

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GIOVANNI LUIZ MARTINS VIZENTIN

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CANCELAMENTO ATIVO DE RUÍDO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2021

GIOVANNI LUIZ MARTINS VIZENTIN

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CANCELAMENTO ATIVO DE RUÍDO

Analysis of active noise cancellation techniques

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Cristiano Marcos Agulhari.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt_BR)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt_BR

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Giovanni Luiz Martins Vizentin

Análise de técnicas de cancelamento ativo de ruído

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 29/07/2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Renata Coelho Borges - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

RESUMO

VIZENTIN, Giovanni Luiz Martins. **ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CANCELAMENTO ATIVO DE RUÍDO**. 2021. 38f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2021.

A grande maioria da humanidade sofre ou já sofreu com ruído em seu cotidiano, sendo assim, em amplitudes elevadas, esse som pode implicar em danos significativos ao aparelho auditivo do indivíduo. Devido a esse fato, é imprescindível que ocorram pesquisas desenvolvidas com o intuito de cancelar ou atenuar esse tipo de distúrbio. O crescente estudo na área de processamento de sinais tem sido primordial para auxiliar no desenvolvimento de técnicas de controle capazes de anular esse ruído ativamente através do princípio de superposição de ondas e interferência destrutiva. O principal objetivo desse estudo é analisar a aplicação de diferentes tipos de algoritmos em técnicas de cancelamento desse ruído através do ANC pelo método *feedback* e *feedforward*. É importante analisar as peculiaridades de cada algoritmo aplicado no controle ativo de ruído, a fim de obter um melhor sistema de redução de ruído, dado que, em aplicações que necessitem de um sistema mais estável o custo operacional será mais elevado necessitando do algoritmo *NLMS*. Porém em aplicações simples o algoritmo *LMS* atuará normalmente tendo um valor de erro consideravelmente baixo e um baixo nível de complexidade no sistema.

Palavras chaves: Controle ativo de ruído; Superposição; *Feedback*; *Feedforward*; *NLMS*; *LMS*

ABSTRACT

VIZENTIN, Giovanni Luiz Martins. **ANALYSYS OF NOISE ACTIVE CANCELLATION TECHNIQUES**. 2021. 38f. Final Paper – Electric Enginner. Federal Technology University of Paraná. Cornélio Procópio, 2021.

The vast majority of humanity suffers or has already suffered noise disturbances in their daily life, and thus, at high amplitudes, this sound may imply significant damage to the hearing aid of the affected. Due to this fact, it is imperative that research developed with the intention of canceling or attenuating this type of disorder occurs. The growing study in the area of signal processing has been instrumental in assisting the development of control techniques capable of annulling this noise actively through the principle of wave overlap and destructive interference. The main objective of this study is to analyze with the application of different types of algorithms the noise cancellation techniques through the *Active noise control* by *feedback* and *feedforward* method. It is important to analyze the peculiarities of each algorithm applied in the active noise control, in order to obtain a better noise reduction system, since in applications that require a more stable system the operating cost will be higher, requiring the algorithm *NLMS*. However, in simple applications the *LMS* algorithm will normally act with a considerably low error value and a low level of complexity in the system.

Keywords: Active noise control; Overlay; *Feedback*; Feedforward; LMS; NLMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação de intensidade/duração. Adaptado de Directiva do Parlamento Europeu, (2003)	09
Figura 2 – Superposição de duas ondas com fases defasadas 180 graus. Autoria Própria.....	12
Figura 3 – Estrutura funcional e Diagramas de blocos do sistema de controle. Adaptado de (LIEBICH et al., 2016)	14
Figura 4 – Layout do Headset com ANC e seu modelo equivalente. Adaptado de (KUANG-HUNG; LIANG-CHIEH et al., 2008).....	15
Figura 5 – Modelo físico e diagrama de blocos de sistema <i>feedback</i> . Adaptado de (HANSEN, 2003); (KUO, 1999)	17
Figura 6 – Modelo físico e diagrama de blocos de sistema <i>feedforward</i> . Adaptado de (HANSEN, 2003); (KUO, 1999)	18
Figura 7 – Diagrama de blocos, implementação LMS. Autoria Própria	29
Figura 8 – Gráficos de implementação do LMS, (ordem 1 e $\mu = 0,5$, ordem 10 e $\mu = 0,7$, ordem 32 e $\mu = 1$)	30
Figura 9 – Diagrama de blocos, implementação NLMS. Autoria Própria.....	31
Figura 10 – Gráficos de implementação do NLMS, (ordem 1 e $\mu = 0,5$, ordem 10 e $\mu = 0,7$, ordem 32 e $\mu = 1$)	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC Analog to Digital Converter

A/D *Analog/Digital*

DAC *Digital to Analog Converter*

D/A *Digital/Analog*

FIR *Finite Impulse Response*

IIR *Infinite impulse Response*

LMS *Least Mean Square*

MSE *Mean square error*

NLMS *Normalized Least Mean Square*

RLS *Recursive Least Square*

SNR *Signal to Noise Ratio*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	08
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS GERAIS	11
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	CONCEITOS BÁSICOS	12
2.1.1	RUÍDO E ANTI-RUÍDO	12
2.1.2	CAMINHO SECUNDÁRIO	13
2.2	LAYOUT	14
2.3	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE	15
2.3.1	CANCELAMENTO DE RUÍDO ADAPTATIVO	16
2.3.2	SISTEMAS DE CONTROLE FEEDBACK	16
2.3.3	SISTEMAS DE CONTROLE FEEDFOWARD	17
2.3.4	DIFERENCIAÇÃO DOS SISTEMAS	18
2.4	FILTROS DIGITAIS	18
2.4.1	FILTRO DE WIENER	19
2.4.2	FILTRO DE KALMAN	19
2.4.3	FILTRO ADAPTATIVO	20
2.5	ALGORITMO ADAPTATIVO	20
2.5.1	LMS	21
2.5.2	MSE	21
2.5.3	FXLMS	22
2.5.4	NMLS	22

2.5.4	RLS.....	22
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1	VISÃO GERAL DO SISTEMA PROPOSTO.....	23
3.2	SIMULAÇÃO VIA MATLAB.....	23
4.	ESTUDO DE CASO	24
4.1	ANÁLISE DE TÉCNICAS LMS e NLMS.....	24
5	CONCLUSÃO	34

1 INTRODUÇÃO

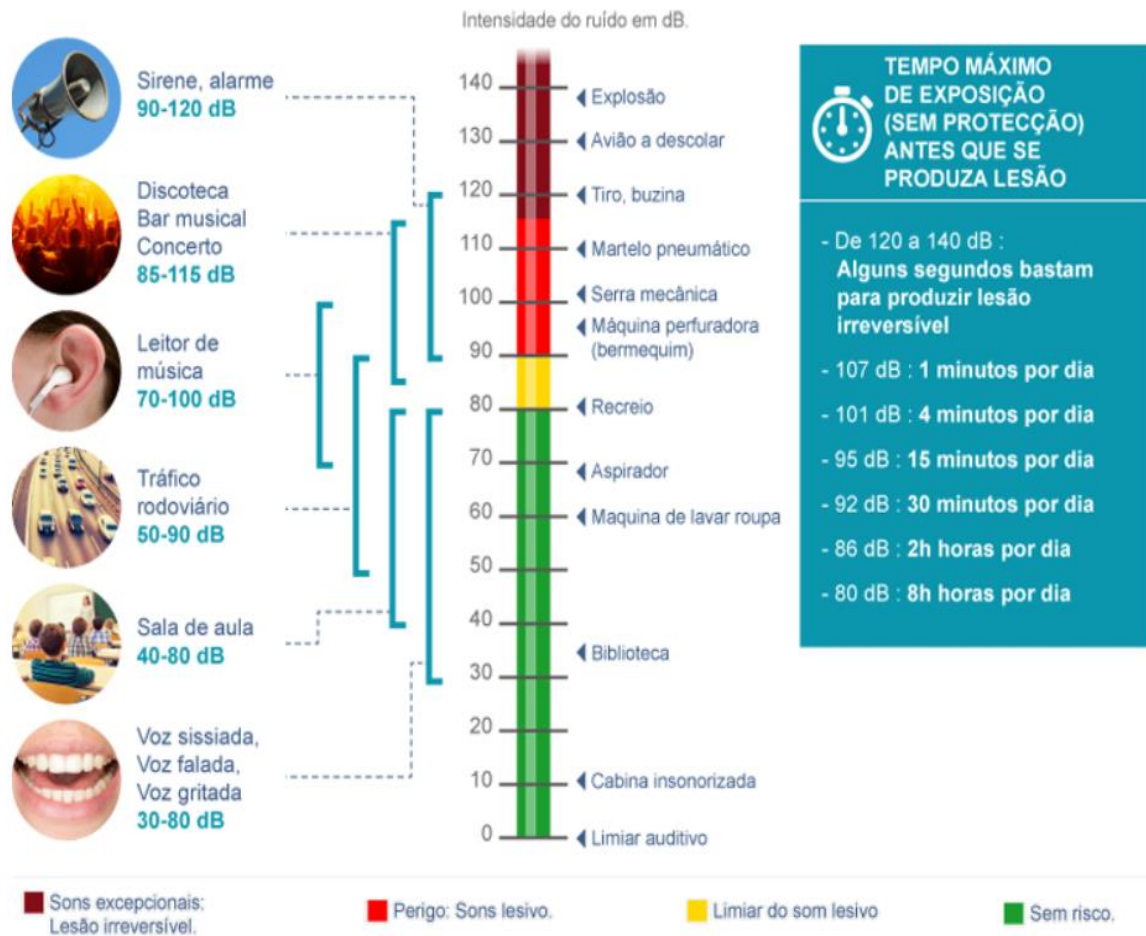
Com a evolução da humanidade e o advento da tecnologia, a quantidade e intensidade de ruídos emitidos por diversos tipos de fontes têm aumentado no mundo, isso ocorre devido ao bombardeio de ondas sonoras geradas por fontes de ruídos em ambientes externos como trânsito, aeroportos, construções e indústrias, ou mesmo por fontes em ambientes internos como aspirador de pó, liquidificador ou em aparelhos de música. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2015) a poluição sonora é o segundo maior agente poluidor ambiental, perdendo apenas para poluição do ar.

