas

Os tipos de ruídos vão variar em torno de alguns elementos físicos. A compressão do ar é feita a uma velocidade constante. Mas a pressão  $p$  e a densidade  $\rho$  vão variar de acordo com algumas características:

- A compressão será considerada isotrópica, ou seja a pressão e a densidade não se modificarão com o aumento da temperatura;
- O aumento da pressão e da densidade em relação aos seus valores iniciais serão considerados pequenos e por esse motivo, essa variação poderá ser considerada linear.

### 2.2.3- Equação de Ondas Planas

Considerando que a velocidade de compressão seja dada por  $c_0$ ; a pressão inicial  $p_0$ ; a densidade inicial  $\rho_0$ ; o espaço percorrido pela onda como  $x$ ; a variação da pressão  $p$  e a variação da densidade  $\rho$ , então a “Equação da Onda” será:

$$\frac{\partial p^2}{\partial x^2} - \frac{\partial \rho^2}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Como dito no item anterior, considera-se uma relação linear entre as variáveis e então pode-se dizer que (Elliott 1992):

$$p = (c_0)^2 * \rho \quad (2)$$

Substituindo estes valores na Equação (1) tem-se:

$$\frac{\partial p^2}{\partial x^2} - \frac{1}{(c_0)^2} * \frac{\partial p^2}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

As equações acima são a base da Acústica de ondas planas e são a partir delas que se baseia todo o conceito de controle ativo de ruído.

## 2.3- Controle de ruídos

Como já discutido anteriormente, ruídos podem causar muitos danos à saúde humana. Por esse motivo, empresas cada vez mais estão preocupadas em controlar ruídos e diminuir os impactos causados por eles em seus empregados.

Para tanto há duas maneiras efetivas de se controlar o ruído. A primeira seria fazer o Controle do Ruído na Fonte. Isto significa tentar diminuir por meios variados o ruído emitido por ela. Lugares com muitos equipamentos podem ser afetados. Motores, engrenagens, mancais são fontes de ruído que podem ser diminuídos até certo ponto no momento de suas produções. Outro ponto é isolar fontes barulhentas. Porém tudo isso pode ser bastante precário e ao mesmo tempo caro.

A segunda solução seria o controle durante a transmissão do som. Para este tipo de controle tem-se dois subtipos: Controle Passivo e Controle Ativo de Ruído.

### 2.3.1- Controle Passivo

O controle passivo utiliza materiais que absorvem o som. Os materiais absorventes possuem alta resistência ao fluxo de ar, fazendo com que, por atrito, se perca grande parte da energia sonora.

Dentre esses materiais temos os fibrosos (lã de vidro, por exemplo) e os porosos (espumas de poliuretano, por exemplo).

A absorção sonora de uma superfície  $A_{sup}$  é dada por:

$$A_{sup} = \alpha * S \quad (4)$$

Onde  $S$  é a área da superfície com o material absorvente, em  $m^2$  e  $\alpha$  é o coeficiente de absorção sonora de um determinado material.

Para qualquer material absorvente,  $\alpha$  cresce à medida que a frequência cresce (Bistafa 2006). Assim, para uma mesma  $A_{sup}$ ,  $S$  cresce consideravelmente à medida que diminui-se a frequência. Em certo ponto o Controle Passivo então se torna inviável pelo tamanho da superfície exigida. Para efeitos de consideração abaixo de 500Hz o Controle Passivo torna-se inviável. (Pedrosa 2006). Abaixo desta frequência o indicado é o Controle Ativo de Ruído.

### 2.3.2- Controle Ativo

O Controle Ativo de Ruído (ANC) é baseado em um princípio da física: “O Princípio de Superposição de Ondas”:

*“Se duas formas de onda atingem um ponto “X” qualquer, ao mesmo tempo, a perturbação causada por estas duas ondas será a soma das perturbações individuais de cada uma”.*

No caso em estudo, considerando que duas ondas atinjam o mesmo local ao mesmo tempo, tendo mesma amplitude e defasadas de  $180^\circ$ , então o resultado será o silêncio, conforme o esquema abaixo.

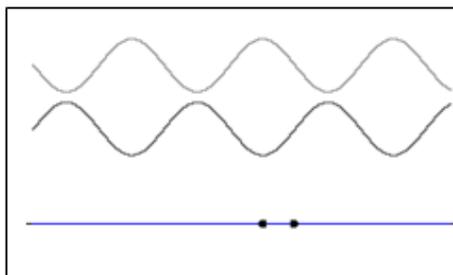


Figura 2.1 Ilustração do Princípio de Superposição de Ondas

É importante ressaltar neste ponto que o esquema apresentado na figura 2.1 é apenas um esquema básico, especificado para um tom puro. Mas ao chegar ao problema real, o ruído é um conjunto de frequências e amplitudes, tornando o Controle Ativo mais complexo e necessitando envolver outras áreas de conhecimento, como o Processamento de Sinais.

## 2.4- ANC- Breve Histórico

A idéia do ANC surgiu em 1936, com o físico alemão Paul Lueg que patenteou o projeto. (Patentstorm.us 2008)

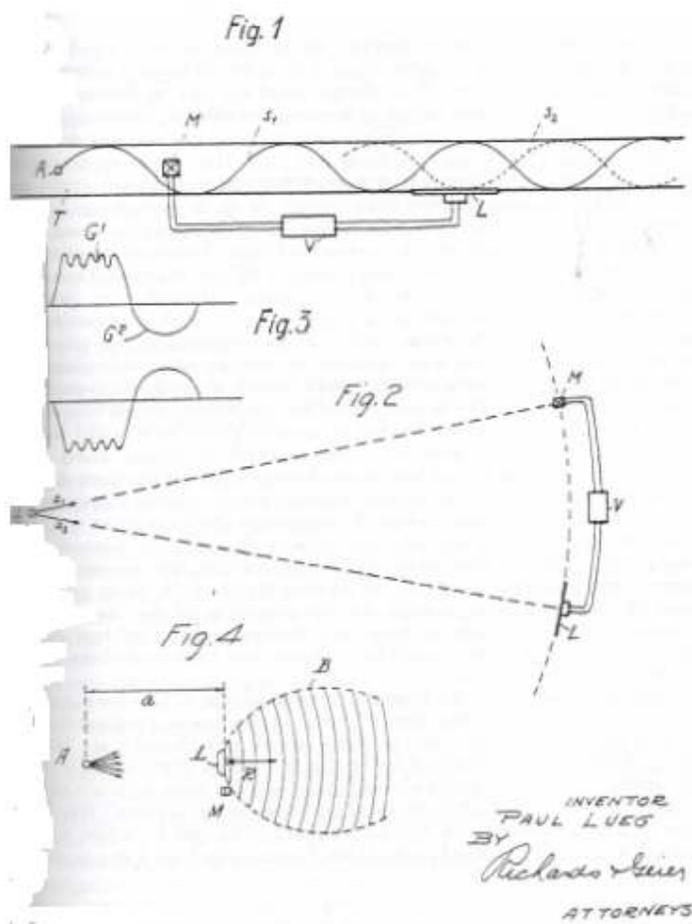


Figura 2.2- Figura da Patente de Paul Lueg, 1936.

O esquema acima mostra um microfone “M” captando a onda sonora que vai para um controlador elétrico que cria uma interferência destrutiva e a envia para um alto-falante. Nesse esquema, “V” seria interpretado como representação da função de transferência necessária para o funcionamento correto. Em 1936 não havia sido desenvolvido a eletrônica capaz de realizar com satisfação o esquema desenhado por Lueg. Hoje em dia, este desenho é totalmente aplicável.

Em 1953, Olson e May propuseram a idéia de dispor o alto-falante próximo ao microfone e os dois próximos ao receptor. Eles utilizaram um amplificador inversor de alto ganho. O conceito de “realimentação” é utilizado. O sinal do ruído é realimentado e passa pelo controlador que neste caso é o amplificador inversor. Olson e May também encontraram dificuldades devido à tecnologia da

época. A idéia inicial era sugerida para diminuir o ruído para automóveis ou aeronaves (Nascimento 2007). Hoje essa idéia é utilizada para pilotos de aeronaves, principalmente.

Em 1956, William Conover utiliza um sistema de ANC para transformadores de potência. É a primeira vez que para um controle ativo são utilizados dois sensores: um para capturar o sinal de referência e outro para monitorar o erro, de forma a ajustar o controlador, que altera ganho e fase manualmente, necessitando sempre de ajustes.

Devido à precariedade dos sistemas eletrônicos da época, somente na década de 1970 experiências mais efetivas puderam ser feitas. Esses avanços foram reforçados na década de 80 com a viabilidade comercial dos projetos. A área de Processamento Digital de Sinais também contribuiu muito para essa ferramenta. Muitos algoritmos foram sugeridos, entre eles o LMS que será usado neste trabalho.

Inicialmente o LMS foi criado para cancelamento de ecos em sistemas de telecomunicações. O algoritmo LMS foi utilizado pela primeira vez em um sistema ANC em 1981 por Burger. Burger demonstrou que se dentro de um duto somente ondas planas se propagam, então o ANC em dutos HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) pode ser resolvido.

Em 2000, Romeu pesquisa o Controle Ativo de Ruído em dutos e comprova que, desde a entrada até a saída, as ondas sonoras dentro do duto são ondas planas. Ele também avalia os efeitos de um controle realimentado em um sistema como este e a maneira com que isso poderia ser aplicado no mundo real (Romeu 2000). Para isso ele utilizou um duto reto com paredes rígidas e um auto-falante que gerasse as frequências desejadas (Pedrosa 2006).

Em 2003 WONG estuda o caso de redução de ruídos em dutos de prédios através de um sistema híbrido, onde ele utiliza tanto o controle ativo como o passivo. Além disso ele experimenta a utilização de sensores infravermelhos ao invés de microfones para captar o sinal de referência. Ele verifica que com o infravermelho a redução é mais efetiva e ele consegue uma redução de 5dB (Wong 2003).

Em 2005 é publicado o livro “Active Noise Control” de dois pesquisadores: Nelson e Elliott. O livro é resultado de um longo período de estudo sobre controle de ruídos (Nelson & Elliott 1993). Suas pesquisas englobam controle ativo, passivo, híbrido tanto em dutos como em espaços abertos. O trabalho destes dois pesquisadores é referência mundial para todos que trabalham com este tema atualmente.

Atualmente há muitos pesquisadores investigando o assunto e fazendo experimentos, que por diversas vezes precisam ser melhorados, mas que são avanços graças à tecnologia atual. Entre esses pode-se citar os argentinos Nieto e Cosseau que trabalharam com os principais aspectos da

implementação real do problema de controle ativo em dutos (Cosseau s.d.); Celis & Lopez que trabalharam na simulação de controle híbrido com sistema realimentado (Celiz & Lopez 2009) e Fernando Pedrosa que fez sua tese de mestrado estudando o ANC para dutos de ventilação com aplicação na área naval (Pedrosa 2006).

## 2.5 – Apresentação do duto do LEME

Para verificar na prática o comportamento do ANC em dutos de ventilação, foi montado no “Laboratório de Ensaio de Modelo de Engenharia” (LEME)- COPPEE-UFRJ um duto para simulação de dutos reais. Em toda a teoria vista anteriormente, as experiências foram feitas em dutos retos. No duto do LEME, para que os resultados cheguem mais perto do real, o duto construído possui descidas, subidas, curvas, assim como em um sistema real. Abaixo duas imagens do duto: A primeira mostra a entrada do ruído gerado através de um motor e o segundo mostra com mais detalhes suas partes divididas.



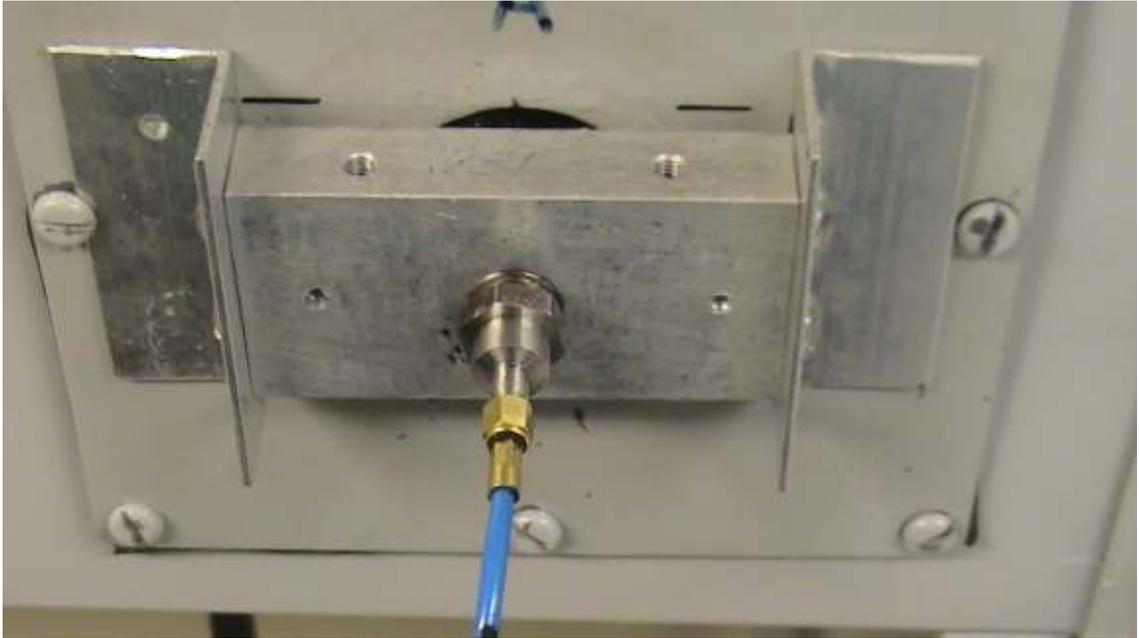
*Figura 2.3 – Entrada do duto com o motor que gera o ruído.*



*Figura 2.4- Duto e suas divisões.*

Cada parte do duto tem uma seção reta de área de  $8\text{ cm} \times 10\text{ cm} = 80\text{cm}^2$ , e o comprimento varia de acordo com cada parte. Na imagem da *Figura 2.4* por exemplo, a parte reta à direita tem 33,5 cm e a descida possui 44 cm.

Em cada uma destas partes encontram-se aberturas para posicionar o microfone e o alto-falante. Para evitar o surgimento de frequências indesejadas no estudo, originadas pelo contato do microfone com a parede do duto, causando vibrações que seriam inseridas junto com a parte acústica; foi feito um suporte para que o microfone ficasse isolado. O resultado final está na *Figura 2.5*:



*Figura 2.5- Arranjo do microfone na estrutura do duto.*

## **Conclusão**

A idéia do ANC é antiga e se baseia na teoria acústica da “Equação da Onda Plana” e do “Princípio de Superposição de Ondas Sonoras”. Embora sejam princípios simples, qualquer ruído é uma onda com variadas frequências em níveis diferentes. No caso para que o Controle Ativo dê resultados efetivos necessita de alta tecnologia para processar o ruído. Por isso, a idéia só pôde ser efetivamente pesquisada nas últimas décadas com o surgimento de novas técnicas e barateamento dos elementos. O duto presente no LEME é capaz de simular pela sua estrutura o que ocorre em dutos reais.

## Capítulo 3

### Métodos de Supressão de Ruído

#### 3.1- Introdução

Este Capítulo tem como objetivo descrever técnicas de processamento digital de sinais e verificar uma solução para o problema descrito no Capítulo 2: o Controle Ativo de Ruído (ANC) em dutos.

Métodos de Supressão de Ruído são técnicas utilizadas para que, dado um determinado sinal consiga-se separar a informação desejada do ruído presente no sinal original. Há várias famílias de técnicas utilizadas para a supressão do ruído, seguindo o avanço da eletrônica e do campo de processamento digital de sinais.