O fato é que esse ruído pode gerar perdas auditivas devido à lesão na orelha, órgão capaz de captar as vibrações do ambiente. Operando normalmente, o ouvido humano consegue captar sons com frequências que alternam de 20Hz até 20KHz, porém, quando esse órgão não se encontra em seu estado normal, essa escala diminui podendo também ocasionar um tinnitus (ruído constante) no indivíduo.

No senso comum, esse barulho é definido pela palavra ruído (acústico). Fisiologicamente, o ruído é todo som que produz uma sensação auditiva desagradável, incômoda ou perigosa. A definição de ruído em eletrônica nos diz que este é qualquer corrente ou tensão indesejada, que observamos na medida de um sinal elétrico proveniente de um sensor, ou que está presente na transmissão de sinal eletrônico.

A relação da intensidade desse ruído com o tempo de exposição apresentado na Figura 1, mostra que, quanto maior o nível do ruído, menos tempo o ouvinte pode ficar exposto ao mesmo sem que ocorra uma lesão. A realidade é que muitas pessoas trabalham em ambientes com alto nível sonoro devido a máquinas que emitem sons de elevada amplitude gerando deterioração da audição. Diante dessa situação, tem-se tentado eliminar, ou ao menos atenuar, esse ruído indesejado.

Figura 1 - Relação de intensidade/duração



Fonte: Adaptado de Directiva do Parlamento Europeu, (2003).

O controle de ruído pode ser realizado de duas maneiras, a mais utilizada é a forma passiva, em que consiste principalmente no isolamento sonoro entre a fonte e o receptor, que são utilizados materiais como silenciadores, absorvedores ou amortecedores (SATHLER, 2009). Esse método utiliza os meios físicos para diminuir a intensidade sonora por meio de materiais isolantes como o ar, a lã de vidro, o isopor ou até mesmo a espuma acústica são utilizados.

Essa técnica possui viabilidade em sinais com frequências médias e altas, acima de 1000 Hz, isso porque o tamanho e massa dos materiais utilizados nesse tipo de tratamento de ruído depende do comprimento de onda. Em frequências baixas o comprimento de onda torna-se muito grande comparado à espessura do material que irá absorvê-la tornando o sistema maior e mais robusto. Por exemplo, uma onda sonora com frequência de 100Hz teria um comprimento de onda de aproximadamente 3.4 metros no ar em suas condições normais (ELLIOTT; NELSON, 1993, p. 12).

Outra abordagem utilizada é o controle ativo de ruído (Active Noise Control - ANC), que compreende técnicas para suprimir o ruído acústico de baixas frequências com processamento de sinais (ELLIOTT; NELSON, 1993, p. 12). Esse método utiliza fontes secundárias controladas, cuja saída é correlacionada com a fonte primária original. Esse controle funciona usando o princípio de interferência destrutiva em que os campos sonoros gerados por ambas as fontes possuem fases invertidas, assim, o sinal de saída é atenuado ou até mesmo cancelado dependendo do algoritmo de controle.

Essa técnica possui várias aplicações, tornando-se viável com o avanço da tecnologia, porém, ainda existem poucas soluções comerciais. As mais usadas até então são os fones de ouvidos, que cancelam o ruído exterior, fazendo com que o usuário o utilize com menor volume e conseqüentemente diminuindo o dano ao ouvido. Segundo a OMS, cerca de 1,1 bilhão de pessoas podem sofrer de perdas auditivas por escutar músicas em alto volume (OMS, 2015). Outra aplicação é em automóveis, em que esse sistema de controle ativo impede que o ruído do motor chegue aos ouvidos dos passageiros, e também há estudos para o cancelamento do barulho do vento.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante do fato de que o ruído é algo prejudicial à saúde auditiva, a análise de técnicas de controle ativo de ruído é um assunto interessante a ser abordado além de viável em sistemas de baixa frequência, já que o controle passivo para essa faixa de comprimento de onda é caro, robusto e ineficaz (KUANG-HUNG; LIANG-CHIEH et al., 2008). Outro fator interessante é que o ANC é controlável, podendo bloquear seletivamente o sinal original apenas onde o desenvolvedor do algoritmo de controle deseje.

Com a utilização de algoritmos e softwares de controle, será realizada uma análise comparativa a fim de assinalar as vantagens comparativas nos sistemas de controle, qual técnica se mostra superior e quais as vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas utilizados no controle ativo de ruído, sendo eles *feedback* ou *feedforward* e nos diferentes tipos de algoritmos utilizados no controle do antirruído.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Entender claramente os princípios físicos (ou acústicos) e eletrônicos (algoritmos e hardware) do Controle Ativo de Ruído a fim de comparar e avaliar suas limitações e funcionalidades em ambientes com ruído contínuo.

Implementação dos dois tipos de filtros adaptativos LMS e NLMS a fim de expor a diferença entre tais algoritmos adaptativos através de valores de SNR e a Energia do Erro Estimado, qual a vantagem e desvantagem desses filtros no controle ativo de ruído estudado no trabalho.

Portanto, será realizada a simulação no ambiente de programação MATLAB e com um ruído branco, que na teoria, são sinais randômicos gerados ao acaso junto ao sinal controlado, será identificado qual o melhor filtro a ser utilizado. Em seguida os filtros serão analisados computacionalmente o que apresentará uma análise completa do processamento de sinais no sistema ruidoso.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Através de softwares de simulação, implementar algoritmos adaptativos LMS e NLMS.

Extração de dados através da leitura de parâmetros do SIMULINK e MATLAB.

Analisar as técnicas de controle ativo de ruído.

Apresentar graficamente e através da leitura de parâmetros quais as características dos filtros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados conceitos básicos do ruído e antirruído, também será abordado sobre seu *layout*, juntamente com as estratégias de controle e o cancelamento adaptativo do ruído.

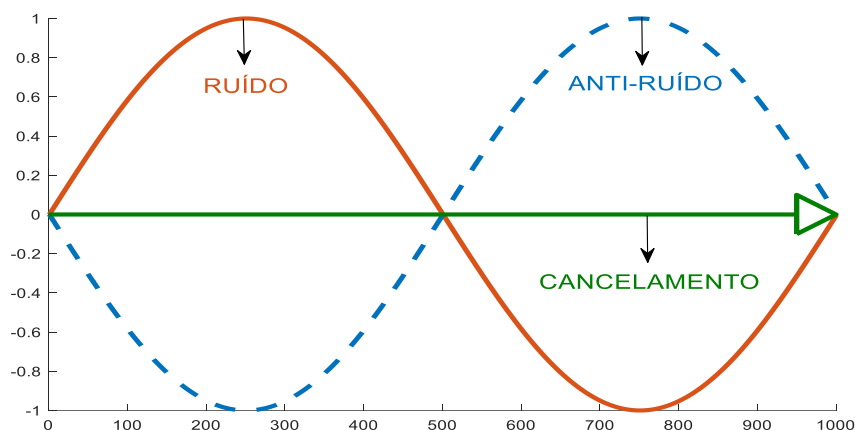
2.1 CONCEITOS BÁSICOS (ACÚSTICO)

Independente do ruído a ser tratado, o ANC utiliza o princípio de superposição para o cancelamento, assim o faz usando uma interferência destrutiva. Tal princípio é válido para qualquer sistema linear, e a propagação de uma onda acústica de amplitude não muito elevada (abaixo de 140 dB) pode ser considerada um processo linear (ELLIOTT; NELSON, 1993).

2.1.1 RUÍDO E ANTI-RUÍDO

O controle ativo cancela um som primário com ruído por meio de um sinal de igual amplitude e fase oposta chamado antirruído através da superposição dos mesmos. A Figura 2 mostra o esquemático da superposição de dois sons.

Figura 2 - Superposição de duas ondas com fases defasadas 180 graus



Fonte: Autoria própria.

Assim, quando essas duas ondas senoidais se sobrepõem, a forma de onda resultante depende da amplitude, da frequência e da fase relativa das duas ondas. Caso a onda original e a onda inversa encontrem-se alinhadas em antifase, ocorre o cancelamento total do sinal de entrada (KUANG-HUNG; LIANG-CHIEH et al., 2008).

Como os alto-falantes utilizados como fonte secundária não possuem resposta linear (ELLIOTT; NELSON, 1993), o controle ativo de ruído também apresenta características não-lineares. No entanto, os efeitos da não linearidade se tornam desprezíveis para uma boa modelagem (SATHLER, 2009).

A não linearidade da fonte secundária de sinal ocorre uma vez que, alto falantes de pequeno porte possuem limitações para gerar ondas de baixa frequência e alta amplitude, isso porque, para baixas frequências, a energia necessária é maior, necessitando de uma maior corrente aplicada na bobina do alto falante para gerar o som, assim, essa não linearidade gera harmônicas que, ao contrário da frequência a ser cancelada pela interferência destrutiva, trará incômodo ao ouvinte (SATHLER, 2009).