Este Capítulo inicia comentando sobre a Filtragem Digital, abordando a Transformada Discreta de Fourier e Filtros. Em seguida o assunto será a Filtragem Adaptativa. Será tratado sobre suas características e áreas de atuação. Dentro da Filtragem Adaptativa será demonstrado o Filtro de Wiener, o Método do Gradiente e o Algoritmo LMS. Ao falar do LMS serão demonstradas duas de suas aplicações: identificação de sistemas e cancelamento de ruído. Para finalizar haverá uma breve descrição do algoritmo LMS normalizado.

#### 3.2- Filtragem Digital

##### 3.2.1- Transformada Discreta de Fourier

A Transformada de Fourier é utilizada para sinais contínuos. Porém, com as facilidades advindas dos computadores, atualmente o trabalho é feito através de sinais discretos. Para tanto se utiliza a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform - DFT*). Utiliza-se a mesma equação da Transformada de Fourier, porém a frequência  $\omega$  é amostrada uniformemente. O sinal na DFT é decomposto em uma soma de senos e cossenos que de acordo com a taxa amostrada, terá ao final  $N$  amostras.

Portanto dado um sinal  $\mathbf{h}(\mathbf{n})$  sua DFT é dada por:

$$\mathbf{H}(\mathbf{n}) = \sum_{\mathbf{n}=0}^{\mathbf{N}-1} \mathbf{h}(\mathbf{n}) e^{-i\frac{2\pi}{\mathbf{N}}\mathbf{k}\mathbf{n}} \quad (1)$$

Em termos computacionais a DFT não é prática pois exige um grande esforço computacional. Foram criados então algoritmos que pudessem fazer o cálculo da transformada de forma mais eficiente. O

principal algoritmo é chamado de Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) e é utilizado na maior parte dos programas de matemática como o Matlab, LabView, Mathcad, etc.

### 3.2.2- Um exemplo de DFT

Considere um sinal expressado pela seguinte equação:

$$x = \sin(2 * \pi * 50 * t) + \sin(2 * \pi * 100 * t) - 2 * \sin(2 * \pi * 180 * t) \quad (2)$$

Onde  $t = 0:0.001:0.5$ . Isto corresponde a um intervalo de 0.5 s amostradas a uma taxa de 1000 amostras por segundo.

Utilizando o Matlab podemos plotar o sinal da equação (2):

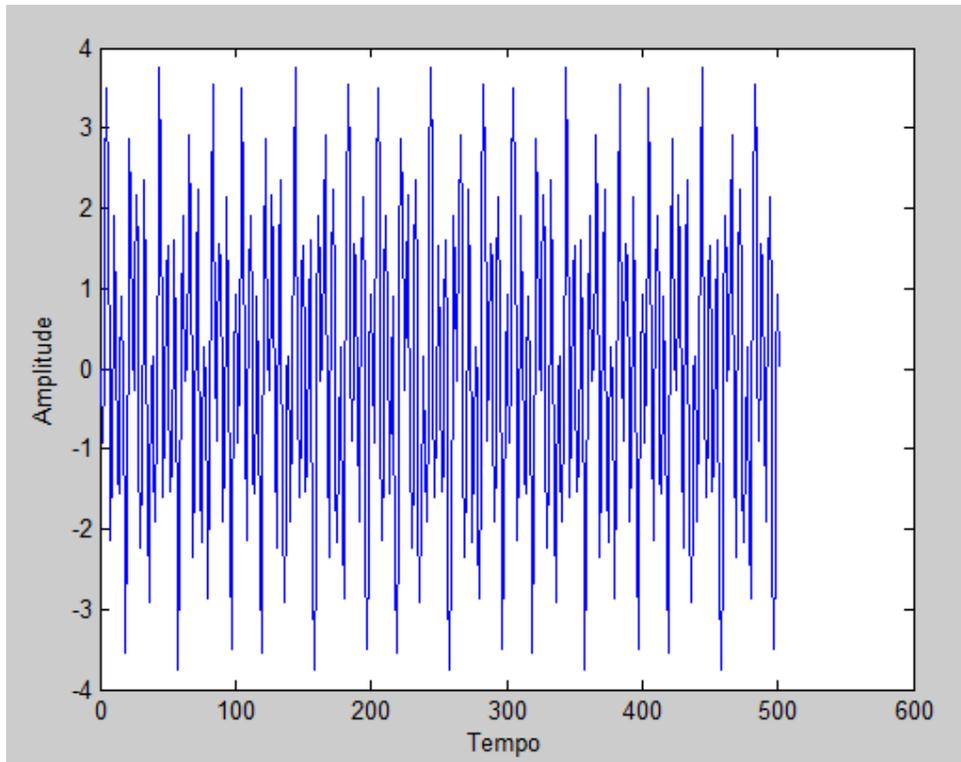


Figura 3.1- Gráfico do sinal  $x$  no domínio do tempo.

Desta figura, é difícil perceber as três componentes senoidais de forma separada. Para encontrar as frequências, deve-se calcular a DFT.

Observa-se o resultado na *Figura 3.2*:

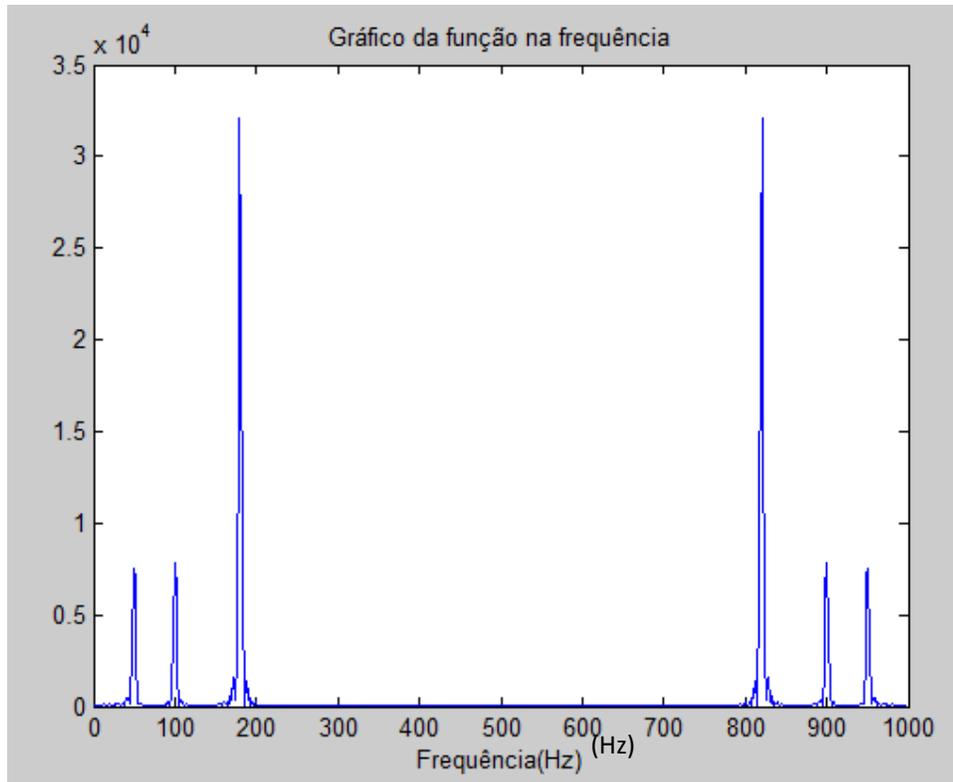


Figura 3.2- Gráfico FFT do sinal  $x$ .

Deste gráfico pode-se aferir quais as frequências presentes no sinal e o quanto cada uma delas influi para o resultado geral.

Com o exemplo dado, pode-se perceber que um sinal qualquer pode ser tratado tanto no domínio do tempo quanto na frequência. Em cada domínio aparecem características diferentes que poderão ser utilizadas para chegar ao objetivo procurado ao manipular um determinado sinal de interesse.

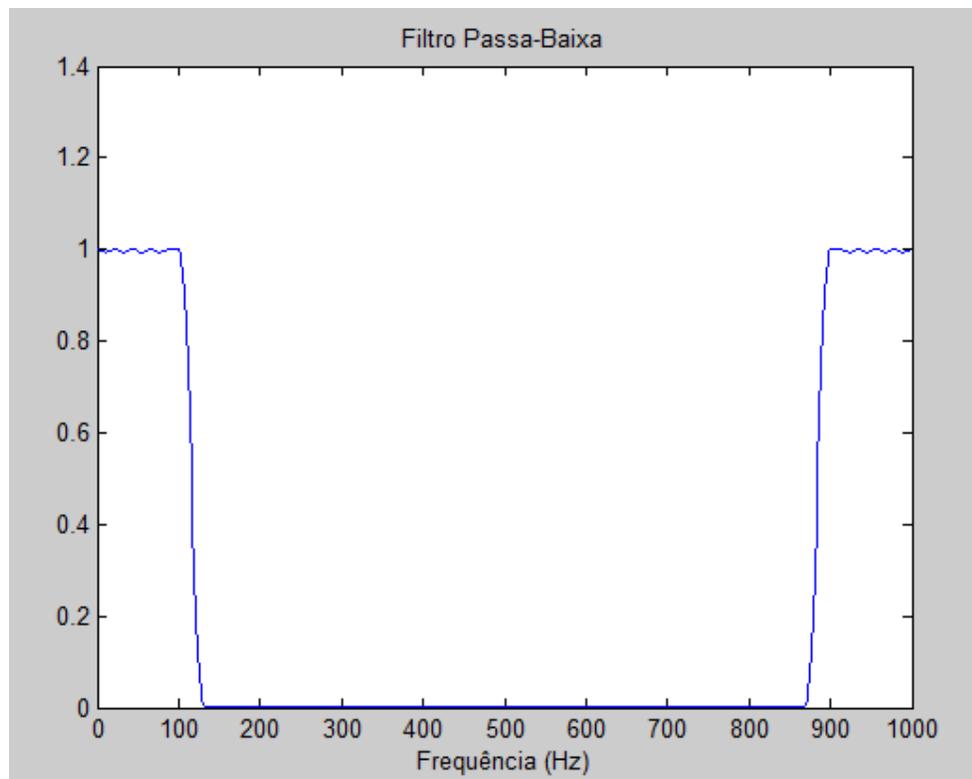
### 3.2.3- Filtros Digitais

Um filtro digital nada mais é que um elemento digital que irá processar um determinado sinal. Um filtro digital opera recebendo como entrada uma seqüência de números para produzir em sua saída outra seqüência de números (N. & Elliott 1992). Há muitas vantagens em se utilizar filtros digitais. Entre essas vantagens estão (N. & Elliott 1992):

- Flexibilidade;
- Adaptabilidade;
- Precisão;
- Estabilidade;
- Baixo custo.

Por todas estas vantagens filtros digitais são largamente utilizados em várias áreas hoje em dia como em processamento de sons, de imagens, sistemas multimídia, sistemas de telecomunicações, etc.

Há vários tipos de filtro: passa-baixas, passa-faixas, passa-altas, Wiener entre outros. Para exemplificar, considere novamente o sinal da equação (2). Com este sinal será feito um filtro passa-baixas. Neste filtro serão eliminadas as frequências acima de 120 Hz. A resposta em magnitude do filtro é mostrada na *Figura 3.3*. O espectro de saída do filtro para o sinal da equação (2) é visto na *Figura 3.4*, onde se observa que a componente de 180 Hz foi efetivamente eliminada.



*Figura 3.3- Gráfico do Filtro Passa-Baixa com corte em 120 Hz.*

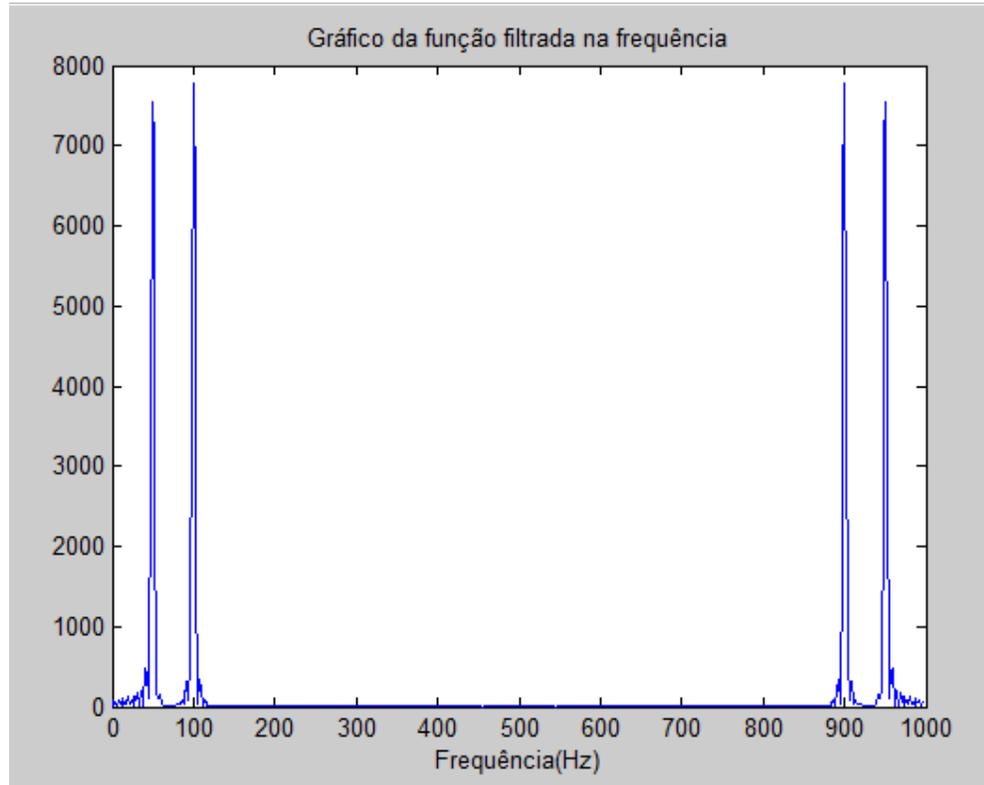


Figura 3.4- Gráfico da Função no domínio da frequência após passar pelo filtro “H”.

### 3.3- Filtragem Adaptativa

#### 3.3.1- Definições e Características

Um sistema adaptativo é aquele que se altera e se ajusta automaticamente para otimizar seu desempenho. Ele possui algumas características importantes, como as que seguem abaixo (Widrow e Stearns 1985):

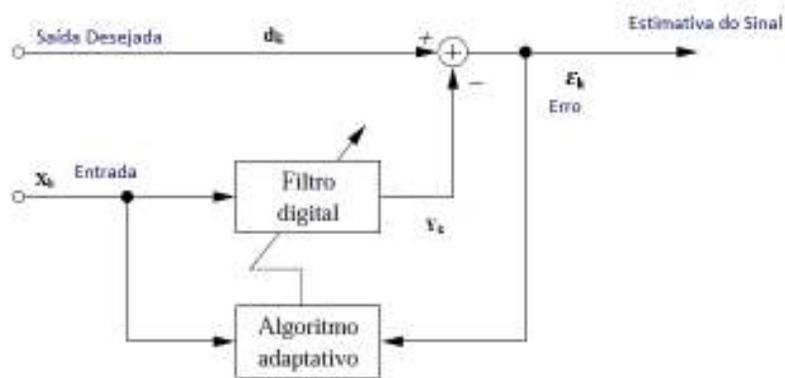
- Eles se adaptam automaticamente, a partir do momento em que o meio do sistema se modifica ou alguma de suas propriedades;
- Exatamente por se adaptarem automaticamente, os sistemas não necessitam de um procedimento muito elaborado em sua síntese;
- Eles podem ser expostos a situações que antes não foram identificadas;
- Até certa extensão, eles são capazes de reparar a si mesmos;
- Os sistemas que requerem filtragem adaptativa em geral são mais complexos de se analisar, além disso, outros métodos de menor complexidade não trariam resultados tão satisfatórios.

Entre todas estas características, há uma propriedade essencial dos sistemas adaptativos: “Todos os sistemas adaptativos são variantes no tempo e possuem auto-ajuste”.

Com os recentes progressos na área da eletrônica e micro-circuitos, a filtragem adaptativa tem sido cada vez mais empregada. Desde a década de oitenta, há aplicações na área de comunicações, radar, sonar, mecânica, eletrônicos biomédicos entre outras (Widrow e Stearns 1985).

Há muitas formas de aplicar a técnica de filtragem adaptativa. Ela pode ser utilizada para identificação de sistemas, cancelamento de ruídos, filtragem adaptativa em sistemas de comunicações digitais entre outras coisas.

O esquema básico de um sistema adaptativo está caracterizado na *Figura 3.10* abaixo. Existe um sinal que se deseja ter ao final do processo e o sinal  $X_k$  que se tem na entrada e que irá ser manipulado.  $X_k$  passa pelo algoritmo adaptativo que cria um resultado. Este resultado é comparado com a saída desejada. O erro entre a saída e o resultado após passar pelo filtro é realimentado para que o algoritmo adaptativo possa ser melhorado e chegar o mais rápido possível ao erro zero.



*Figura 3.4- Esquema geral de um Sistema Adaptativo.*

### 3.3.2- Filtro de Wiener

Filtro de Wiener é um tipo de filtro adaptativo que tem por objetivo minimizar o erro quadrático médio entre o sinal de saída desejado e o sinal de entrada.

Considerando  $X_k$  como o sinal de entrada,  $Y_k$  a saída do filtro,  $\epsilon_k$  o erro,  $W_k$  os pesos para ajuste e  $d_k$  o sinal de saída desejado tem-se:

$$Y_k = W_k^T X_k \quad (3)$$

$$\epsilon_k = d_k - Y_k = d_k - W_k^T X_k \quad (4)$$

O erro quadrático médio é dado por:

$$\mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}_k^2] = \mathbf{E}[\mathbf{d}_k^2] - \mathbf{W}^T \mathbf{E}[\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T] \mathbf{W} - 2\mathbf{E}[\mathbf{d}_k \mathbf{X}_k^T] \mathbf{W} \quad (5)$$

Considerando  $\boldsymbol{\varepsilon}$ ,  $\mathbf{d}$  e  $\mathbf{X}$  como estatisticamente estacionários, pode-se considerar que  $\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T$  é a matriz de auto-correlação da entrada e que a partir desse instante será substituída por  $\mathbf{R}$ . E,  $\mathbf{d}_k \mathbf{X}_k^T$  é a matriz de correlação cruzada entre o sinal desejado e o sinal de entrada e será substituída por  $\mathbf{P}$ . Levando estas matrizes em consideração, o erro quadrático médio pode ser expresso por:

$$\mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}_k^2] = \mathbf{E}[\mathbf{d}_k^2] - \mathbf{W}^T \mathbf{R} \mathbf{W} - 2\mathbf{P} \mathbf{W} \quad (6)$$

Para minimizar o erro acima, o gradiente da função em relação a  $\mathbf{W}$  deverá ser nulo. Então derivando a equação (7) e igualando a zero, seguiremos as seguintes etapas:

$$\frac{\partial \mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}_k^2]}{\partial \mathbf{W}} = 2\mathbf{R} \mathbf{W} - 2\mathbf{P} = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\Rightarrow 2\mathbf{R} \mathbf{W}^* = 2\mathbf{P} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \mathbf{W}^* = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P} \quad (9)$$

Através da lógica das equações acima foi possível encontrar  $\mathbf{W}^*$ , que são os parâmetros ótimos de ajustes. Portanto a equação (10) é a solução do problema de Wiener. O Filtro de Wiener é muito importante neste estudo pois ele é a base para o algoritmo que mais tarde será apresentado para o cancelamento de ruído.

### 3.3.3- Método do Gradiente

Para o estudo do Filtro de Wiener feito acima, chega-se a um resultado em que a inversa de uma matriz precisa ser calculada, que pode requerer uma grande complexidade computacional.

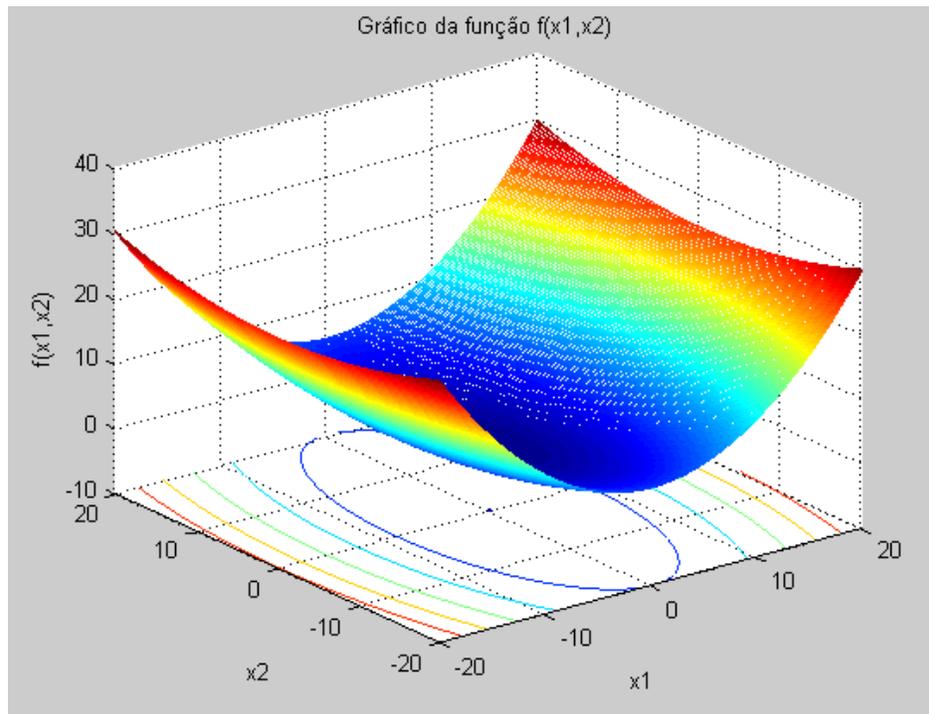
Para contornar este problema surgem os métodos de otimização, entre eles o Método do Gradiente (*Steepest Descent*). O método do gradiente é um método iterativo, que encontra o mínimo de funções seguindo a direção do vetor negativo do gradiente da função diferenciável em questão (Gomes 2008), isto é

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \boldsymbol{\mu}(-\nabla)_k \quad (10)$$

Onde  $\boldsymbol{\mu}$  controla o comprimento do passo que vai em direção à descida.

Para dar a idéia da importância de um método como o do Gradiente para solucionar um problema, considere a equação abaixo onde a função depende de duas variáveis e cujo gráfico é mostrado na *Figura 3.11*.

$$f(x_1, x_2) = \frac{x_1^2}{16} + \frac{x_2^2}{81} - \frac{x_1}{64} \quad (11)$$



*Figura 3.5- Gráfico de  $f(x_1, x_2)$ .*

Utilizando o Método do Gradiente, o mínimo desta função é determinado de forma iterativa como ilustrado na *Figura 3.12*. Saindo de um valor inicial que no gráfico é representado pela *\*(-18,15)*, passa por outros pontos representados pelos “*x*” até chegar ao ponto mínimo representado por *\*(-0.175327181898211, -0.00000046046959)*.

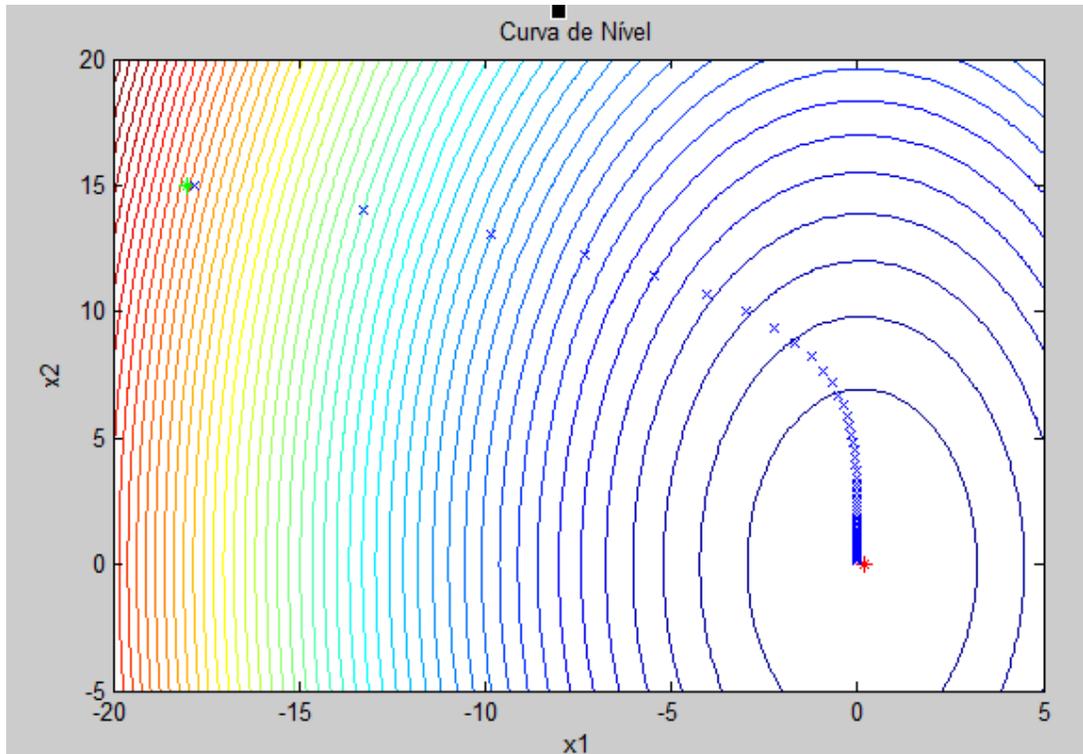


Figura 3.6- Curva de Nível da função com pontos encontrados pelo Método do Gradiente.

### 3.3.4- Algoritmo Least- Mean- Square (LMS)

Ao estudar o Filtro de Wiener foi possível estabelecer uma maneira de encontrarmos os parâmetros desejados para qualquer filtro em estudo. Ele se baseia no erro quadrático médio e ao final foi observado que um bom processo de convergência é obtido com o Método do Gradiente, que é um método simples e de fácil implementação.

Em 1956, Dr. Bernard Widrow terminava sua tese de doutorado (MIT) na área de “Quantização de ruído na área de processamento digital”. No início dos anos 60, Widrow criou o algoritmo LMS, que é utilizado até hoje para diversas áreas (Widrow 2005). O algoritmo LMS simplifica o cálculo do gradiente, utilizando o erro instantâneo dado por:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \mathbf{d}_k - \mathbf{Y}_k = \mathbf{d}_k - \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k \quad (12)$$

No LMS considera-se o  $\boldsymbol{\varepsilon}_k^2$  como uma estimativa para  $E[\boldsymbol{\varepsilon}_k^2]$ , de modo que:

$$\Rightarrow \boldsymbol{\varepsilon}_k^2 = (\mathbf{d}_k - \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k)^2 \quad (13)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_k^2}{\partial \mathbf{W}} = -2 * \boldsymbol{\varepsilon}_k * \mathbf{X}_k \quad (14)$$

Dando origem ao algoritmo LMS descrito por:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2\mu^* \boldsymbol{\varepsilon}_k * \mathbf{X}_k \quad (15)$$

### 3.3.5- LMS no Problema de Identificação de Sistemas

O problema de identificação de sistemas ocorre quando se tem um sistema físico real em que se desconhece seu mecanismo interno. São os chamados sistemas “caixa- preta”. Ao utilizar o LMS cria-se um sistema adaptativo que vai se tornar um modelo do sistema físico real. A Figura 3.14 demonstra o processo: um sinal é aplicado à planta real e ao sistema que com a minimização do erro vai se adaptando até se tornar um modelo fiel da planta.

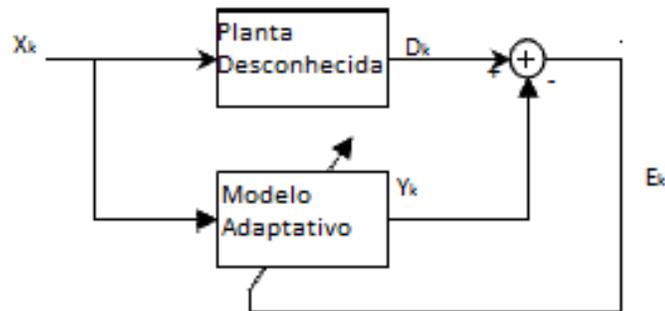


Figura 3.7- Esquema básico de Identificação de Sistemas.

Foi feito um teste para testar a eficácia do algoritmo LMS no contexto de identificação de sistemas. Neste caso, ao invés de o sistema ser uma “caixa preta” será um sistema identificado, com resposta ao impulso  $W = [1.8 \ 4.5 \ 3 \ 3.8 \ 1 \ 1 \ 0 \ 9 \ 4.2]$ , coeficiente de convergência ( $\mu$ ) de 0.03. A convergência resultante é vista nas Figura 3.15 (coeficientes do filtro adaptativo) e Figura 3.16 (erro instantâneo):

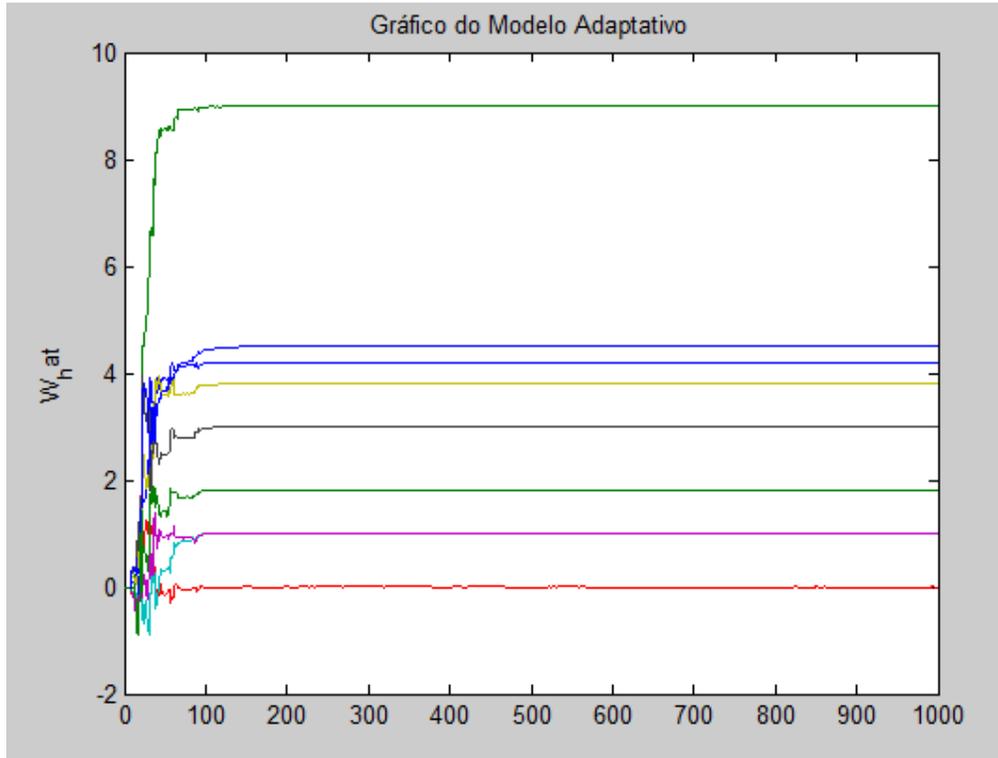


Figura 3.8- Gráfico do Modelo Adaptativo para  $\mu=0.03$ .