O principal problema dessa modelagem é que, se controlada erroneamente, criará interferências construtivas ao invés de destrutivas nas faixas de frequências almejadas, o resultado será um problema, pois o mesmo deveria cancelar as faixas de frequências e não as amplificar.

De acordo com cada aplicação, o ANC deverá ser projetado de uma forma, caso se deseje uma atenuação perto da cabeça do usuário (zona de silêncio), o sistema necessitará que o microfone de erro, que capta a diferença do sinal desejado e o sinal analisado, se localize perto da fonte secundária, diminuindo assim a amplitude do sinal necessário para o cancelamento (OLSON; MAY, 2007).

Por outro lado, se o objetivo for uma atenuação no ambiente global, deve-se utilizar mais de um microfone de erro e mais de uma fonte secundária de cancelamento, gerando assim melhores atenuações e impedindo que, em alguns pontos deste ambiente, o ruído se amplifique.

Por mais que a tecnologia avance, ainda existem limitações físicas para esse tipo de atenuação sendo que a mais importante dessas limitações é o fato de o sistema de controle ativo de ruído só apresentar atenuação considerável quando a distância entre as fontes primárias e secundárias for menor que o comprimento de onda de interesse (ELLIOTT; NELSON, 1993).

2.1.2 CAMINHO SECUNDÁRIO

Caminho secundário é definido como a modelagem das características acústicas do caminho entre o microfone e o alto-falante juntamente com resposta eletroacústica do próprio alto-falante, além da resposta eletroacústica do microfone, as respostas dos conversores e o *anti-aliasing* do filtro utilizado (SATHLER, 2009).

Como a resposta em frequência desse caminho nunca será plena e livre de defasagem, a estimação da função transferência do caminho secundário geralmente

deve ser feita com um filtro adaptativo na configuração de estimador, isto é, deverá ser excitado por ruído conhecido e decorrelacionado com o sinal de controle. Isso se dá porque os ANC em tempo real requerem que o tempo de processamento das amostras seja menor que o tempo de amostragem, porém esse caminho inverso tem sua função inversa não casual o que o torna na maioria das vezes irrealizável.

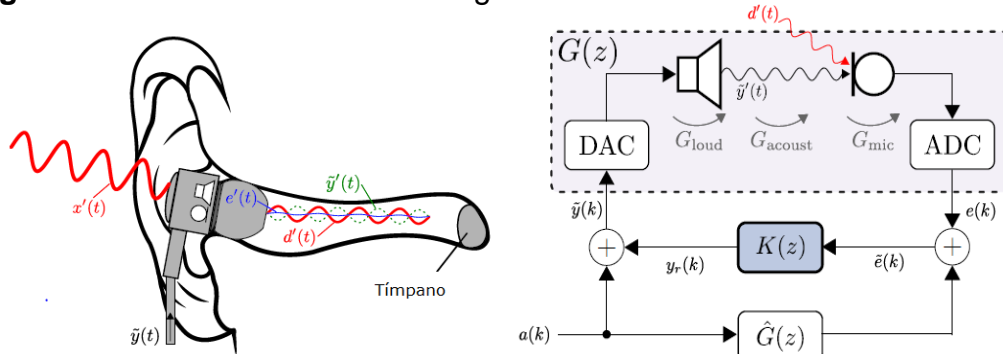
2.2 LAYOUT

Assim como o ANC possui várias aplicações, o seu *layout* deverá ser diferente para cada tipo específico de controle ou ambiente desejado. Na Figura 3, o *layout* do fone de ouvido com cancelamento de ruído ativo possui um microfone de erro dentro do canal auditivo, que captura o sinal acústico. O sinal de ruído $x'(t)$ é passivamente atenuado pelo fone de ouvido e percebido como $d'(t)$ dentro do canal auditivo, assim o controlador cria um sinal de cancelamento $y^{-1}(t)$ que interfere com $d'(t)$ dentro do canal auditivo.

O sistema de blocos de controle mostra o caminho secundário $G(z)$ além do próprio controlador $K(z)$ e a estimativa do caminho secundário $\hat{G}(z)$. A estimativa pode não ser aplicada na planta para que o sistema ANC funcione, porém pode trazer melhores resultados do controle.

No mesmo o sinal $\tilde{y}(k)$ passa pelo conversor digital analógico e é implementado no microfone de referência afim de cancelar o ruído $y^{-1}(t)$, esse cancelamento é realizado pelo controlador $K(z)$ que processa o erro estimado e cria um sinal com polaridade inversa e potência igual à potência do ruído a ser cancelado.

Figura 3 - Estrutura funcional e Diagramas de blocos do sistema de controle

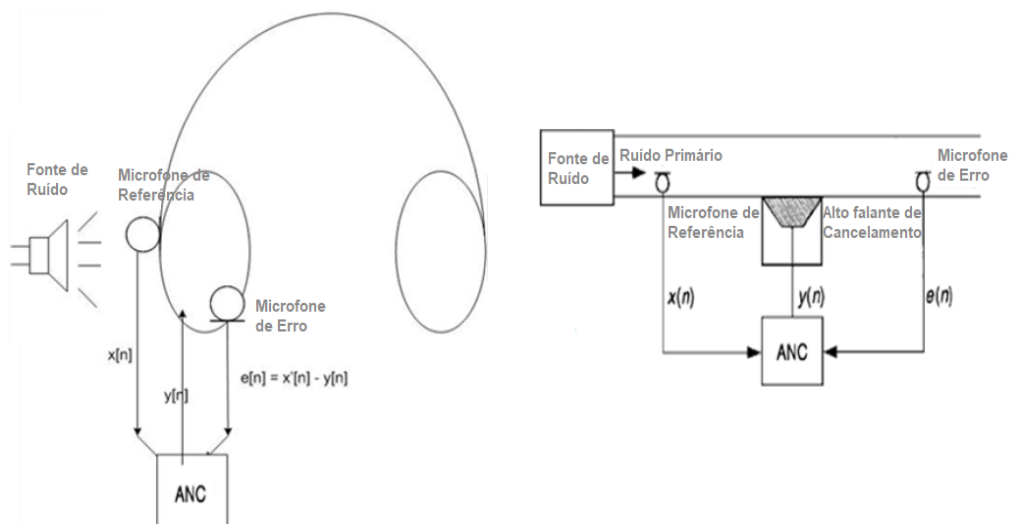


Fonte: Adaptado de (LIEBICH et al., 2016).

Outro *layout* a ser exposto é o apresentado na Figura 4, esse se diferencia do anterior por possuir dois microfones. O modelo apresentado à esquerda é o modelo estrutural do fone de ouvido em que cada círculo simboliza um microfone, um deles se localiza fora e outro dentro do fone de ouvido.

O microfone externo chamado microfone de referência é usado para medir o ruído próximo ao fone de ouvido que é inserido no ANC, assim o controlador de forma adaptativa, produz um ruído inverso à entrada já processada. O microfone interno, chamado de microfone de erro, comparará o erro entre o ruído da fonte de ruído e o sinal inverso gerado pelo controlador, o sinal gerado de erro será enviado de volta ao ANC, que atualizará os coeficientes do filtro com base nesse *feedback*.

Figura 4 - Layout do Headset com ANC e seu modelo equivalente



Fonte: Adaptado de (KUANG-HUNG; LIANG-CHIEH et al., 2008).

2.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Existem várias estratégias de controle, falaremos de duas delas, o *Feedback* e o *Feedforward*. O ruído gerado por qualquer fonte necessita do sinal de referência proveniente dessa fonte. Com base nesse sinal processado, o sistema emite outro sinal para os alto-falantes que o transformam em antirruído para promover a atenuação acústica do ambiente (LIMA, 2008).

A aquisição do sinal de referência então denota o tipo de estratégia utilizada. Os sistemas de controle *feedback* são aqueles em que o sinal é recebido após haver

interferência entre o ruído primário e o secundário. Os sistemas de controle feedforward são aqueles em que o sinal de referência é recebido diretamente na fonte primária. Nas Figuras 3 e 4 podemos ver o modelo *feedback* (LIMA, 2008).

2.3.1 CANCELAMENTO DE RUIDO ADAPTATIVO

O cancelamento de ruído adaptativo é indispensável, uma vez que alto nível de ruído pode causar sérios riscos à saúde dos humanos. O método convencional de cancelamento de ruído usa um sinal de entrada de referência que é passado através do filtro adaptativo para torná-lo igual ao ruído que é adicionado ao sinal de informação original.