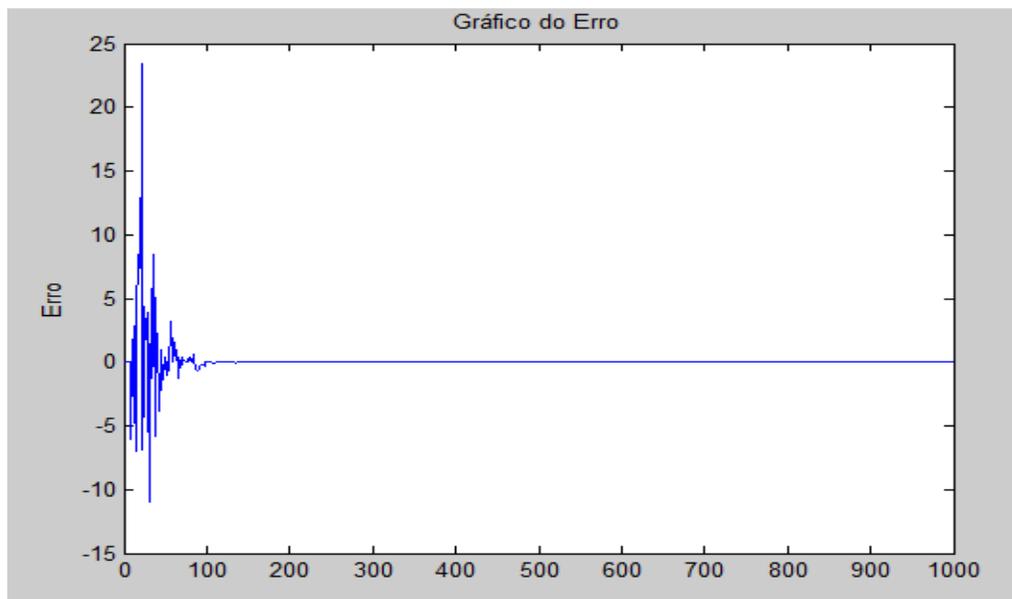


Figura 3.9- Gráfico do Erro para o filtro  $W$  especificado para exemplo para  $\mu=0.03$ .

A partir das Figuras 3.15 e 3.16 pode-se perceber que o sistema chega ao resultado esperado. O Algoritmo consegue identificar corretamente a planta, depois de um pequeno período transitório.

Neste momento é interessante ressaltar que os resultados acima dependem de diversas variáveis. Um dos fatores mais importantes está no coeficiente de convergência. Dependendo de seu

valor, o transitório será maior ou menor e poderá ou não atingir o valor do filtro esperado. Para testar a variação a partir de  $\mu$ , considere o mesmo sistema real hipotético, porém agora com  $\mu = 0.005$ . O resultado encontrado é mostrado nas *Figuras 3.17 e 3.18*:

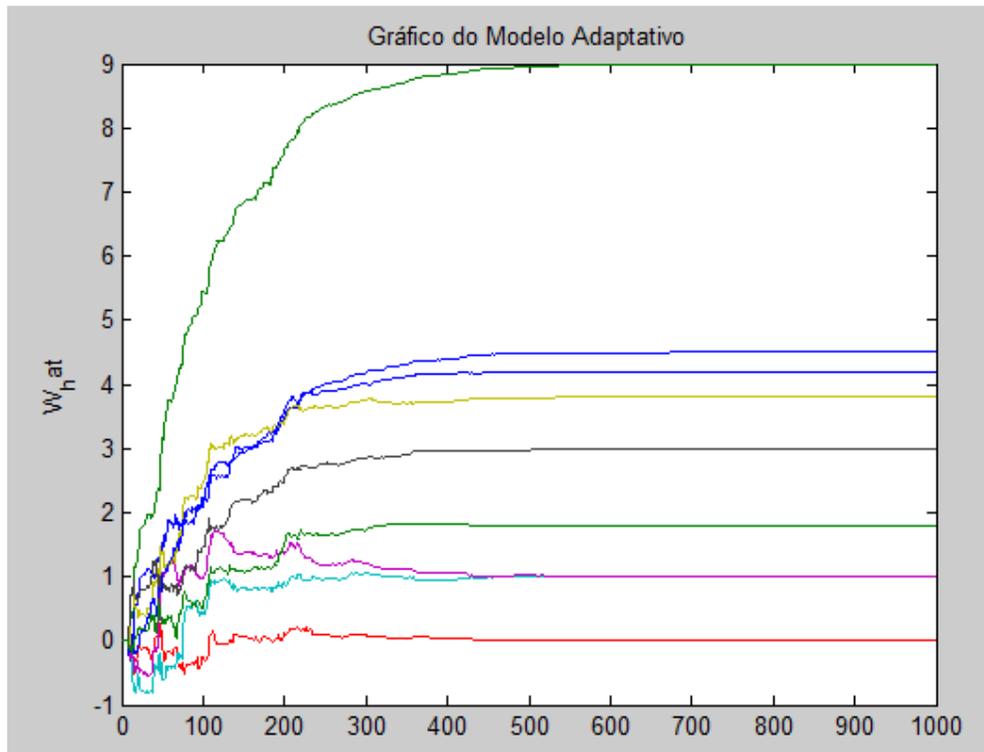


Figura 3.10- Gráfico do Modelo Adaptativo para  $\mu = 0.005$ .

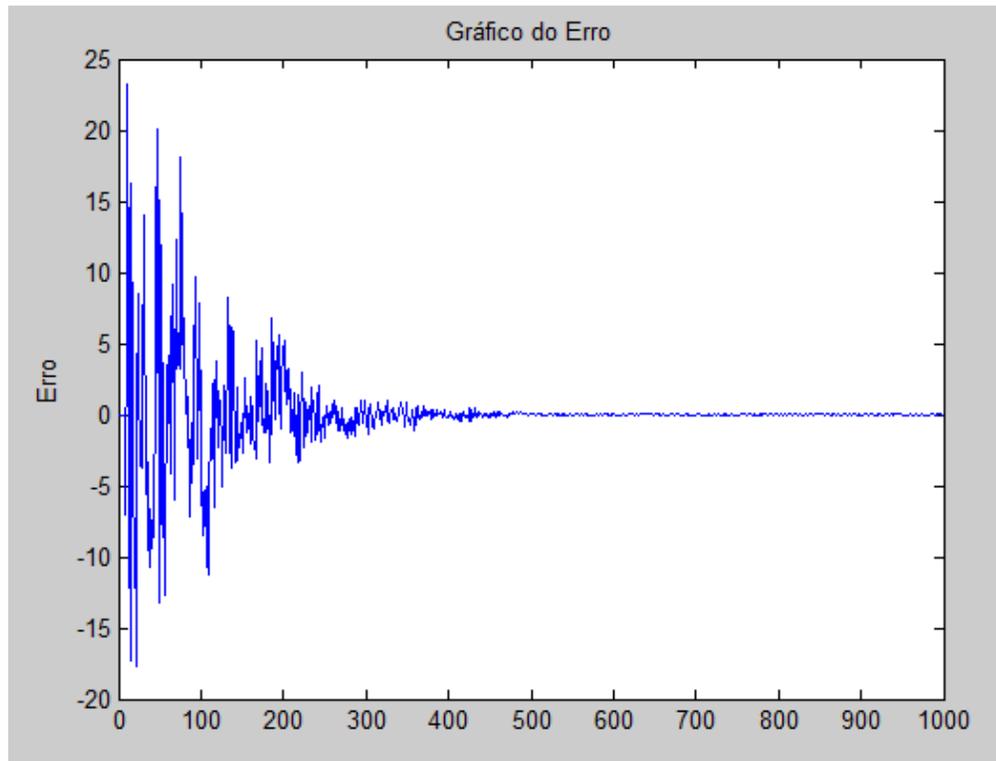


Figura 3.11- Gráfico do Erro para o filtro  $W$  especificado para exemplo com  $\mu=0.005$ .

Das Figuras 3.17 e 3.18 pode-se perceber que o algoritmo chegou ao resultado esperado. Porém neste caso o transitório foi maior e o filtro demorou mais tempo para se estabilizar.

Agora se considera um  $\mu=0.1$ , que é maior que aquele primeiro de 0.03. Os resultados estão nas Figuras 3.19 e 3.20:

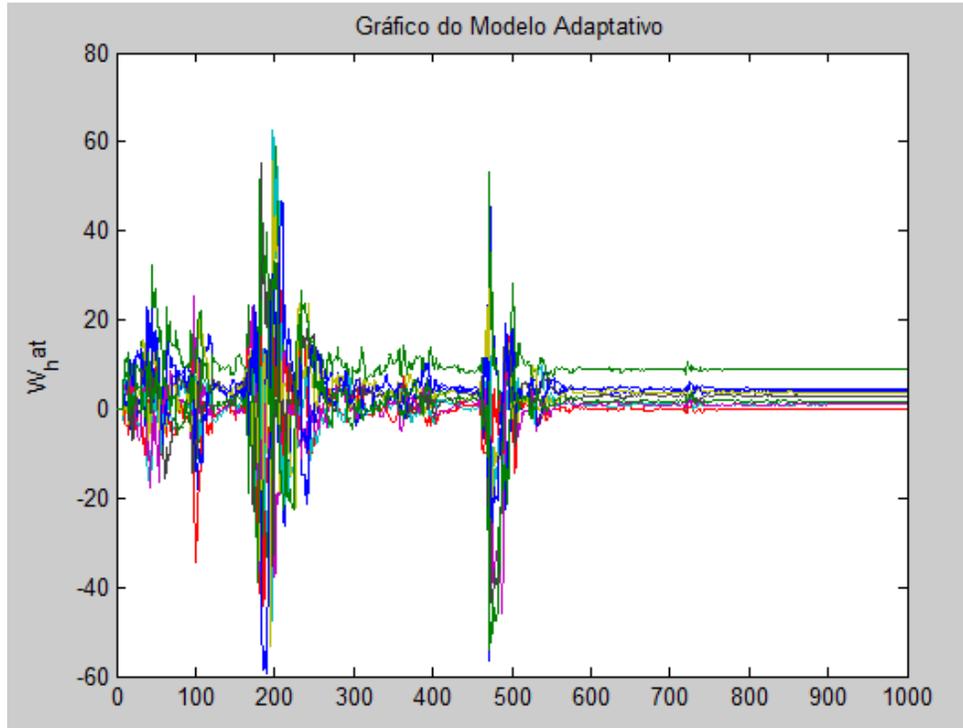


Figura 3.12 - Gráfico do Modelo Adaptativo para  $\mu = 0.1$ .

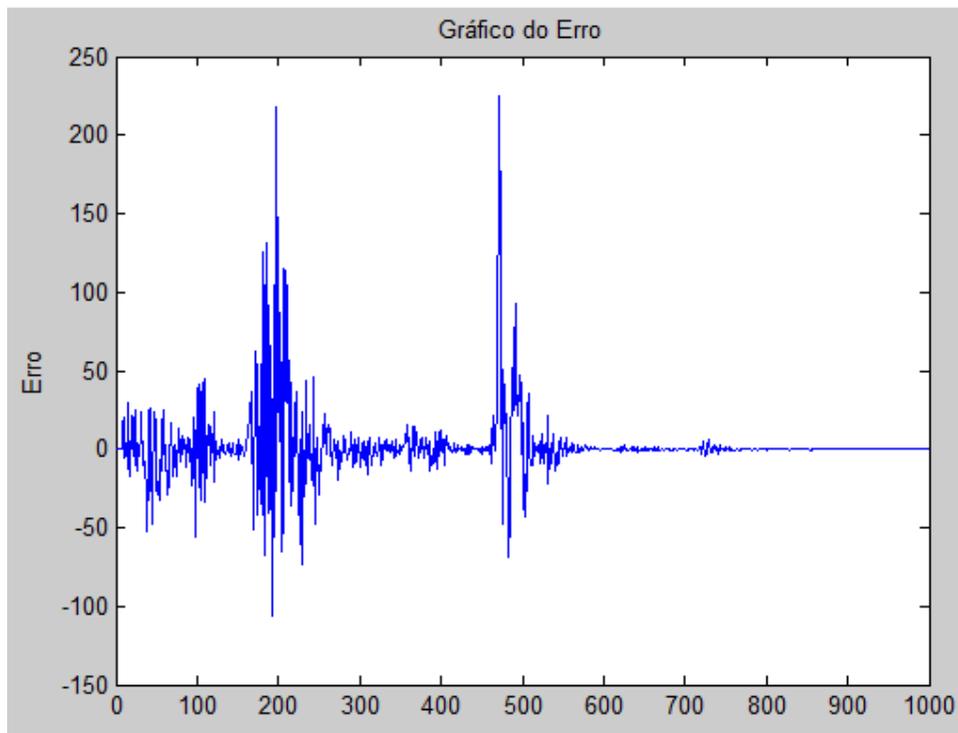


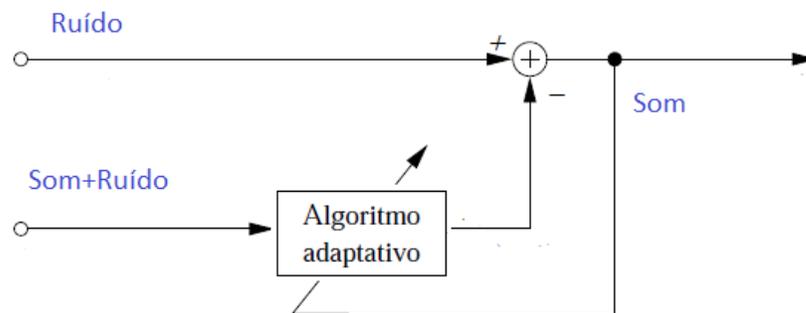
Figura 3.14- Gráfico do Erro para o filtro  $W$  especificado para exemplo com  $\mu=0.1$ .

Das Figuras 3.12 e 3.14 pode-se verificar que o sistema oscilou em busca do mínimo.

Com os resultados gerados para os três diferentes valores do fator de convergência chega-se a conclusão que quanto menor este valor mais lento é o processo de convergência. Porém há um limite máximo para este valor, que vai depender do sistema que está sendo trabalhado.

### 3.3.6- LMS no Problema de Cancelamento de Ruído

Outra utilização do LMS é em cancelamento de ruído, foco central deste projeto. Neste caso, tem-se um sinal sonoro qualquer que se deseja obter sem um ruído de fundo, como por exemplo o som de um motor. Para isso, conhecendo o sinal de ruído pode se chegar ao sinal desejado através de um filtro adaptativo. O esquema básico se encontra na *Figura 3.21*:



*Figura 3.15 – Esquema do Sistema Adaptativo para cancelamento de ruído.*

Para cada objetivo diferente de utilização do LMS, tem-se um esquema adaptativo diferente. Isto pode ser comprovado observando a *Figura 3.14* com o esquema para identificação de planta e a *Figura 3.21* com o esquema para cancelamento de ruído. Com estas pequenas diferenças, a base do programa feito em Matlab é a mesma, porém com pequenas modificações.

Para testar o LMS no cancelamento de ruído foi realizado um experimento básico. Foi gravado um pequeno arquivo de áudio com ruído e logo em seguida outro com apenas o ruído. O objetivo era retirar do primeiro arquivo de áudio o ruído e deixar o som limpo.

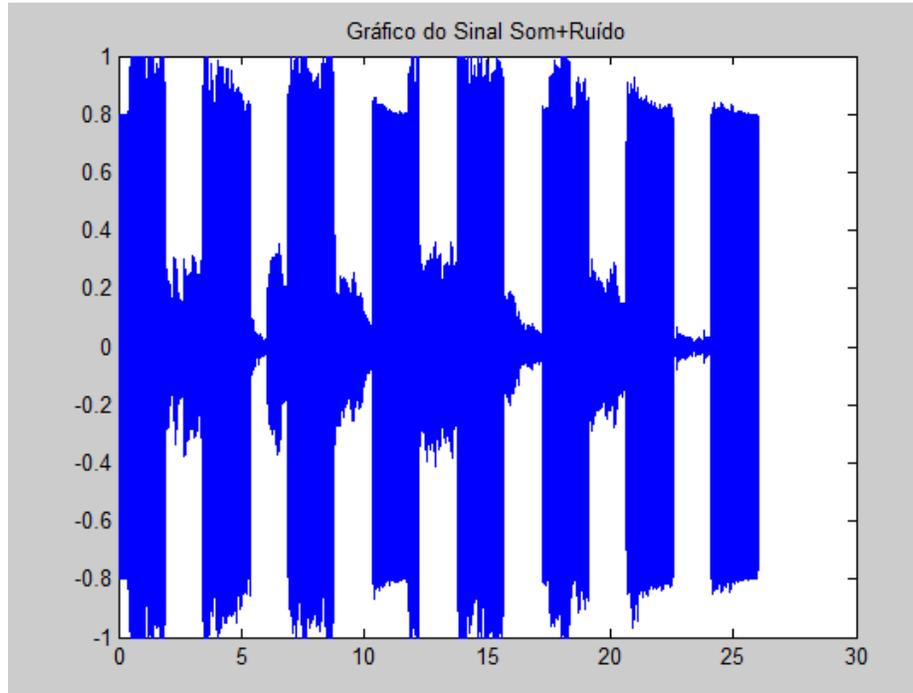


Figura 3.16- Gráfico do Som +Ruído.