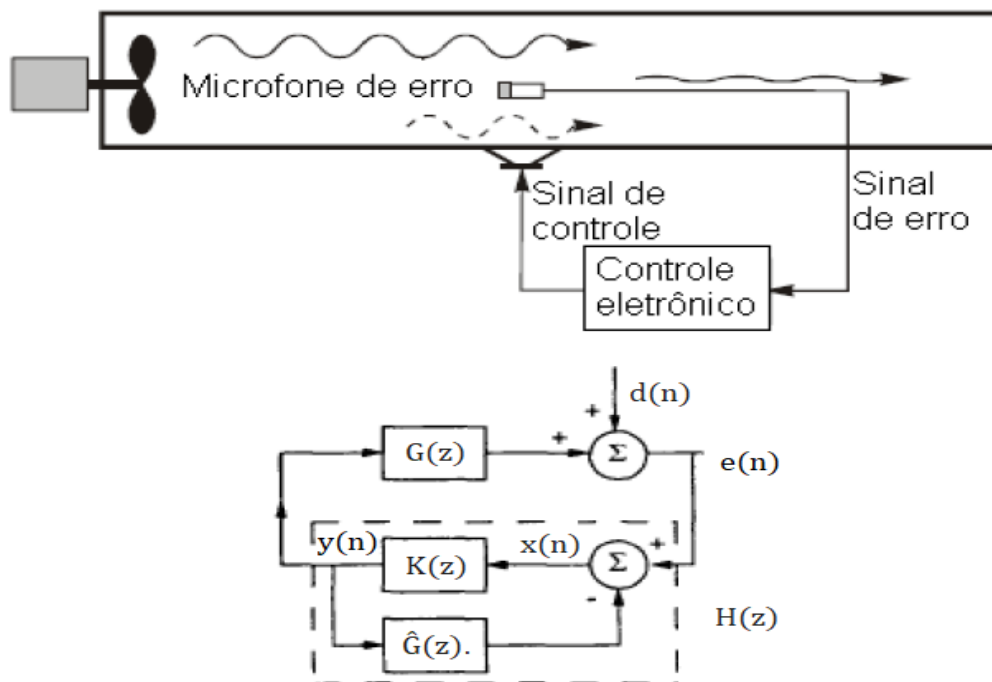
Assim, aplicam-se filtros que são implementados através de algoritmos adaptativos que atuam sobre o sinal para cada instante de tempo obtendo uma resposta de saída final com alterações ponto a ponto.

2.3.2 SISTEMAS DE CONTROLE FEEDBACK

O sistema *feedback* tem como ideia básica a de um ANC que estima o ruído primário (a ser cancelado) e o usa como um sinal de referência $x(n)$ de entrada para o filtro digital. A Figura 5 apresenta o modelo físico desse tipo de sistema e seu diagrama de blocos de controle, na qual $e(n)$ é o sinal obtido do microfone de erro, $d(n)$ é o ruído primário e $G(z)$ é o chamado caminho secundário. O ruído secundário pode sofrer modificações em seu caminho até ser amostrado como sinal de erro, um exemplo disso ocorre em interfaces Analógico/Digital (AD) pelas quais o sinal de erro passa ao ser gerado e amostrado.

O sinal $y(n)$ é o sinal secundário gerado pelo filtro adaptativo. Como na maioria dos casos o sinal de $G(z)$ é desconhecido, estima-se então $d(n)$ a partir de uma técnica chamada de síntese (regeneração) do sinal de referência, na qual o sinal secundário é filtrado pela estimativa do caminho secundário, \hat{G} , e então combinado com o sinal obtido no sensor de erro para regenerar o ruído principal (KUO; MORGAN, 1999).

Figura 5 - Modelo físico e diagrama de blocos de sistema *feedback*



Fonte: Adaptado de (HANSEN, 2003); (KUO, 1999).

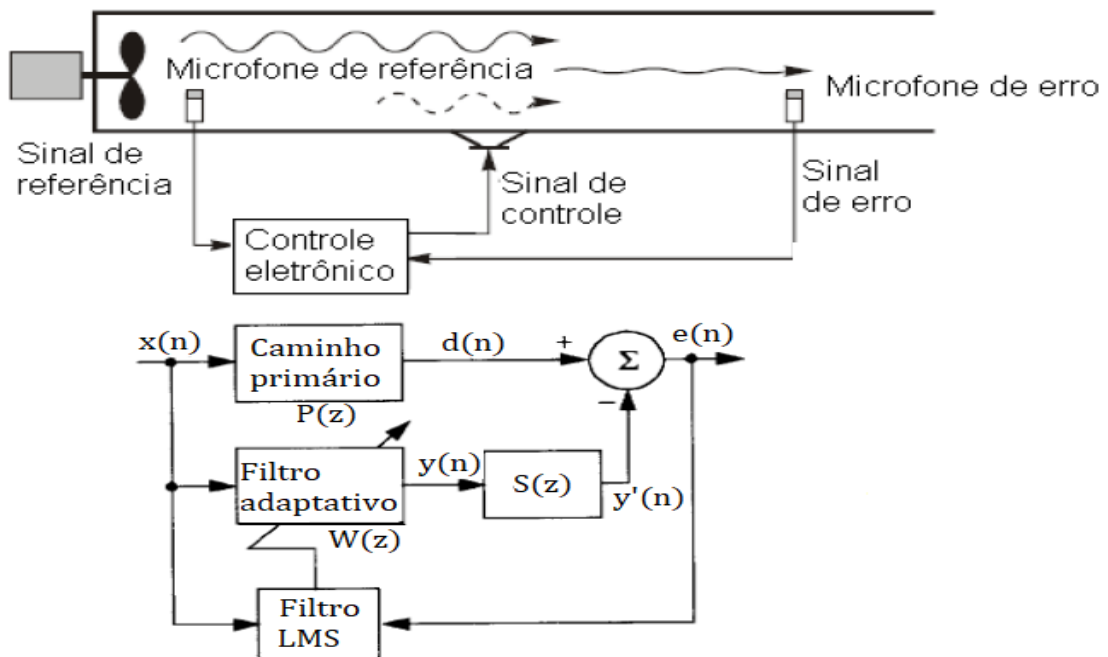
2.3.3 SISTEMAS DE CONTROLE FEEDFORWARD

O sistema *feedforward* é aquele em que, entre o sensor de referência e o sensor de erro da região na qual se pretende controlar o ruído, é inserido um filtro adaptativo utilizado para estimar a resposta acústica.

Neste sistema o sinal de referência é obtido diretamente na fonte de ruído; o sensor que capta o sinal acústico após a interferência entre ruído e antirruído é chamado de sensor de erro.

Esse tipo de controle tem como objetivo minimizar o ruído captado por esse sensor (KUO; MORGAN, 1999). A Figura 6 apresenta um modelo físico e uma esquematização desse tipo de sistema, na qual $e(n)$ é o sinal de erro captado, $P(z)$ é a resposta acústica local (chamada de caminho primário) que interfere no ruído primário, $S(z)$ é o caminho secundário (como no sistema de controle *feedback*), $W(z)$ é o filtro adaptativo e $x(n)$ é o ruído primário.

Figura 6 - Modelo físico e diagrama de blocos de sistema *feedforward*



Fonte: Adaptado de (KUO E MORGAN, 1999).

2.3.4 DIFERENCIAÇÃO DOS SISTEMAS

Sempre que sua aplicação é possível, os sistemas *feedforward* são utilizados. Isso ocorre porque o potencial de atenuação acústica é maior nesse sistema, que converge de forma muito mais rápida do que os sistemas *feedback*.

O antirruído emitido para cancelar o distúrbio primário ocorre de forma instantânea, graças à captação do sinal de referência direto da fonte. Com isso, a obtenção de um sinal de referência torna-se mais fácil de ser estudada.

2.4 FILTROS DIGITAIS

O objetivo dos filtros digitais é separar os sinais que foram combinados e restaurar os sinais que foram distorcidos. A separação desse sinal só é necessária quando esse for contaminado por alguma interferência, ruído ou outro sinal. Quando um sinal for distorcido por algum caminho que ele percorra sendo o secundário ou não essa restauração também é usada. Em geral, os filtros digitais são classificados como filtros Wiener e Kalman.

2.4.1 FILTRO DE WIENER

Um filtro Wiener é um filtro digital projetado para reduzir a diferença quadrática média entre um sinal desejado e a saída filtrada (DIXIT; NAGARIA, 2017). Esse, é denominado por filtro de erro quadrático médio mínimo.

Possui inúmeras aplicações como predição linear, cancelamento de eco, restauração de sinal, equalização de canais, entre outras.

Um filtro Wiener pode ser um filtro de resposta ao impulso de duração finita (FIR) ou um impulso de duração infinita (IIR). Geralmente, a formulação de um filtro Wiener FIR resulta em um conjunto de equações e tem uma solução de forma fechada, enquanto a formulação de um filtro Wiener IIR resulta em um conjunto de equações não lineares.

2.4.2 FILTRO DE KALMAN

O filtro de Kalman nada mais é do que uma ferramenta matemática que desempenha um papel importante em várias áreas, tais como na computação gráfica. Pode ser denominado como um conjunto de equações matemáticas que implementam um estimador que corrige o sinal ruidoso. Esse filtro é otimizado pois a variação do erro estimado é minimizada quando algumas condições presumidas são atendidas (DIXIT; NAGARIA, 2017).

Na última década, filtro de Kalman tem sido a área ativa de pesquisa e aplicação, particularmente na área de navegação assistida.

O filtro de Kalman é um algoritmo para o cálculo de estimativa de estados instantâneos de um sistema dinâmico linear perturbado por um ruído branco usando-se medidas linearmente relacionadas aos estados que também podem estar corrompidas por ruído branco.

Na prática o Filtro de Kalman é o conjunto de equações de estados, as quais contêm informações necessárias sobre o comportamento do sistema e permitem uma solução computacional e eficiente para o método dos mínimos quadrados.

2.4.3 FILTRO ADAPTATIVO

Um filtro adaptativo é um sistema com filtro linear que consiste em uma função de transferência contida por parâmetros variáveis e um meio de ajustar esses parâmetros de acordo com um algoritmo de otimização (SATHLER, 2009).

Filtros lineares adaptativos são sistemas dinâmicos lineares com estrutura e parâmetros variáveis ou adaptativos e tem a propriedade de modificar os valores de seus parâmetros durante o processamento do sinal de entrada, a fim de gerar sinal na saída que não possui componentes indesejadas, ruído ou degradação e sinais de interferência.