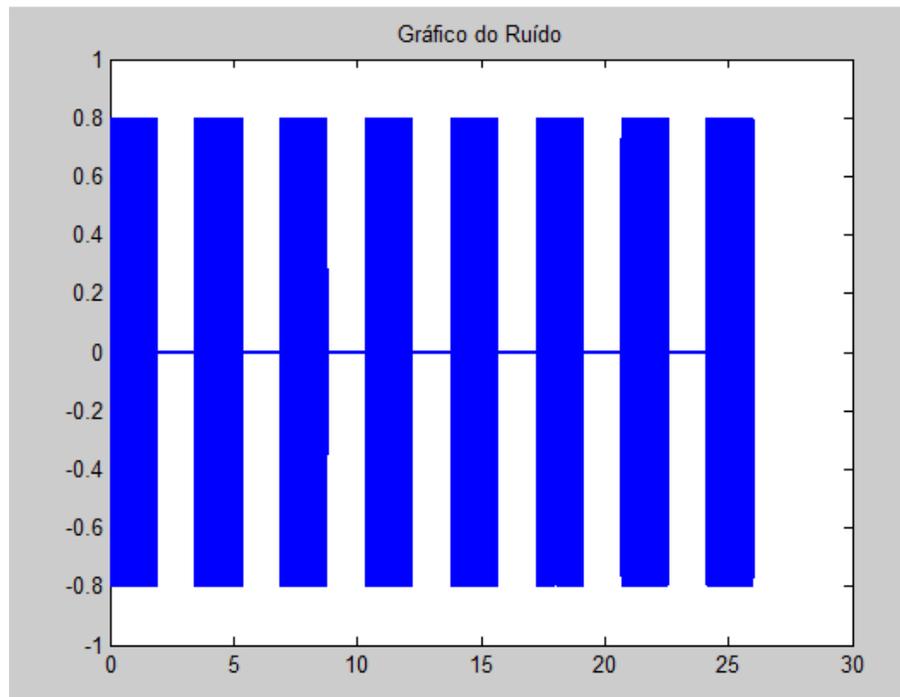
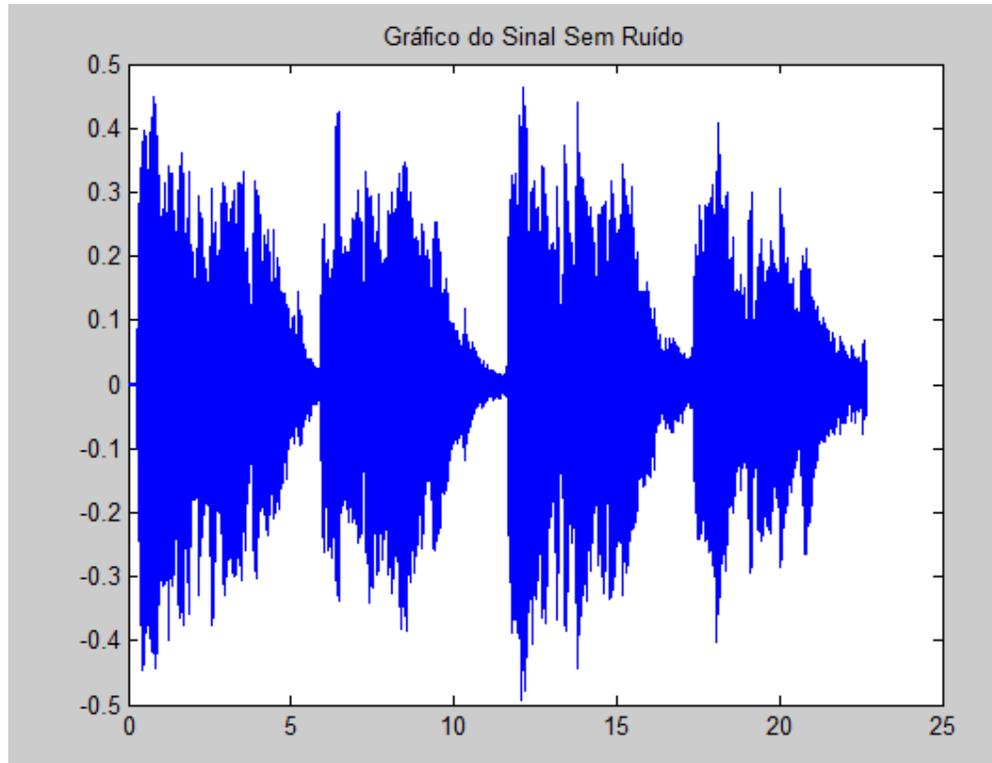


Figura 3.17- Gráfico do Ruído.

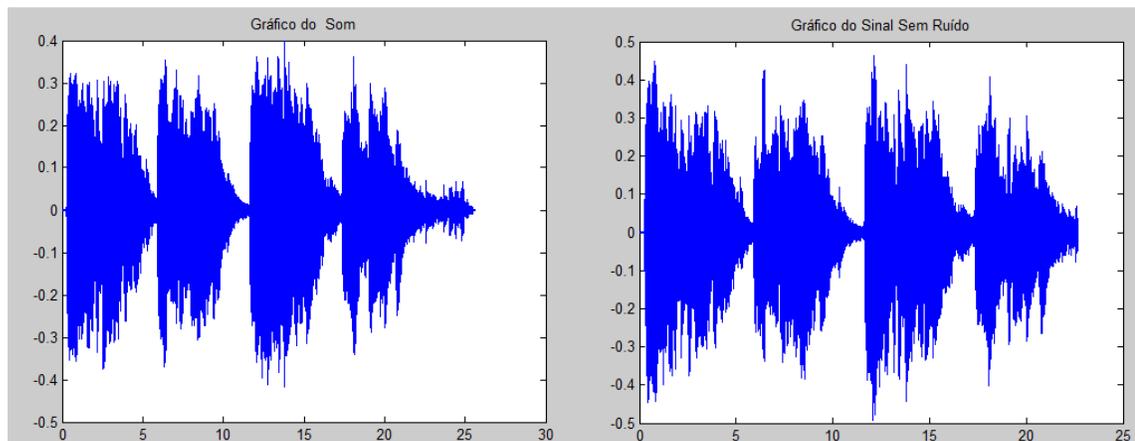
As Figuras 3.16 e 3.17 mostram graficamente a gravação do som+ruído e o outro somente do ruído. Agora utilizando os arquivos de som referentes aos dois gráficos acima em um programa de cancelamento de ruído de LMS com:

- Ordem desejada do filtro= 2;
- Coeficiente de Convergência  $\mu= 0.05$

O resultado está graficamente demonstrado na *Figura 3.24*. Já na *Figura 3.25*, o gráfico do LMS está novamente plotado juntamente com o gráfico do som original sem ruído. Esta comparação deixa claro que o LMS foi capaz de retirar o ruído do sinal:



*Figura 3.18- Gráfico do Som sem Ruído após passar pelo LMS.*



*Figura 3.19- Comparação de Gráficos.*

### 3.3.7- LMS Normalizado

Inicialmente neste trabalho, a variável  $\mu$  que controla o comprimento do passo foi encontrada através do processo tentativa e erro. Havendo necessidade de aumentar a velocidade de convergência aumentava-se o  $\mu$  e isto poderia causar um erro residual maior.

A idéia do LMS normalizado é basicamente utilizar os dados para regulação e ajuste de  $\mu$ . Para tanto criou-se uma variável  $\alpha$ . Esta variável está definida no intervalo  $0 \leq \alpha \leq 2$ . E  $\mu$  passa a ser:

$$\mu = \frac{\alpha}{\epsilon + X' * X} \quad (16)$$

Onde  $\epsilon$  seja um número pequeno somente para não deixar a expressão se tornar infinita caso  $X' * X = 0$ .

O LMS normalizado será utilizado no Capítulo 4 para definir a melhor ordem de filtro e otimizar resultados.

### Conclusão

A área de processamento digital de sinais é uma área vasta e com grandes aplicações. Especificamente falando da filtragem adaptativa, ela é uma ferramenta importante, que pode ser utilizada em vários aspectos tais como cancelamento de ruído, identificação de sistemas, entre muitas outras utilidades.

O LMS é um algoritmo de fácil aplicação com um resultado efetivo nesta área. Pelos exemplos teóricos desenvolvidos acima, acredita-se que seja um ótimo caminho para desenvolver o problema de cancelamento de ruído no duto físico real.

# Capítulo 4

## Resultados Experimentais

### 4.1- Introdução

Este capítulo tem como objetivo analisar *OFF-LINE* os dados obtidos diretamente do duto do Leme e realizar diversos experimentos para verificar qual a solução mais viável e de melhor resposta.

Inicialmente será explicado como foram adquiridos os dados que serão estudados em todo este capítulo. Em seguida será demonstrada a importância de retirar o nível DC dos dados antes de ser feita qualquer análise.

Logo em seguida serão retratados 5 experimentos realizados com os dados: somente defasando 180°, normalizando o erro, verificando o atraso, analisando o atraso junto com a normalização do erro e finalmente utilizando o LMS normalizado. Após é feita uma análise de todos estes experimentos.

### 4.2- Aquisições de Dados

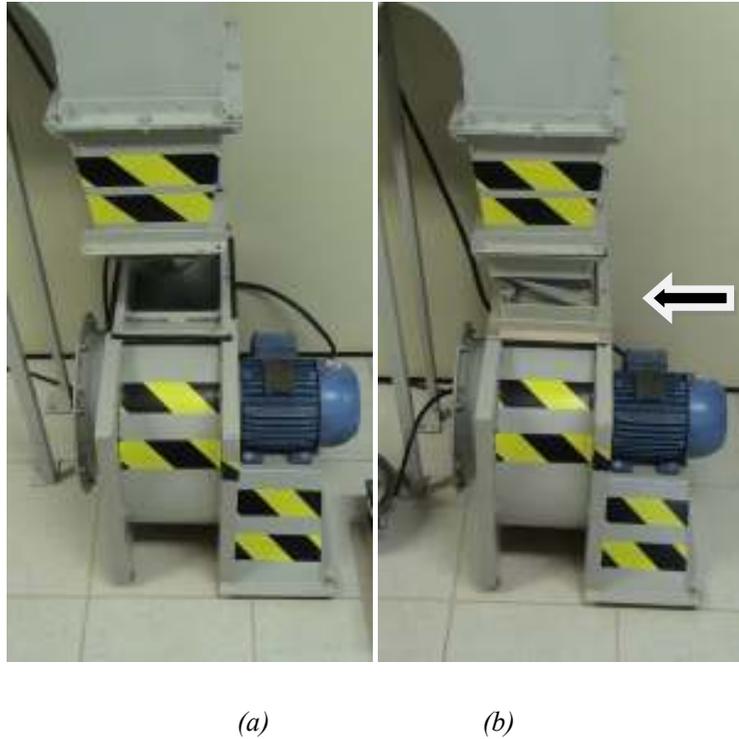
Nesta primeira fase da parte prática do trabalho foram feitas medições para avaliar *OFF-LINE* o desempenho do duto. Para isso foram tomados dados em três posições distintas do duto. Em cada posição foram feitas várias medições com sinais diferentes, originárias de um gerador de função e do próprio motor. A entrada foi lida e a saída também para que depois os dados pudessem ser analisados. No momento da medição foi fechada a porta do subsolo onde se encontra o duto e desligada qualquer fonte de ruído (como ar condicionado), para não haver qualquer interferência externa.

Todos os dados foram coletados com a mesma taxa de amostragem, 10.000 amostras/s. Em todas as medições foram utilizados os seguintes equipamentos:

Tabela 4.1- Instrumentos utilizados para captar dados no duto do Leme.

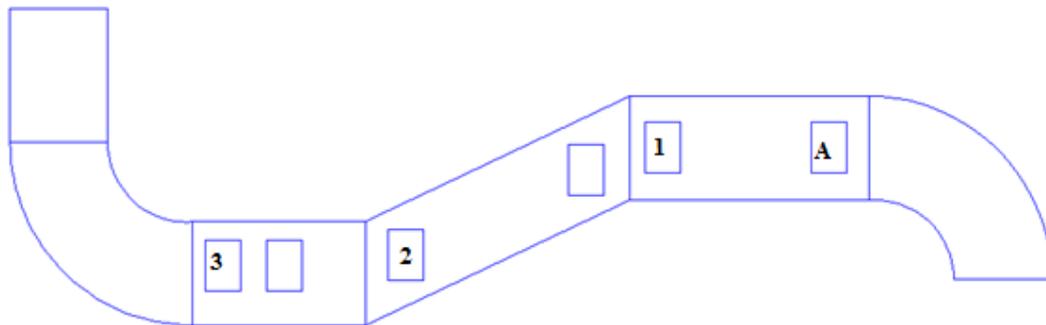
<b>Equipamento</b>	<b>Especificações</b>
<b>Microfone A</b>	U106B SN10231 Volt-Sens 297.7 mV/psi 43.18 mV/KPa
<b>Microfone B</b>	106B SN 10478 Volt-Sens 274.8mV/psi 39.85mV/KPa
<b>Motor de Indução</b>	Modelo TSS 250 Vazão- 2000m <sup>3</sup> PE 15mmCA CV- 220V 2.51A 1.15RPM
<b>Amplificador</b>	High System Power Amplifier AB-100 R4
<b>Placa National Instruments</b>	NI 9233 4-Ch +-5V- 24bits IEPE Analog Input +-2V AI- to Earth Ground $-40^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 70^{\circ}\text{C}$

O motor foi inserido de duas maneiras no sistema: a primeira, que será chamada de motor1 o motor somente foi ligado próximo à entrada do duto. A segunda posição será chamada de motor2 e teve um acoplamento para que a máxima energia fosse jogada para dentro do duto. As duas maneiras estão na Figura 4.1 abaixo:



*Figura 4.1- As duas formas de acoplamento do motor: (a) motor1 e (b) motor2.*

Cada tipo de amostra coletada foi repetida para três posições diferentes no duto. Para facilitar no momento da análise de cada posição foi feito um esquema básico do duto, apenas para entendimento de onde estão os microfones A e B. O microfone A corresponderá sempre a entrada e o microfone B a referência, que será modificada de acordo com o trecho estudado do duto. Na Figura 4.2 estão representadas as 3 posições estudadas:



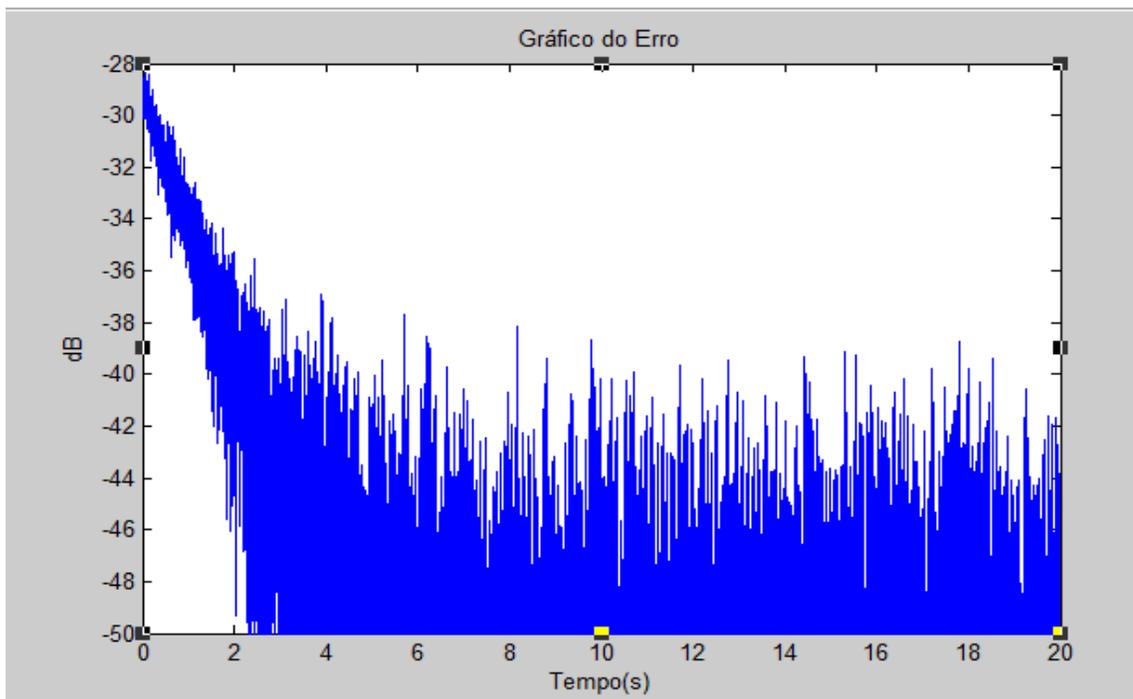
*Figura 4.2- Esquema básico do duto do Leme para as posições do microfone B: 1, 2 e 3.*

Estas 3 posições com as duas formas de acoplamento foram estudadas da seguinte maneira:

- **Caso 1:** motor1/ posição1
- **Caso2:** motor1/posição 2
- **Caso3:** motor1/posição3
- **Caso4:** motor2/posição1
- **Caso5:** motor2/posição2
- **Caso6:** motor2/posição3

#### 4.3- Análise de Resultados- Experimento 0

Inicialmente foi feita a análise com o LMS. E dependendo do valor de  $\mu$  e da Ordem do Filtro aparentemente conseguia-se resultados consideráveis, com diferenças na faixa de 20 dB. Um exemplo é mostrado na *Figura 4.3*:



*Figura 4.3- Erro entre a saída do filtro e o valor de referência (motor1).  $\mu = 0.001$   $OF = 50$ .*

*Diferença  $\cong 20$  dB*

Porém ao ouvir o sinal de erro, não era encontrada nenhuma redução efetiva. Uma análise de energia foi feita para verificar a discrepância entre o gráfico e o resultado real. O resultado da análise demonstrou que a redução vista no gráfico era simplesmente a redução do nível DC. E a redução do nível DC não causa efeitos práticos. Retirando o nível DC inicialmente e mantendo as mesmas

condições não se verifica redução alguma. Portanto, para todos os experimentos abaixo o nível DC foi retirado.

#### 4.4- Análise de Resultados- Experimento 1

No Capítulo 2, foi explicado o motivo pelo qual não se pode utilizar simplesmente o Princípio de Superposição de Ondas no caso de controle ativo de ruído. Agora, neste experimento, exatamente isso é feito: o sinal  $X_k$  é defasado  $180^\circ$  e depois somado à referência. O resultado desta soma será chamado de **erro**. Abaixo um diagrama do experimento:

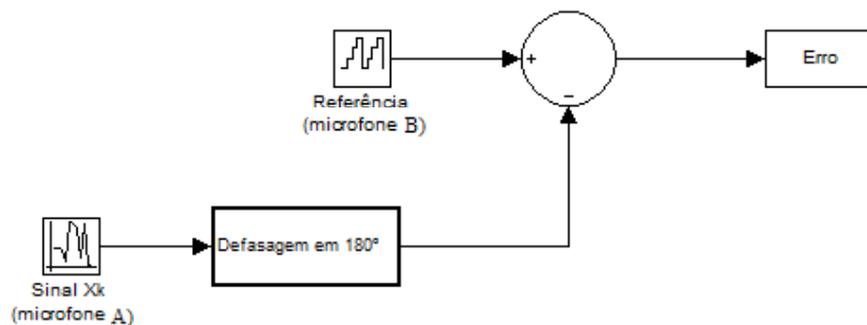


Figura 4.4- Esquema do Experimento 1.

Para verificar o resultado deste e de todos os próximos experimentos, foi comparada a energia das últimas 10000 amostras entre o resultado conseguido no experimento e o microfone de referência. O resultado encontrado para o experimento foi:

Tabela 4.2- Resultados do experimento 1 para 4 casos.

Energia	Caso3	Caso6	Caso2	Caso5
Referência	-55.79297 dB	-55.6658 dB	-53.1885 dB	-55.9786 dB
Erro	-49.9041 dB	-51.5595 dB	-48.7760 dB	-52.7365 dB

Pela análise da tabela acima se verifica que em todos os casos a energia do sistema não diminui, pelo contrário, ela aumenta. Portanto, independente da amostra ou da posição de referência somente defasar  $180^\circ$  não é a solução para o problema de ANC.

#### 4.5- Análise de Resultados- Experimento 2

Mantendo a idéia somente da defasagem, agora utilizaremos a normalização do erro. Para isso antes de somar à referência  $X_k$  é normalizado:

$$X_{k\text{norm}} = X_k * \frac{\sqrt{Dvar}}{\sqrt{Xvar}} \quad (1)$$

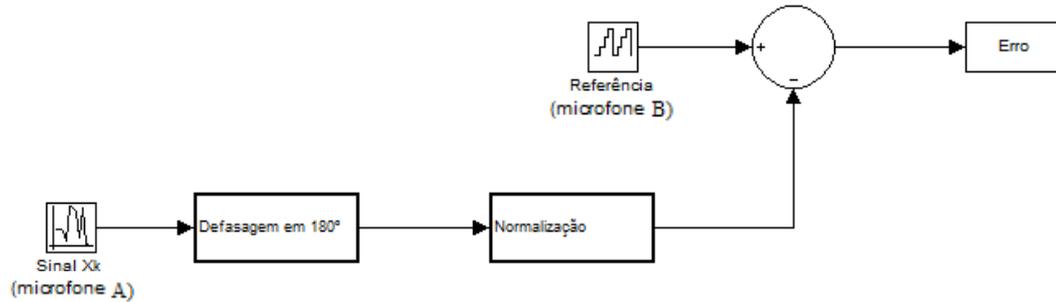


Figura 4.5- Esquema do Experimento 2.

Tabela 4.3- Resultados do experimento 2 para 4 casos.

Energia	Caso3	Caso6	Caso2	Caso5
Referência	-55.79297 dB	-55.6658 dB	-53.1885 dB	-55.9786 dB
Erro	-55.8152 dB	-51.4804 dB	-48.9428 dB	-52.6912 dB

Comparando os resultados, assim como no experimento 1 a energia do erro deu maior que a energia da referência. Porém, comparados a energia dos erros na experiência 2 com os da experiência 1 verifica-se uma redução de energia. Destes 4 exemplos verifica-se que a normalização é um caminho que pode ser utilizado, embora não consiga bons resultados quando somente se defasa 180°.

#### 4.6- Análise de Resultados- Experimento 3

Até o presente momento, foram feitas experiências sem levar em consideração que há um atraso entre os sinais de entrada e de referência. Este atraso pode ser eliminado já neste momento. Para isso é utilizada a correlação entre os dois sinais (entrada e saída) cujo pico indica o atraso. Na Figura 4.5 estão os gráficos da correlação indicando o pico para os **casos 2 e 4**:

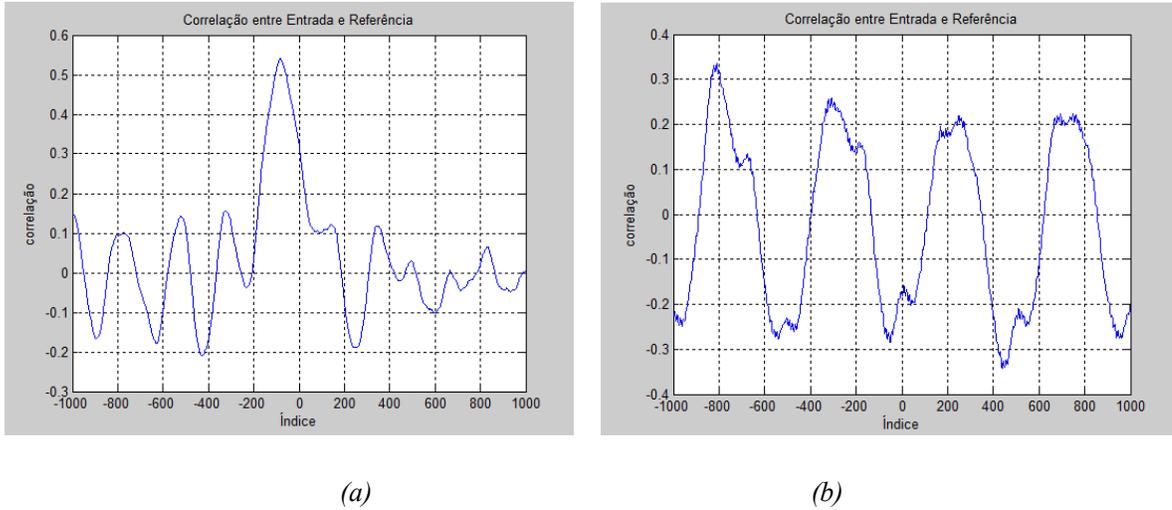


Figura 4.6- Gráficos da correlação entre Entrada e Referência para (a) Caso2 (b)Caso4

O experimento é demonstrado abaixo:

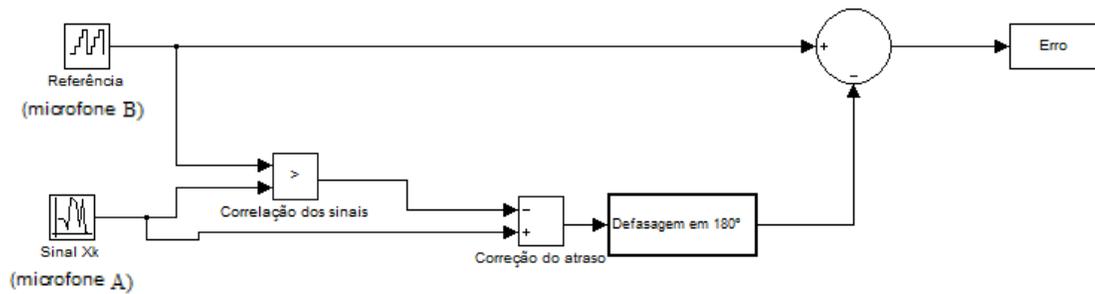


Figura 4.7- Esquema do Experimento3

Tabela 4.4- Resultado do atraso para 5 casos.

	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5
<b>Atraso (amostras)</b>	0	-84	-164	-810	-337

Com estes valores de atraso chegou-se aos seguintes resultados:

Tabela 4.5- Resultados do experimento 3 para 5 casos.

Energia	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5
Referência	-48.6061 dB	-53.1885 dB	-55.7927 dB	-42.8126 dB	-55.978 dB
Erro	-47.8886 dB	-51.8731 dB	-54.0998 dB	-39.3869 dB	-53.242 dB

Pela tabela 4.5 percebe-se que a energia do erro é maior que a da referência em todos os casos. Ao acertar o atraso e somente defasar  $180^\circ$  não trouxe resultados efetivos ao problema. Somente comparado ao experimento 1 pode-se ver uma pequena melhora.

#### 4.7- Análise de Resultados- Experimento 4

Neste experimento será feita a análise de energia considerando os dois fatores trabalhados nos últimos 2 experimentos: normalização e atraso.:

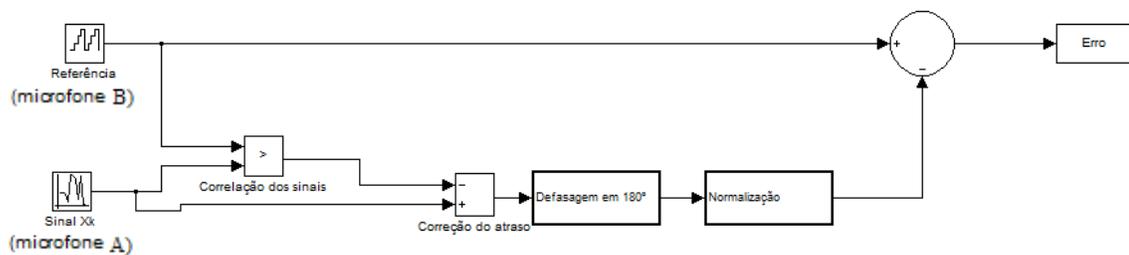


Figura 4.8- Esquema do Experimento4

Tabela 4.6- Resultados do experimento 4 para 5 casos.

Energia	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5
Referência	-48.6061 dB	-53.1885 dB	-55.7927 dB	-42.8126 dB	-55.978 dB
Erro	-49.0328 dB	-53.3816 dB	-53.9108 dB	-42.6622 dB	-54.708 dB

De todos os experimentos até o presente momento, este foi o único que para algumas amostras resultou em redução de energia, porém sem grande expressividade.

#### 4.8- Análise de Resultados- Experimento 5

Em todos os experimentos feitos até este momento foram utilizadas várias técnicas, porém essencialmente o que foi utilizado é o Princípio de Superposição de Ondas. E por mais que fosse encontrada alguma redução de energia ela não seria suficiente para alguma utilização prática. E é por este motivo, que se verifica a necessidade de utilizar processamento de sinais para encontrar valor no

ANC. Assim, neste experimento foi utilizado o algoritmo LMS, com erro normalizado, sem considerar o atraso (o atraso será levado em consideração no próximo experimento).

Além disso, para encontrar um melhor resultado também foi utilizado o conceito de LMS normalizado. Para os 5 casos foi feita uma análise com diferentes ordens de filtro. Para cada ordem de filtro foram feitos testes com  $0.05 \leq \alpha \leq 1.5$ . Depois foi plotado para cada posição e tipo um gráfico de  $\alpha$  por energia, para verificar a ordem do filtro que melhor reduz o ruído.