Ao contrário das técnicas convencionais de projeto de filtros, os filtros adaptativos não possuem coeficientes de filtro constantes e nenhuma informação a priori é conhecida. O filtro adaptativo ajusta seus coeficientes para minimizar um sinal de erro e pode ser denominado para FIR e IIR. Os filtros FIR tem a vantagem de sua implementação ser mais fácil, e convergir mais rápido, porém, para sistemas de respostas impulsivas longas a estrutura IIR têm uma melhor modelagem. Em ANCs, o caminho secundário tem uma resposta impulsiva relativamente curta, e assim o filtro FIR é a melhor escolha.

A maioria dos algoritmos adaptativos necessitam de modificações nos procedimentos iterativos padrões para que, a solução do problema de minimização da função custo em tempo real aconteça. Os algoritmos mais comuns de filtros adaptativos são os da família *Least Mean Square* (LMS) e o algoritmo *Recursive Least Square* (RLS).

2.5 ALGORITMO ADAPTATIVO

O algoritmo adaptativo é responsável por ajustar os coeficientes do filtro digital de modo que a atenuação alcançada seja a maior possível. Normalmente os algoritmos calculam valores para o filtro no instante $n+1$ e adiciona ao valor do filtro em um instante em uma porcentagem de um certo “erro”. Esse cálculo da função do

valor do sinal é erro ao quadrado (sendo assim, denominado algoritmos LMS – Least Mean Square).

Os algoritmos adaptativos mais populares são os Least Mean Square (LMS) juntamente à suas variações, Filtered-X LMS, NMLS e os Recursive Least Square (RLS). Os parâmetros do desempenho versus complexidade, quando se compara a eficiência dos algoritmos estão sintetizados na Tabela 1.

TABELA 1 - Parâmetros de desempenho dos algoritmos adaptativos

Parâmetro	LMS	nLMS	RLS
Convergência	Muito Lenta	Lenta	Rápida
Estabilidade	Pode ser estável	Pode ser estável	Pode ser instável
Complexidade	Muito Baixa	Baixa	Alta
Consumo (MIPS)	Muito Baixo	Baixo	Alto
Implementação	Muito Simples	Simples	Média/Complexa

Fonte: Adaptado de (DHIMAN, J.; AHMAD, S.; GULIA, K., 2013) e (TAKAYAMA et al., 2011).

2.5.1 ALGORITMO LEAST MEAN SQUARE (LMS)

Desenvolvido por Widrow e Holf, o algoritmo LMS utiliza um algoritmo de gradiente estocástico para adaptar a carga de um filtro (HAYKIN, 2002). Sua característica mais importante é sua simplicidade, representada por uma fácil implementação e uma baixa complexidade computacional.

Esta adaptação consiste no ajuste contínuo (e adaptativo) dos valores dos coeficientes do filtro, tendo como métrica a minimização do erro no sentido da média dos quadrados.

O algoritmo LMS é uma ótima solução nos filtros de Wiener tendo boa resposta quando os sinais a serem processados forem estacionários.

2.5.2 Mean Square Error (MSE)

O *MSE* é a figura de mérito que o algoritmo LMS deverá minimizar ao longo do tempo, sendo definido por

$$MSE = E(|e(n)|^2)$$

Com isso, espera-se que o algoritmo produza um conjunto de coeficientes definido pela equação de atualização, próximo ao conjunto de coeficientes do filtro a ser estimado (INGLE; PROAKIS, 2000).

2.5.3 ALGORITMO FILTERED-X LEAST MEAN SQUARE (FXLMS)

O algoritmo LMS tem convergência demorada para certas aplicações de controle ativo de ruído acústico, nessas aplicações, o caminho secundário tem uma resposta impulsiva relativamente curta, necessitando assim, de outro algoritmo para resolver esse problema, o Filtered-X LMS (SATHLER, 2009).

O algoritmo Filtered-X LMS, é baseado no gradiente de erro, e diferencia-se do algoritmo LMS apenas pelo fato de incluir uma versão filtrada do sinal de entrada com a resposta impulsiva do caminho secundário.

2.5.4 ALGORITMO NORMALIZED LEAST MEAN SQUARE (NLMS)

O algoritmo LMS Normalizado surgiu como um avanço do LMS (MITRA, 2003). O NLMS é uma implementação especial do algoritmo LMS básico, pois este apresenta problemas com sensibilidade a potência do sinal de entrada. Para resolver este problema, o LMS Normalizado emprega uma normalização do sinal de entrada, tornando-o imune a variação da potência do sinal na entrada do filtro. Sendo assim, o algoritmo seleciona um tamanho de passo normalizado tornando-o mais estável e convergente (SAPPER, 2007; JUNIOR, 2005).

2.5.5 ALGORITMO RECURSIVE LEAST SQUARE (RLS)

O algoritmo RLS é um algoritmo de estimação paramétrica utilizado em filtragem adaptativa, que computa coeficientes para o filtro relacionados à produção recursiva de mínimos quadrados do sinal de erro (MORAIS, 2007).

Esta técnica usa o conceito de ponto de estimação em vez de um intervalo de base para a estimação, isso faz com que o estimador convirja para o valor real mais rapidamente. O maior benefício de usar o algoritmo RLS é que não há a necessidade de inverter matrizes extremamente grandes, o que acarreta uma economia de tempo de processamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais que serão utilizados tais como os métodos para obtenção de futuros resultados.

3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA PROPOSTO

O sistema de controle ativo proposto visa fornecer o sinal utilizado para realizar o cancelamento de ruído. O sistema é básico, composto de um atuador, um controlador, um sensor de erro e um de referência.

O sistema implementado terá por objetivo o controle, em ambiente virtual, de um sistema ruidoso para um contato inicial com os filtros adaptativos e a aplicação de diferentes técnicas nesse sinal.

3.2 SIMULAÇÃO VIA MATLAB

O projeto será realizado com o auxílio do MATLAB (Matrix Laboratory), sendo este um software de alta performance voltado para processamento de sinais,

resolução de matrizes e cálculos numéricos. Com o auxílio do software, os sinais serão filtrados, processados e os resultados serão obtidos a fim de uma melhor análise técnica em dos resultados em estudo.

O software possui também ferramentas para processamentos de sinais e imagens, análises contínuas e discretas, abordagens ortogonais e redundantes, eliminação e compressão de ruído.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 ANÁLISE DAS TÉCNICAS LMS E NLMS

Para implementação do tema abordado no Trabalho de Conclusão de Curso o caso a ser estudado será a implementação de um filtro LMS e um NLMS para a eliminação ativa de ruído em um sinal de áudio. Os filtros são implementados no ambiente Simulink, e são detalhados no restante desta seção. O sistema conta com três variáveis de decisão: o tamanho do passo de adaptação definido por " μ ", a ordem e o tipo de filtro.

Os controles com fundamentação no algoritmo LMS podem ser descritos pelas seguintes etapas:

- 1 - Determinação do passo de adaptação do filtro (μ) e dos valores iniciais dos coeficientes do filtro;
- 2 - Leitura do sinal de áudio $x(n)$ e do erro de estimação $e(n)$;
- 3 - Obtenção de $x(n)'$ através da filtragem do sinal de referência $x(n)$ pela função transferência do caminho secundário;
- 4 - Atualização dos coeficientes do filtro;
- 5 - Cálculo da saída $y(n)$ utilizando os novos coeficientes do filtro adaptativo e o $x(n)$;
- 6 - Caso o valor de $e(n)$ não seja satisfatório repete-se o processo voltando ao início.

O diagrama de blocos também resulta nos coeficientes $w(n)$ do filtro resultante, que são adaptados a cada passo do algoritmo.

A saída $y(n)$ do filtro LMS é obtida por:

$$y(n) = \mathbf{w}^H(n)\mathbf{u}(n)$$

A equação acima pode ser chamada de filtragem, ela nos apresenta que o valor da saída $y(n)$ do filtro é adquirido através da multiplicação entre o vetor dos pesos estimados e o valor de entrada $u(n)$ do filtro. O erro de estimação é dado por

$$e(n) = d(n) - y(n)$$

de forma que o erro $e(n)$ é resultado da subtração do sinal desejado $d(n)$ e o sinal de saída do filtro $y(n)$. A adaptação dos coeficientes é dada por

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n - 1) + f(\mathbf{u}(n), e(n), \mu)$$

Por fim, a expressão matemática de adaptação dos coeficientes acima apresenta que o vetor dos pesos dos coeficientes do filtro são uma relação do vetor no instante de tempo passado amortecido e uma função baseada nos três parâmetros, entrada, erro, e tamanho de passo.

Para cada variação do algoritmo LMS, uma função $f(\cdot)$ diferente é utilizada para a lei de adaptação. Para o algoritmo adaptativo convencional LMS a função toma como valor, (Haykin, 2002):

$$f(\mathbf{u}(n), e(n), \mu) = \mu e(n)\mathbf{u}^*(n)$$

aplicando essa expressão a fórmula estudada, temos que:

$$\mathbf{w}(n) = \alpha\mathbf{w}(n - 1) + \mu e(n)\mathbf{u}^*(n)$$

Sendo μ o passo de adaptação. Em aplicações em que as características estatísticas do sinal de entrada são variantes no tempo é necessária a utilização de um controlador automático de ganho (CAG) para assegurar a estabilidade. O NLMS pode substituí-lo para essa situação, pois o passo de adaptação varia ao longo do tempo de forma inversa à norma ao quadrado (potência) do vetor de entrada (HAYKIN, 2002).

No algoritmo adaptativo normalizado NLMS a função $f(\cdot)$ é descrita por, (Haykin, 2002):

$$f(\mathbf{u}(n), e(n), \mu) = \frac{e(n)\mathbf{u}(n)}{\varepsilon + \mathbf{u}^H(n)\mathbf{u}(n)}$$

resultando na lei de adaptação:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{e(n)\mathbf{u}(n)}{\varepsilon + \mathbf{u}^H(n)\mathbf{u}(n)}$$

O coeficiente ε é uma constante positiva de valor muito pequeno, introduzida no algoritmo visando evitar divisão por zero e estabilizar a solução quando a potência do sinal de entrada é muito baixa (SAYED, 2009).

É importante ressaltar que o passo de adaptação é um importante parâmetro do sistema de controle, pois a convergência do sinal de erro está diretamente relacionada a este. Recomenda-se que μ esteja dentro do intervalo definido pela equação:

$$0 < \mu(n) < \frac{2}{M \cdot R}$$

onde M é o tamanho do filtro utilizado (quantidade de pesos) e R é a matriz de auto correlação do sinal de referência. O μ denota o passo de adaptação que controla a velocidade de convergência do algoritmo, quanto maior o μ , mais rápido o algoritmo converge, em contrapartida, quanto mais rápido o algoritmo converge, maior o erro em relação ao sinal original (MASIERO, 2007).

A curva de aprendizagem descreve a evolução do erro quadrático médio (EQM) de um algoritmo adaptativo, (Sayed, 2009), a curva de aprendizagem em um algoritmo NLMS é dada por:

$$J(n) = J_{min} + J_{ex}(n)$$

sendo completamente caracterizada se a potência do ruído de medição, os autovalores da matriz de autocorrelação do sinal de entrada e o vetor $k'(n)$ forem conhecidos. Que é uma medida baseada na matriz de covariância do erro de estimação, que é ligada à potência do ruído de medição.

Para medir a qualidade do cancelamento dos ruídos, é utilizada a métrica SNR. O SNR é definido como a relação sinal ruído, esse valor é um termo que se baseia na razão entre a potência do sinal fundamental e o ruído intrínseco no sinal. Essa relação é definida por:

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}}$$

O sinal e o ruído devem ser medidos no mesmo intervalo de tempo para que se possa receber uma relação SNR correta. Se isso ocorrer a obtenção do SNR pode ser obtida através da amplitude dos sinais, sendo:

$$SNR = \left(\frac{A_{sinal}}{A_{ruído}} \right)^2$$

Pelo fato de que muitas das razões sinal-ruído serem de faixa dinâmica, esses são geralmente expressos usando escala logarítmica de decibel. Baseado nessa definição, o sinal e ruído podem ser expressos por:

$$P_{sinal,dB} = 10 \log_{10}(P_{sinal}),$$

$$P_{ruído,dB} = 10 \log_{10}(P_{ruído})$$

Aplicando ao SNR, temos:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right)$$

A Energia do Erro Estimado (EEE) é definida pela somatória do MSE, essa energia representa a quantidade de energia do erro do LMS e NLMS, quanto maior a energia, mais erro o sinal filtrado carrega. Essa energia é definida por:

$$EEE = \int_0^N (e(n) - d(n))^2 dn$$

Sendo N o tamanho do vetor.

Tendo como objetivo a análise dos filtros acima citados, os dois parâmetros, SNR e EEE nos apresentarão os resultados para assim, entender as características, qualidades e defeitos de cada filtro.

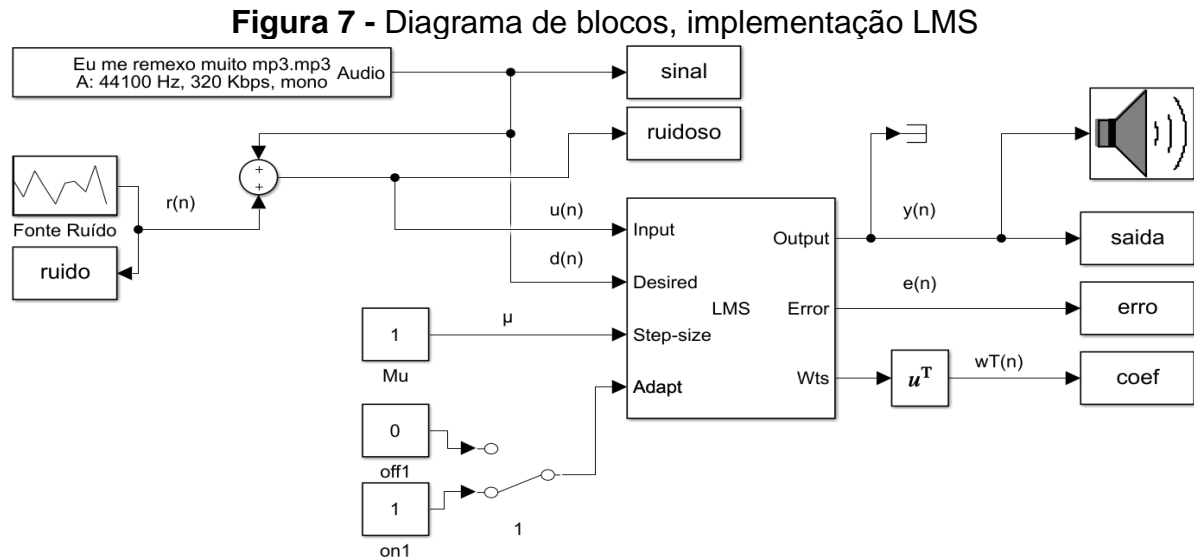
4.2 PROJETO IMPLEMENTADO

No sistema de controle apresentado na Figura 8, pôde-se ler e estudar o sistema de controle ativo LMS, os sinais já abordados anteriormente se fazem presente neste. O bloco do filtro LMS foi implementado junto aos blocos de sinal e o bloco de ruído afim de extrair os dados para se entender como o mesmo funciona, esse bloco LMS possui dentro dele, fórmulas já definidas pelo próprio ambiente Matlab que fazem com que o diagrama seja mais simplista, precisando apenas que se alterem os valores de entrada para que ele entregue o sinal de saída já filtrado.

Esse sistema apresenta as seguintes interfaces: a entrada "*Input*", que corresponde ao sinal contaminado por ruído; a entrada "*Desired*" que recebe o sinal de referência $d(n)$ do filtro; a entrada "*Step-size*" recebe o passo de adaptação; e "*Adapt*", que recebe um sinal lógico que habilita ou desabilita o mecanismo interno de adaptação. O sinal de entrada utilizado neste trabalho é um trecho de 10s de uma música, que possui uma característica de periodicidade, bem como um súbito aumento de seu volume nos instantes finais. O sinal é amostrado a 44100Hz a uma taxa de 320Kbps.

Dentro desse diagrama, os sinais de saídas do filtro, também estão presentes, o sinal $y(n)$ é o sinal de saída do filtro, que é também ligado ao alto-falante. Escuta-se nitidamente a ação do filtro sobre o sinal ruidoso. O sinal do erro $e(n)$ também está

presente na saída do filtro, esse é um sinal crucial para a adaptabilidade do filtro, e por fim o sinal dos coeficientes do filtro.



Fonte: Autoria Própria

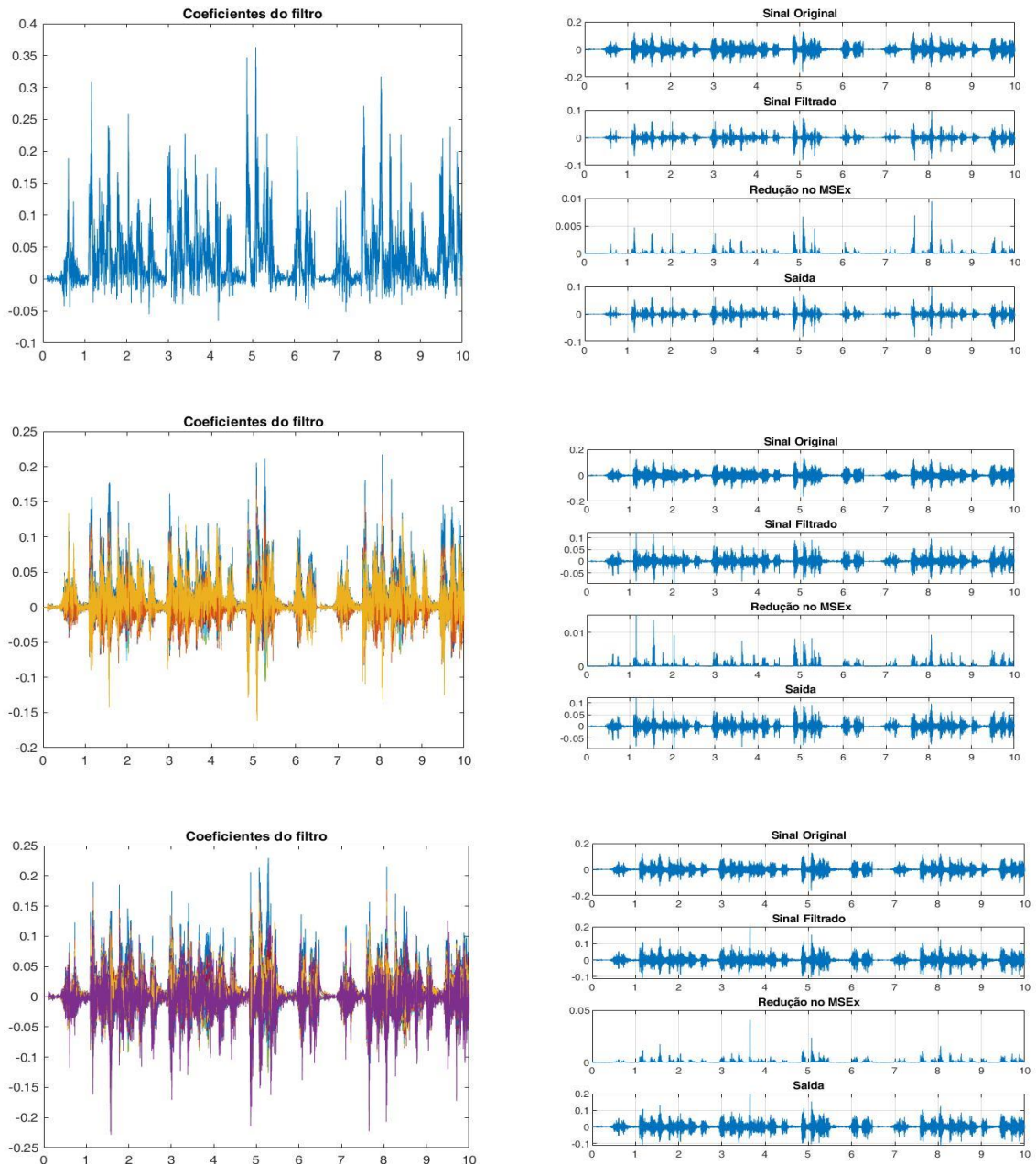
Na Figura 9, tem-se os primeiros resultados recebidos através da simulação do software. Nela, o sinal de ruído $r(n)$ é um sinal aleatório gaussiano branco, porém para cada iteração um novo sinal de ruído aleatório diferente foi gerado, com mesma amplitude máxima. Diversas combinações dos valores de passo μ e de ordem do filtro M foram testadas, conforme apresentado na Tabela 1 e alguns dos resultados estão apresentados na Figura 9 e na Figura 11.