Abaixo uma figura esquemática do que foi feito neste primeiro momento do experimento:

```

*** Escolha de um valor de filtro of variado

 $\alpha = 0.05$ 

While  $\alpha \leq 1.5$ 

N % número de iterações do algoritmo

LMSnorm(N, of,  $\alpha$ ,  $X_k$ ) = erro

Cálculo da energia do erro

Armazenamento da energia do erro para este  $\alpha$ 

 $\alpha = \alpha + 0.05$ 

end

Retornar a *** (retornar certo número de vezes e
parar

Plotar gráfico da energia do erro por  $\alpha$ 

Verificar qual a melhor ordem de filtro e o melhor

```

*Figura 4.9- Esquema da primeira parte do Experimento 4.*

Os resultados estão nas Figuras 4.10 a 4.14:

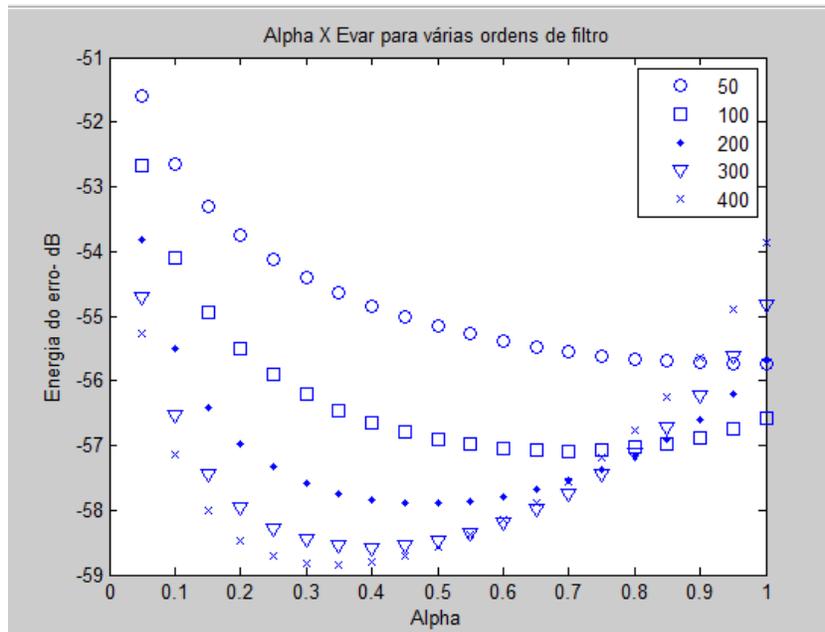


Figura 4.10- Energia da amostra para várias ordens de filtro *Caso1*

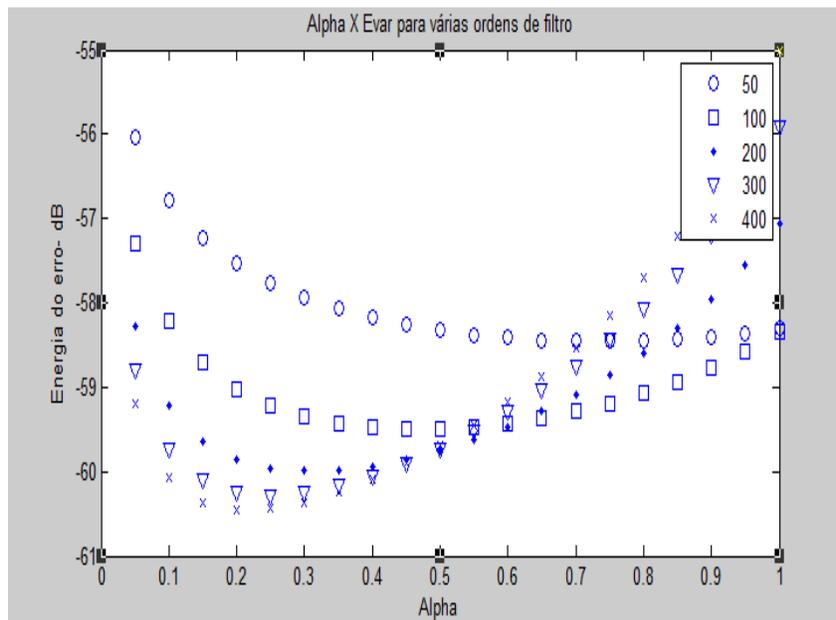


Figura 4.11- Energia da amostra para várias ordens de filtro *Caso2*

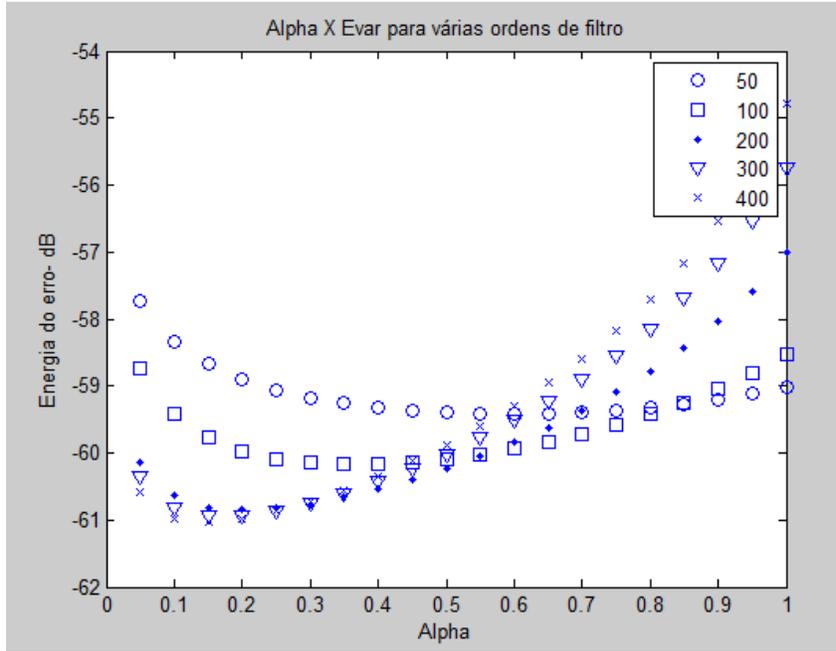


Figura 4.12- Energia da amostra para várias ordens de filtro **Caso3**

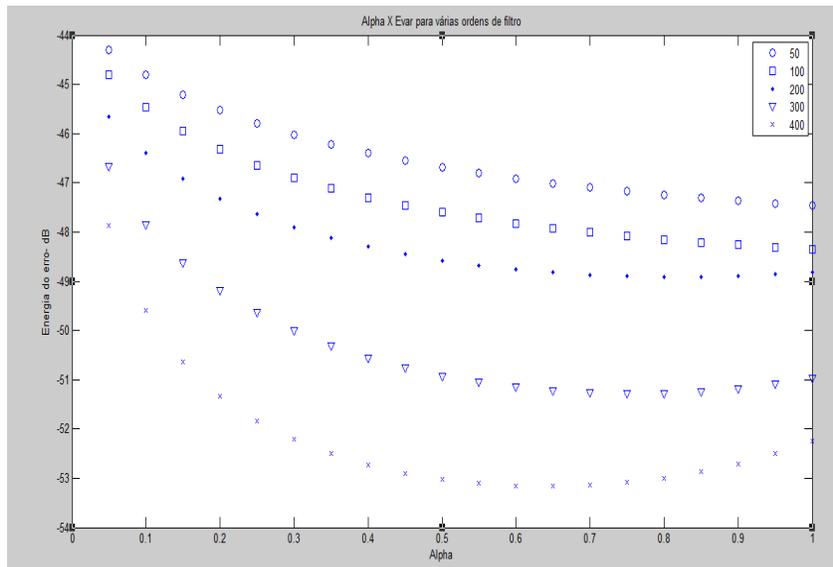


Figura 4.13- Energia da amostra para várias ordens de filtro **Caso4**

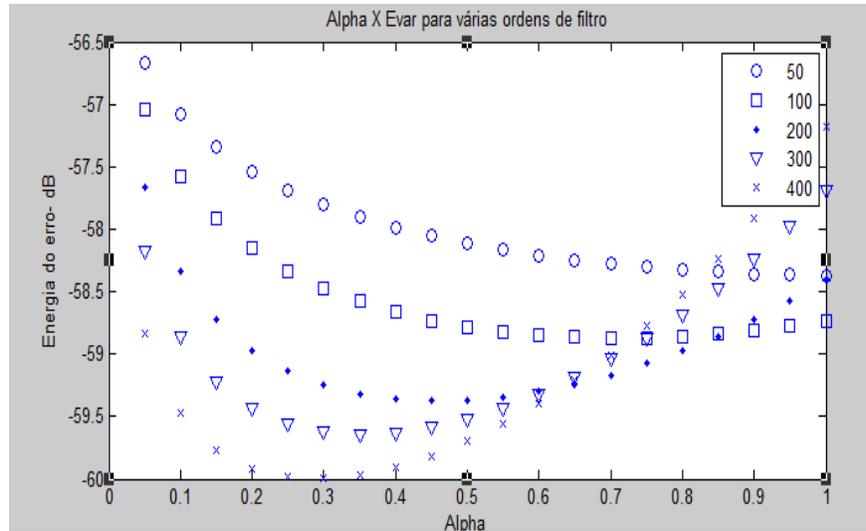


Figura 4.14- Energia da amostra para várias ordens de filtro **Caso5**.

Um resumo dos resultados das Figuras 4.10 a 4.14 está na Tabela 4.7:

Tabela 4.7- Valores mínimos de energia para várias ordens de filtro

<b>CASO 1</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	200	300	400
<b>Alpha</b>	0.95	0.70	0.70	0.40	0.35
<b>Energia erro</b>	-55.7342 dB	-57.082 dB	-57.0822 dB	-58.5796 dB	-58.8487 dB
<b>CASO 2</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	200	300	400
<b>Alpha</b>	0.75	0.45	0.3	0.25	0.2
<b>Energia erro</b>	-58.4565 dB	-59.5014	-59.9949	-60.2754 dB	-60.4558 dB
<b>CASO 3</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	200	300	400
<b>Alpha</b>	0.60	0.35	0.20	0.15	0.15
<b>Energia erro</b>	-59.4179 dB	-60.172 dB	-60.8507 dB	-60.9331 dB	-61.0365 dB
<b>CASO 4</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	200	300	400
<b>Alpha</b>	1	1.25	0.8	0.75	0.65
<b>Energia erro</b>	-47.4658 dB	-48.442 dB	-48.9130 dB	-51.2778 dB	-53.1645 dB
<b>CASO 5</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	200	300	400
<b>Alpha</b>	1.05	0.70	0.45	0.35	0.3
<b>Energia erro</b>	-58.3720 dB	-58.871 dB	-59.3735 dB	-59.6438 dB	-59.9960 dB

Da Tabela 4.7 pode-se concluir a melhor ordem de filtro. Com a melhor ordem do filtro tira-se o valor de  $\alpha$  no qual a energia do filtro fosse a mais distante da energia da referência, encontrando

assim a máxima diminuição de ruído neste experimento. E nesse momento para cada sinal foi feito o seguinte:

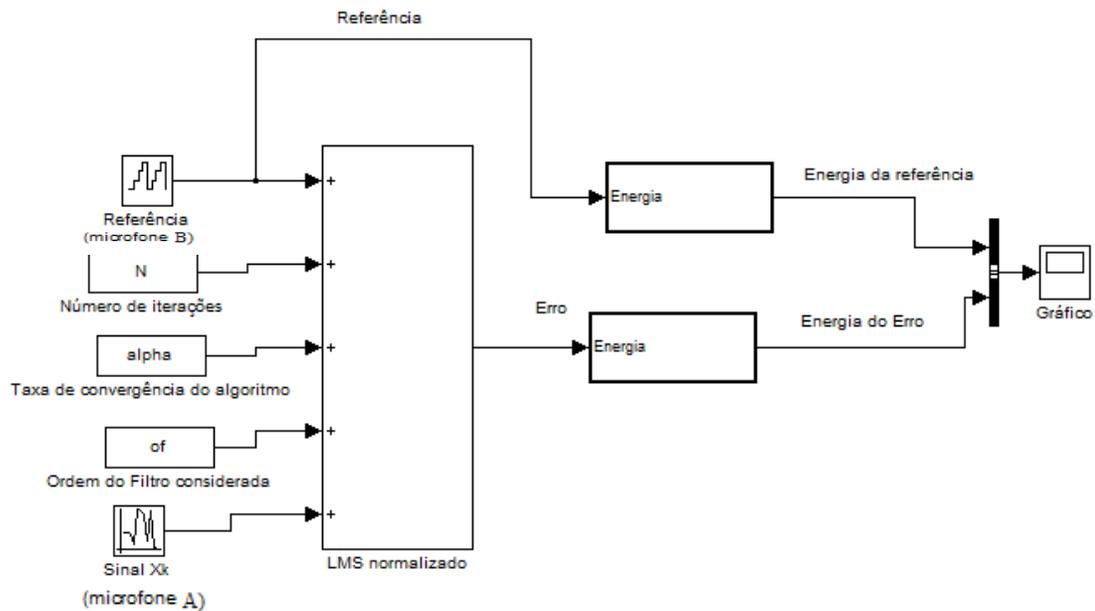


Figura 4.15- Esquema Experimento 5.

Com estes valores para cada caso encontra-se um valor de ruído de acordo com a Tabela 4.8:

Tabela 4.8- Resultados do experimento 5 para 5 casos.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
<b>Ordem do Filtro</b>	300	300	200	400	300
<b>Energia Referência</b>	-48.606 dB	-53.1885 dB	-55.7927 dB	-42.8126 dB	-55.978 dB
<b>Energia Erro</b>	-58.5796 dB	-60.2754 dB	-60.8507 dB	-53.1645 dB	-59.6438 dB

Desta última tabela verifica-se que em todos os casos houve redução considerável na energia, demonstrando assim a validade do LMS para a resolução do problema de ANC.

#### 4.9- Análise de Resultados- Experimento 6

Neste último experimento *OFF-LINE* o algoritmo LMS normalizado é novamente utilizado. Porém neste caso, o atraso encontrado no experimento 3 será considerado.

Primeiramente é refeito o esquema do experimento anterior para encontrar a melhor ordem do filtro e a melhor taxa de convergência.

Os resultados estão nas Figuras 4.16 a 4.20:

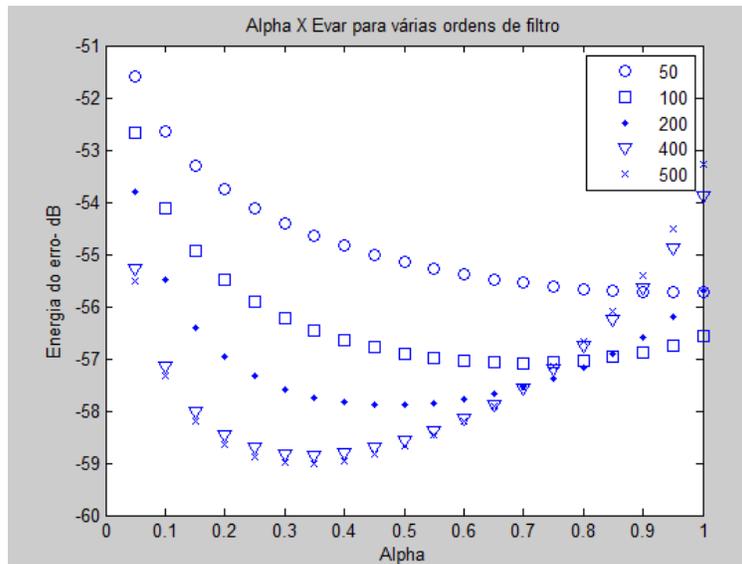


Figura 4.16- Energia da amostra para várias ordens de filtro *Caso1*.

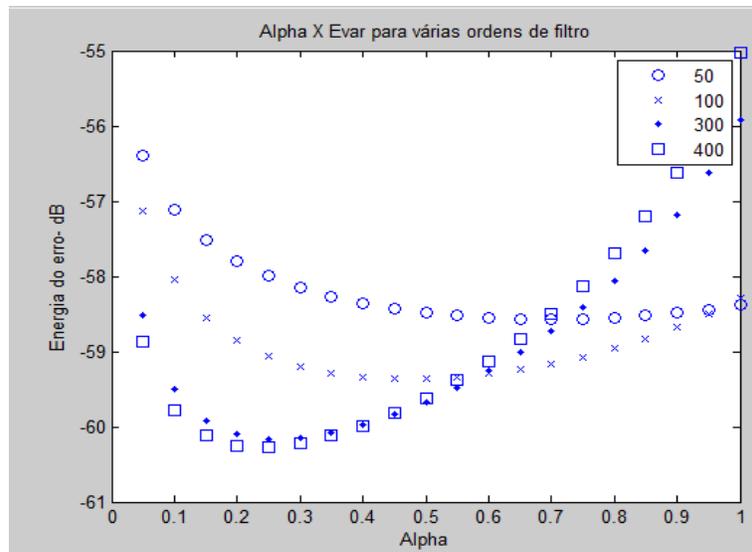


Figura 4.17- Energia da amostra para várias ordens de filtro *Caso2*.