Os gráficos obtidos do algoritmo LMS provam que o valor do sinal filtrado é muito próximo do valor do sinal original, sendo que o MSE_x não passa de 0,1 e a energia do erro estimado não passa de 0,034. É possível notar que o módulo dos coeficientes do filtro de ordem 1 é maior do que do filtro de ordem 10, mas há pouca diferença entre a magnitude dos coeficientes do filtro de ordem 10 e ordem 32. Tal observação poderia indicar que há pouca diferença entre filtros com ordem acima de 10, porém é possível perceber a melhoria obtida com ordens maiores a partir das outras informações. Um filtro de ordem 32 apresenta os maiores valores de SNR para o caso LMS, chegando próximo a -16,36, indicando a maior capacidade de rejeição de ruídos.

Também é possível perceber a redução nos valores da energia do erro estimado, que decresce principalmente em comparação ao filtro de ordem 1, que por

sua vez apresenta os piores resultados, como esperado. Pela Tabela 1, também é possível perceber que a taxa de adaptação tem pouca influência nos resultados obtidos, sendo, portanto, a ordem do filtro o parâmetro de maior importância na determinação do sistema de cancelamento de ruídos.

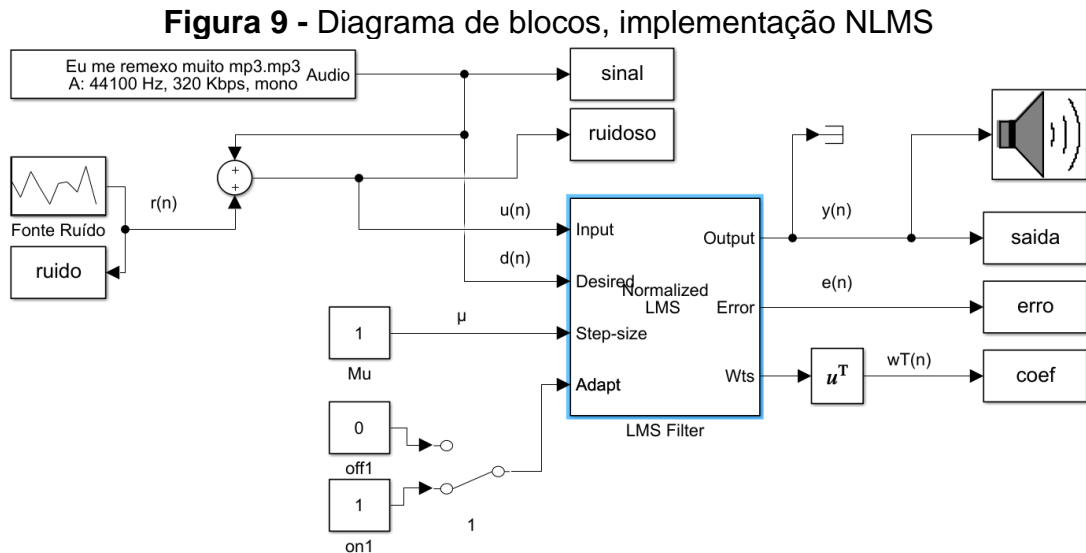
Figura 8 - Gráficos de implementação do LMS, (ordem 1 e $\mu = 0,5$, ordem 10 e $\mu = 0,7$, ordem 32 e $\mu = 1$)



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 10 é ilustrado o diagrama de blocos para o filtro com regra de adaptação NLMS, cujos resultados podem ser comparados aos obtidos pelo LMS. No

filtro NLMS os valores de entrada do filtro, ordens do filtro e tamanho do passo foram parametrizados para buscar uma relação entre o filtro LMS e o filtro NLMS.



Fonte: Autoria Própria

Algumas peculiaridades foram observadas com o filtro NLMS de ordem 1. É possível perceber na Figura 11 que o filtro não convergiu, gerando coeficientes de alta magnitude. Como resultado, o sinal filtrado apresentou uma diferença considerável em relação ao sinal original, como pode ser observado tanto na Figura 11 quanto na Tabela 1. Note também os valores de SNR, que neste caso foram altos uma vez que a potência do sinal de saída é maior devido à divergência do filtro, não indicando necessariamente uma boa rejeição de ruído. Por isso é importante analisar não só a medida SNR, mas também a MEE, para que se determine quando houve divergências no procedimento. Por fim, vale ressaltar que a divergência ocorreu para todos os valores de μ testados.

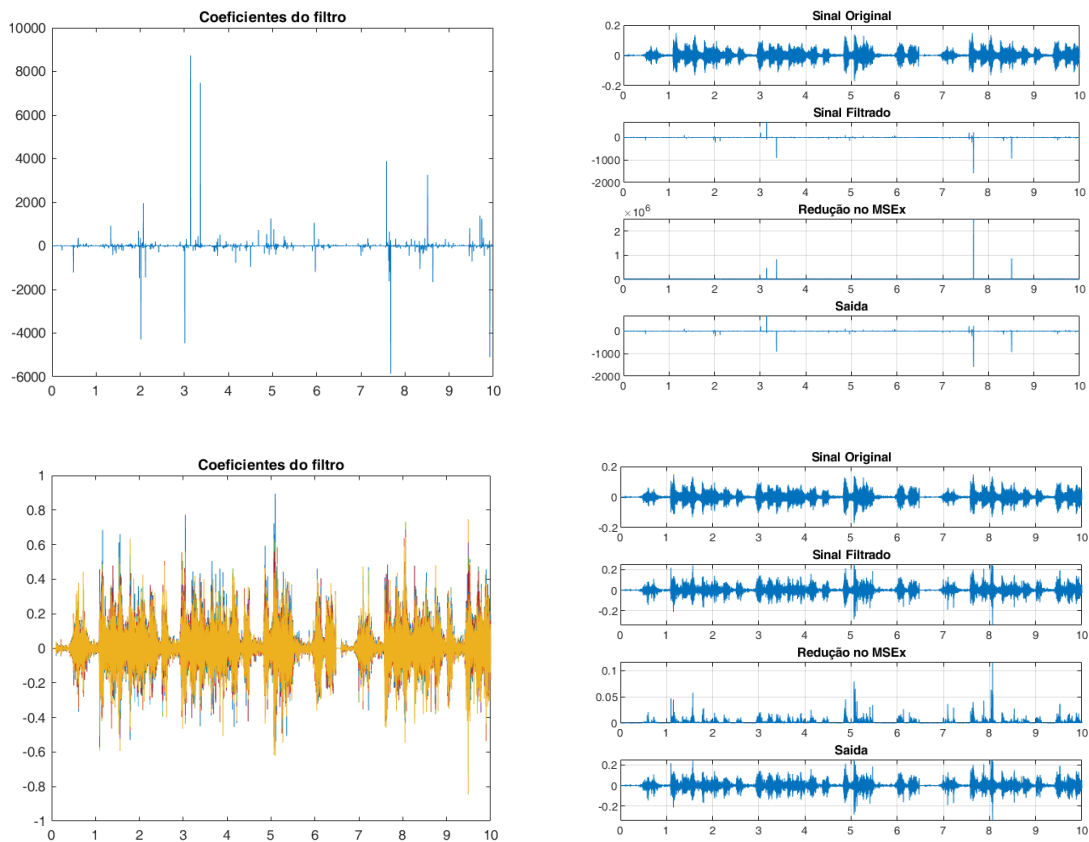
Com o aumento da ordem do filtro, pode-se notar que a relação SNR ficou mais próxima de zero para um maior tamanho de passo, porém a energia do erro estimado ficou maior para o maior aumento de passo também. Isso ocorre porque o filtro não atua de forma linear, ou seja, quanto menor o passo melhor a qualidade do filtro ou menor o erro estimado. Cada filtro tem seu melhor desempenho baseado no sinal de entrada.