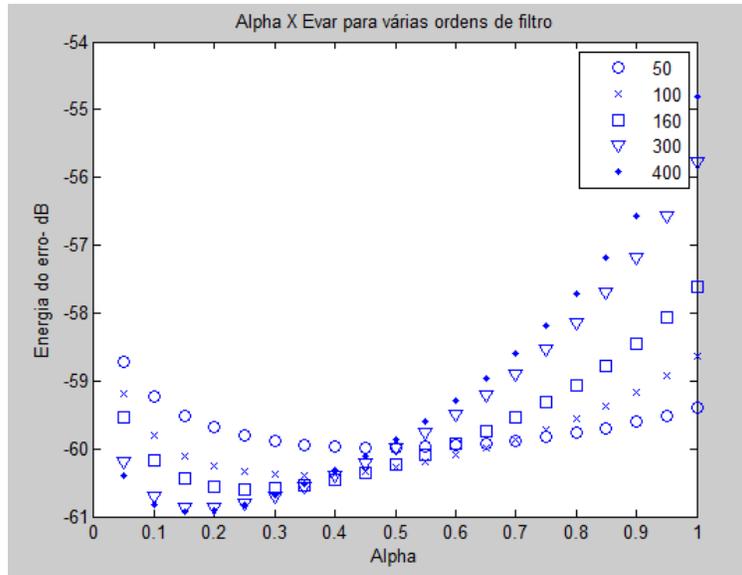


Figura 4.18- Energia da amostra para várias ordens de filtro *Caso3*.

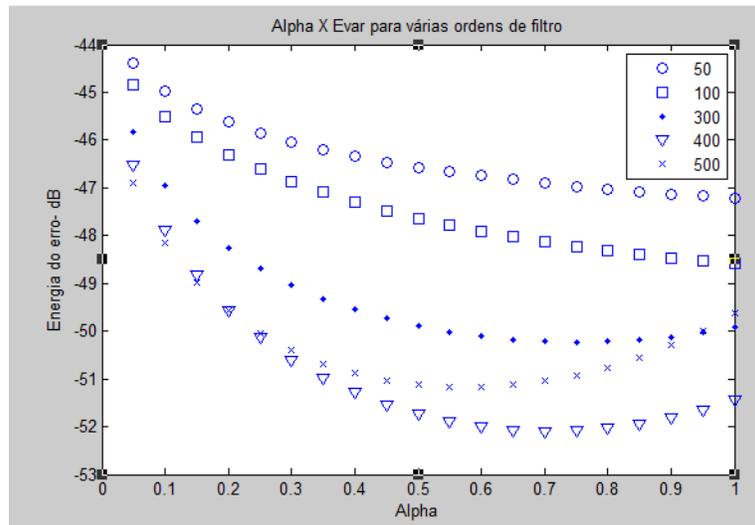


Figura 4.19- Energia da amostra para várias ordens de filtro *Caso4*.

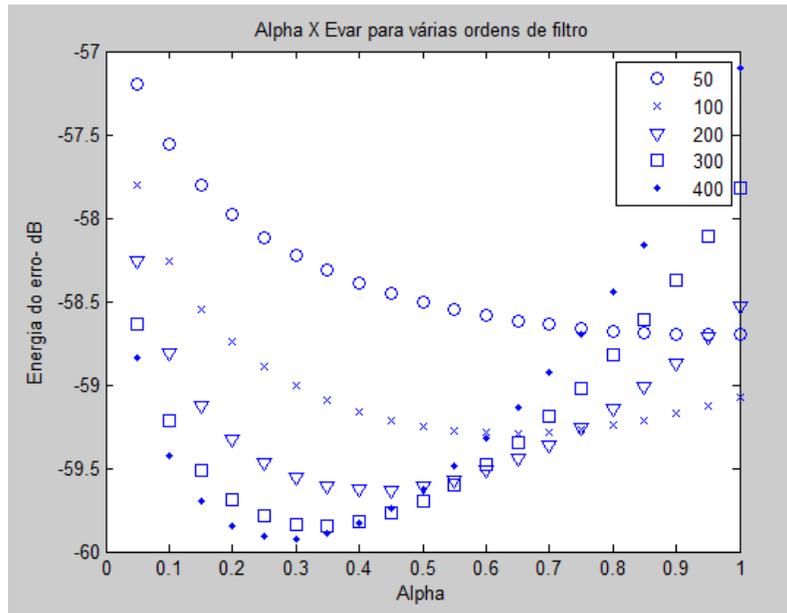


Figura 4.20- Energia da amostra para várias ordens de filtro **Caso5**.

Um resumo dos resultados das Figuras 4.16 a 4.20 está na Tabela 4.9:

Tabela 4.9- Valores mínimos de energia para várias ordens de filtro.

<b>CASO 1</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	200	400	500
<b>Alpha</b>	0.70	0.55	0.40	0.30	0.30
<b>Energia erro</b>	-56.0514 dB	-57.219 dB	-57.8330 dB	-58.5796 dB	-58.9791 dB
<b>CASO 2</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	300	400	
<b>Alpha</b>	0.75	0.50	0.25	0.25	
<b>Energia erro</b>	-58.5531 dB	-59.347 dB	-60.1579 dB	-60.2720 dB	
<b>CASO 3</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	160	300	400
<b>Alpha</b>	0.75	0.50	0.35	0.25	0.20
<b>Energia erro</b>	-59.8878 dB	-60.313 dB	-60.5658 dB	-60.8761 dB	-60.9403 dB
<b>CASO 4</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	300	400	500
<b>Alpha</b>	0.40	0.40	0.45	0.45	0.40
<b>Energia erro</b>	-47.3425 dB	-48.445 dB	-49.9875 dB	-51.9797 dB	-51.0809 dB
<b>CASO 5</b>					
<b>Ordem do Filtro</b>	50	100	200	300	400
<b>Alpha</b>	0.95	0.65	0.40	0.35	0.30
<b>Energia erro</b>	-58.7020 dB	-59.290 dB	-59.6328 dB	-59.8430 dB	-59.9209 dB

Agora tirando os melhores valores da Tabela acima para cada caso utilizamos o LMS normalizado da seguinte forma:

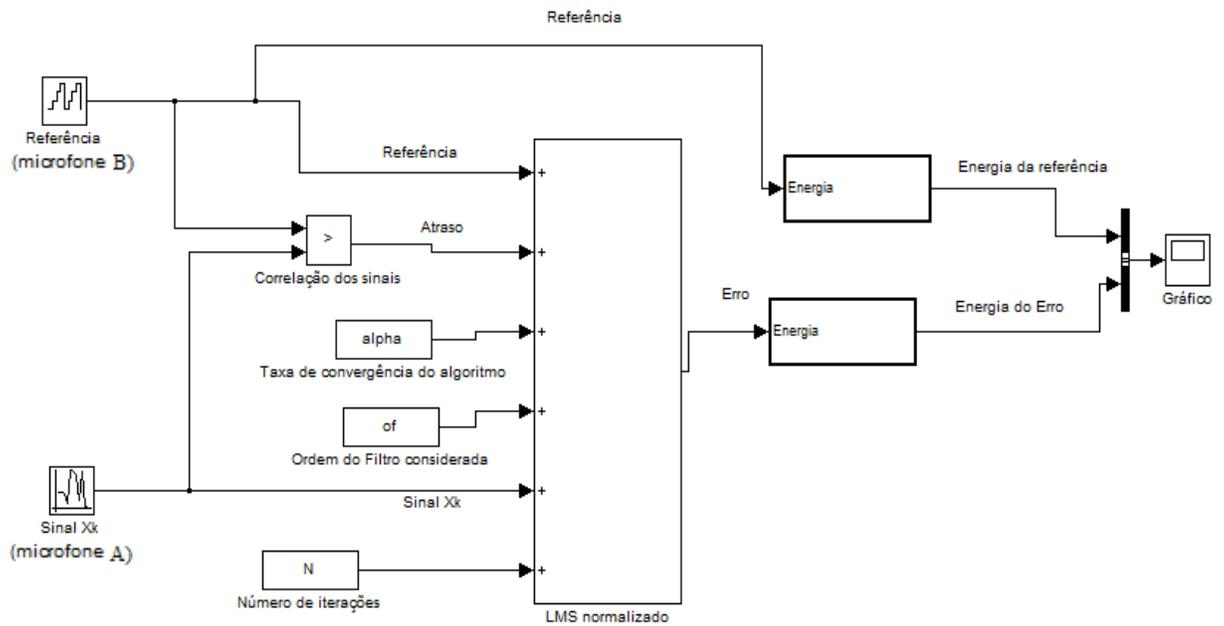


Figura 4.21- Esquema da segunda parte do Experimento 4.

O resultado final:

Tabela 4.10- Resultados do experimento 6 para 5 casos.

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>	<b>Caso 5</b>
<b>Ordem do Filtro</b>	400	300	300	400	300
<b>Energia Referência</b>	-48.606 dB	-53.1885 dB	-55.7927 dB	-42.8126 dB	-55.978 dB
<b>Energia Erro</b>	-58.5796 dB	-60.1579 dB	-60.8761 dB	-51.9797 dB	-59.8430 dB

## Conclusão

*Tabela 4.11- Tabela com ruído final para cada experimento.*

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	O.F. 5/6
<b>Caso 1</b>	--	--	+0.7175 dB	-0.4267 dB	-9.9735 dB	-9.9735 dB	300/ 400
<b>Caso 2</b>	+4.4125 dB	+4.2457 dB	+1.3154 dB	-0.1931 dB	-7.0869 dB	-6.9694 dB	300/ 300
<b>Caso 3</b>	+5.8288 dB	+0.0222 dB	+1.6929 dB	+1.8819 dB	-5.0580 dB	-5.0834 dB	200/400
<b>Caso 4</b>	--	--	+3.4257 dB	+0.1504 dB	-10.3519 dB	-9.1644 dB	400/400
<b>Caso 5</b>	+3.2421 dB	+3.2874 dB	+2.7360 dB	+1.2700 dB	-3.6658 dB	-3.8650 dB	300/300

Com a tabela acima se pode perceber como cada experimento foi acrescentando algo importante para a análise do ruído. E quando finalmente chega-se aos experimentos 5 e 6, com o LMS normalizado é possível verificar que houve uma diminuição no nível de ruído. A diferença entre o LMS com atraso e sem atraso varia de acordo com os valores experimentais. De uma forma geral, a presença do atraso pode ser considerada boa, diminuindo o ruído aproximadamente como o sem atraso e algumas vezes diminuindo a ordem do filtro.

A diminuição no nível de ruído é relativa. Quando mais próxima da entrada estiver a referência, maior será a diminuição do ruído. Também fica claro que embora seja possível trabalhar com partes não retas, o ANC tem resultados muito mais expressivos quando se verifica somente uma parte reta.

# Capítulo 5

## Conclusão Final

### 5.1- Sinopse

Este trabalho teve como objetivo apresentar o problema de Controle Ativo de Ruído e estudar formas de resolvê-lo.

No Capítulo 1 foi feita uma introdução ao assunto de Controle de Ruído demonstrando os principais motivos levados ao estudo do mesmo: os variados tipos de ruído presentes na indústria, os danos da poluição sonora ao ser humano e a Legislação Brasileira para ruídos no ambiente de trabalho.

No Capítulo 2 foram apresentadas de forma concisa as principais propriedades da Acústica envolvida no Problema de ANC. Foi explicada a forma de onda do som e como ela se propaga. Foram explicadas ainda diversas formas de Controle de Ruído, explicado o contexto prático de cada uma e a melhor forma de serem utilizadas. Neste Capítulo também foi desenvolvido um amplo histórico do assunto de ANC de forma cronológica e de acordo com suas principais contribuições.

No Capítulo 3 foram discutidas várias técnicas de processamento de sinais, de forma uniformizada para que o leitor pudesse acompanhar as diversas técnicas ali apresentadas. Nele foram feitas comparações entre essas diversas formas e onde foram explicados os principais algoritmos usados em controle ativo de ruído. Exemplos teóricos foram apresentados, principalmente de filtragem adaptativa, foco do estudo deste presente trabalho.

No Capítulo 4 apresentou-se a parte prática do projeto. Dados foram tomados do duto real presente no Laboratório de Ensaio de Modelo de Engenharia (LEME- COPPE) para que fossem avaliados posteriormente. A complexidade do duto fez com que várias configurações de sinais fossem consideradas, obtendo-se os sinais de interesse simultaneamente através de dois microfones. O desempenho dos diferentes algoritmos foi comparado para estas diversas configurações, com foco no uso de técnicas de filtragem adaptativas, as quais obtiveram os melhores resultados experimentais.

Entre os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho, podemos destacar o desempenho obtido pelo algoritmo LMS de filtragem adaptativa e a alta dependência da eficiência do controle ativo de ruído para a configuração dos dados. Para a melhor configuração aqui considerada, onde se verificava a maior correlação entre os sinais de referência e de entrada do filtro adaptativo, pode-se diminuir em 10 dB a potência média do ruído.

## 5.2- Trabalhos Futuros

O trabalho presente não almeja esgotar o tema de ANC e seus métodos de solução. Há outros métodos a serem testados em um trabalho continuado a partir do trabalho presente e com os resultados alcançados pelo LMS.

Dentro do próprio tema de Filtragem Adaptativa há outros algoritmos que podem ser testados, avaliados e comparados ao LMS. Entre eles estão o Filtered-X LMS (XLMS) e o Recursive Least Square (RLS) (que aumenta a velocidade de convergência do algoritmo adaptativo ao custo de um incremento da complexidade computacional resultante).

Além disso, os próprios resultados conseguidos OFF-LINE com os dados adquiridos do filtro precisam ser testados e ajustados para um sistema ONLINE.

Por fim, pode ser avaliado ainda o efeito da combinação de diferentes técnicas, ao invés de se considerar apenas uma técnica de cada vez.

## Referências Bibliográficas

Aguilera, Pedro Luiz Gonzalez. "Potencial de uso da tecnologia de barreiras acústicas para redução da poluição sonora: Estudo de Caso no Lactec." Curitiba, 2007.

Baumkartem, Rodrigo. "Lógica Fuzzy." 2006.

Bistafa, Sylvio R. *Acústica aplicada ao Controle do Ruído*. 2006.

Celiz & Lopez. "Evaluation of a Hybrid ANC System with Acoustic Feedback and Online Secondary Path Modelling." México, 2009.

Cosseau, Nieto &. "Aspectos de La Implementación de um Ambiente de Cancelamiento Activo de Ruido." Argentina.

Elliott, Nelson &. *Active Control of Sound*. 1992.

Nelson & Elliott. "Active Noise Control." 1993.

Elliott, Nelson e. *Active Control of Sound*. Academic Press, 2005.

Lueg, Paul. Process of Silencing Sound Oscillations. US Patent 2043416. June 09, 1936.

Nascimento, Bruno S. Masiero e Vitor H. "Sistemas de Áudio no Controle Ativo de Ruído." 5º Congresso de Engenharia de Áudio. São Paulo, 2007. 2.

Pedrosa, Fernando. "Controle Ativo de Ruído em Dutos de Ventilação: "Um experimento para aplicação em Unidades Offshore"." Setembro 2006.

Romeu, J. "Active Noise Control in ducts in presence of standing waves. Its influence on feedback effect." Espanha, 2000.

Wong, Yee-Jun. "Hybrid active and passive control of fan noise." Austrália, 2003.

Castello, Filipe. "Supressão de Ruído, Detecção e Classificação de Sinais de Descargas Parciais em Transformadores de Potência." Tese de Mestrado, 2005.

Diniz e Silva e Netto, Paulo Sergio Ramirez e Silva, Eduardo Antônio Barros da e Netto, Sergio Lima. *Processamento Digital de Sinais- Projeto e Análise de Sistemas*. 2004.

Nero, Afonso. "Controle Linear Clássico- Notas de Aulas." 2005.

Widrow e Stearns, Bernard e Samuel. *Adaptive Signal Processing*. 1985.

Rodrigues, Diego da Silva. Projeto Final Graduação , Rio de Janeiro, 2008.

Gomes, Franciso A. M. "O método dos Gradientes Conjugados." 2008.

Musafir, Ricardo E. "Apostila de Poluição Sonora." Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro 1999.

*Patentstorm.us*. may 13, 2008.

<http://www.patentstorm.us/patents/4876722/description.html> (accessed june 04, 2010).

UFRGS. *Áreas de Concentração e Linhas de Pesquisa do PPGEE*. -.

<http://www.ufrgs.br/ppgee/linhasdepesquisa.htm#linhas> (accessed Agosto 28, 2010).

Widrow, Bernard. *dsp History*. Janeiro 2005.

<http://www-isl.stanford.edu/~widrow/papers/j2005thinkingabout.pdf> (accessed Agosto 28, 2010).