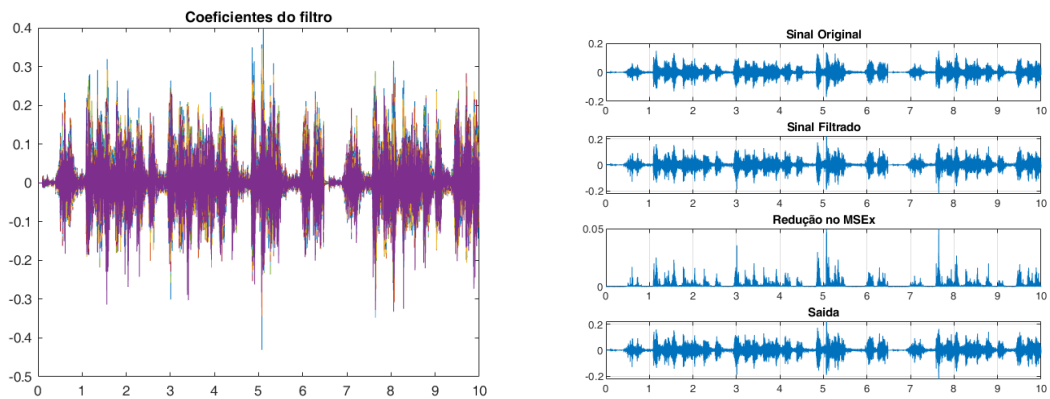
Ao analisar os resultados obtidos, concluiu-se que, para o áudio testado e para o tipo de ruído considerado, o melhor resultado foi obtido para o filtro LMS de ordem 32 e passo $\mu = 1$. Esse resultado é esperado devido à característica do sinal

considerado, uma vez que, no algoritmo NLMS, a alteração nos valores dos coeficientes do filtro é proporcional à energia do sinal de entrada (devido à normalização aplicada). Como sinais de áudio são compostos por intervalos de pausa, isso faz com que haja uma grande flutuação nos valores dos coeficientes, o que pode prejudicar o algoritmo. Tal efeito pode ser atenuado se um passo μ variante no tempo, de acordo com o sinal de entrada, fosse utilizado, o que normalmente é indicado para este tipo de filtro (SAYED, 2009).

Por fim, dentre as configurações do LMS, era esperado que um filtro de ordem maior resultasse em melhores resultados, uma vez que filtros de ordem maior contêm os modelos de menor ordem, portanto a eficácia de um filtro de ordem 32 seria, no pior caso, equivalente a um filtro de ordem 10. Por outro lado, filtros de ordem maior resultam em maior custo de projeto, porém tal critério não foi considerado na análise do presente trabalho.

Figura 10 - Gráficos de implementação do NLMS, (ordem 1 e $\mu = 0,5$, ordem 10 e $\mu = 0,7$, ordem 32 e $\mu = 1$)





Logo abaixo a Tabela 2 apresenta os valores de todos os SNR e EEE, para todas as simulações realizadas.

Tabela 2 - Tabela de dados, filtros LMS e NLMS

LMS			NLMS		
Ordem		1	Ordem		1
mu	SNR	EEE	mu	SNR	EEE
0,5	-24,2995	0,034	0,5	33,8010	240
0,7	-23,8792	0,034	0,7	30,5380	113
0,9	-23,4771	0,034	0,9	41,0867	128
1	-23,1565	0,034	1	53,1724	107
Ordem		10	Ordem		10
mu	SNR	EEE	mu	SNR	EEE
0,5	-21,1326	0,026	0,5	-16,1398	0,0036
0,7	-20,2734	0,026	0,7	-14,9985	0,0042
0,9	-19,8648	0,026	0,9	-13,8837	0,005
1	-19,7959	0,026	1	-13,2989	0,0055
Ordem		32	Ordem		32
mu	SNR	EEE	mu	SNR	EEE
0,5	-17,8066	0,023	0,5	-17,8066	0,023
0,7	-17,1463	0,023	0,7	-15,5058	0,0032
0,9	-16,5531	0,023	0,9	-14,6175	0,0036
1	-16,3638	0,023	1	-14,1307	0.0039

Fonte: Autoria Própria

5 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi simular e analisar uma estrutura de testes para um sistema ANC, utilizando versões derivadas dos algoritmos LMS e NLMS. A maior parte dos objetivos definidos foi cumprida e um sistema simulado funcional foi construído.

No mais, conhecimentos adicionais foram obtidos como o entendimento de tecnologias como, por exemplo, microfones, microcontroladores e amplificadores operacionais. Também foram adquiridas novas compreensões de programação, processamento digital de sinais e processamento de áudio.

Neste projeto, foi feita uma tentativa de se apresentar as diferenças entre os diferentes modos de controles adaptativos. O maior dos problemas apresentado ocorreu na estabilidade do sistema, a simulação do filtro NLMS nos mostrou que quando o filtro se torna instável, todos os parâmetros dele se perdem.

Ainda há muito o que aprender sobre as diversas estruturas possíveis de cancelamento de ruído, mas este trabalho apresentou uma base para que isso seja possível no futuro. Também deve-se buscar técnicas na literatura da área para superar as dificuldades enfrentadas na implementação simulada do sistema.

O algoritmo de controle foi validado utilizando o Matlab, para a implementação dos dois tipos de controle, o sinal filtrado respondeu de maneira satisfatória.

Para valores muito pequenos de μ , o filtro demora para convergir, impossibilitando graficamente a apresentação de dados.

Por fim, o trabalho de conclusão de curso viabilizou novos aprendizados em uma área ainda pouco explorada dentro do mundo da engenharia elétrica, subáreas como redução de ruídos para fones e cancelamento de ruídos para grandes áreas poderão no futuro causar um grande impacto na humanidade.

REFERENCIAS

BORGES, R. C. **Uma proposta para a redução do efeito de oclusão em aparelhos auditivos**. 2017. Monografia (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

BROPHY, J. J.; MCGRAW-HILL. Basic electronics for scientists. ISBN, 1990.

COAN, J. J. **Controle Misto de Vibrações em Viga Metálica utilizando Neutralizadores Viscoelásticos e Filtros Adaptativos: Caso Harmônico**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

DHIMAN, J.; AHMAD, S.; GULIA, K. **Comparison between Adaptive filter Algorithms (LMS, NLMS and RLS)**. *International Journal of Science*, 2013.

DIRECTIVA DO PARLAMENTO EUROPEU. **Prescrições mínimas de segurança e de saúde em matéria de exposição dos trabalhadores aos riscos devidos aos agentes físicos**. Directiva 2003/10/CE do Parlamento Europeu. Disponível em: <http://www.cochlea.org/po/ruído>. Acesso em: 12 nov. 2018.

DIXIT S.; NAGARIA D. **LMS Adaptive Filters for Noise Cancellation: A Review**. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Amity University, Noida, 2017.

ELLIOT, S. J.; NELSON, P. A. **Active noise control: low-frequency techniques for suppressing acoustic noise leap forward with signal processing**. *IEEE Signal processing magazine*, vol. 10, pp.12-35, outubro, 1993.

HAYKIN, S. **Adaptive Filter Theory**, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.

HAYKIN, S.; WIDROW, B. **Least Mean Square adaptive filters**. John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2003.

KUANG-HUNG; LIANG-CHIEH et al. **Active Noise Cancellation Headsets**, 2008.

KUO, S. M.; MORGAN, D.R. **Active noise control: A tutorial review**. *Proceedings of the IEEE*, 87(6): 943-973, junho, 1999.

LIEBICH, S. et al. **Active Noise Cancellation in Headphones by Digital Robust Feedback Control**. European Signal Processing Conference, RWTH Aachen University, 2016.

LIMA, L. G. B. S. **Controle ativo de ruído em uma cabine de automóvel**. Universidade São Paulo: São Paulo, PR, Brasil, 2008.

MARQUES, P. A. C. **Introdução à filtragem adaptativa**. Departamento de Engenharia de Eletrônica e Telecomunicações e de Computadores, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2007.

MASIERO, B. S. **Controle ativo de ruído para transformadores de potência em campo**, 2007. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MITRA, S. K. **Digital Signal Processing: a computer-based approach**. 3rd.ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.

MORAIS, R. U. **Estimação paramétrica utilizando algoritmo RLS**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2007.

OLSON, H. F.; MAY, E. G., 2007. **Electronic sound absorber**. Journal of the Acoustical Society of América, vol 25, pp.1130-1136, 1953.

SAMBUGARI, S. L. J. **Aplicação de filtro de kalman para filtragem de rede elétrica**. Artigo: Universidade Estadual de Londrina: Londrina, PR, Brasil, 2016.

SAPPER, A. N. **Estudo de algoritmos heurísticos para filtros digitais adaptativos**. Programa de Pós-Graduação – Escola de Informática, Universidade Católica de Pelotas, 2007.

SATHLER, C. S. F. **Controle ativo de ruído**. Dissertação: Universidade Federal do Paraná: UFPR, Curitiba, 2009.

SAYED A. H. **Adaptive Filters**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009

TAKAYAMA, D. K. et al. **Implementação eficiente de filtros adaptativos utilizando a plataforma TSM320C6713**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **1.1 billion people at risk of hearing loss**. 2015. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2015/ear-care/en/>. Acesso em: 15 nov. 2018.