

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS  
PARA A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

DIEGO FELIPE VIEIRA TEIXEIRA

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDO  
APLICADO EM UM VEÍCULO AUTOMOTOR**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA  
2017

DIEGO FELIPE VIEIRA TEIXEIRA

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDO  
APLICADO EM UM VEÍCULO AUTOMOTOR**

Monografia de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para a Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Pinho.

CURITIBA  
2017



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Curitiba

DIRPPG  
DAELN  
CESEB



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDO APLICADO EM UM VEÍCULO AUTOMOTOR**

por

**DIEGO FELIPE VIEIRA TEIXEIRA**

Esta Monografia foi apresentada em 12 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para a Indústria Automotiva. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

**Prof. Dr. Antônio Carlos Pinho**  
Orientador

---

**Prof. MSc. Omero Francisco Bertol**  
Membro

---

**Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas**  
Coordenador do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Gostaria de deixar registrado o meu reconhecimento à minha família, pois sem o apoio deles, durante toda a trajetória da minha formação, dificilmente eu venceria este desafio.

Agradeço a todos aos meus amigos, colegas de trabalho e pessoas que que conviveram comigo durante este curso.

Agradeço a todo o corpo docente do CESEB e da UTFPR pela excelente formação que me proporcionaram no decorrer destes semestres.

Aos meus colegas de curso.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste projeto e conclusão da minha especialização.

Whether you think you can or you think you can't,  
you're right!  
(FORD, Henry)

Se você pensa que consegue ou pensa que não  
consegue, você está certo!  
(FORD, Henry)

## RESUMO

TEIXEIRA, Diego Felipe Vieira. **Projeto de um Sistema de Controle Ativo de Ruído Aplicado em um Veículo Automotor**. 30 páginas. Monografia (Curso de Especialização em Sistemas Embarcados Para a Indústria Automotiva), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A intensidade de ruído sonoro no interior da cabine sempre foi um fator importante no apelo geral de um veículo. Com a proliferação de sistemas de entretenimento e comunicação integrados à veículos, a importância de um interior mais silencioso tornou-se ainda mais pronunciada. Os fabricantes de automóveis estão tomando medidas significativas para criar um ambiente silencioso dentro da cabine dos veículos. Métodos antigos de amortecimento de som através de isolamentos adicionais não são muito efetivos e aumentam consideravelmente o peso e o custo do veículo. Como resultado, os fabricantes de componentes automotivos estão voltando suas pesquisas no isolamento acústico por meios eletrônicos, como os sistemas de Controle Ativo de Ruído (ANC) para atenderem esses desafios com baixos custos. Com o intuito de contribuir nas pesquisas de tecnologias de ANC aplicadas à veículos automotores, este trabalho propõe o projeto de um filtro adaptativo ativo utilizando o método dos mínimos quadrados (LMS) no tratamento de sinais de ruído que adentram à cabine de um veículo automotor.

**Palavras chave:** ANC. Ruído. Automotivo. LMS.

## **ABSTRACT**

TEIXEIRA, Diego Felipe Vieira. **Project of a Active Noise Cancelling System Applied to a Engine Propelled Vehicle.** 30 pages. Final Course Assignment (Specialization Course in Embedded Systems for the Automotive Industry), Electronics Academic Department, Federal University of Technology - Parana. Curitiba, 2017.

The level of interior cabin sound has always been an important factor in the overall appeal of a vehicle. With the proliferation of in-vehicle entertainment and communication systems, the importance of a quieter interior has become even more pronounced. Car manufacturers are taking significant steps to create a quiet ambient inside the vehicles cabin. Legacy methods of dampening sound through additional insulation are not very and they increase the weight and cost of the vehicle. As a result, automotive parts suppliers are turning their researchs on the sound insulation using electronic solutions, such as the Active Noise Control (ANC) systems to reach this challenge with low costs. With the aim of contributing to the research of ANC technologies applied to motor vehicles, this work proposes the design of an active adaptive filter using the least squares method (LMS) in the treatment of noise signals that enter the cabin of a motor vehicle.

**Keywords:** ANC. Noise. Automotive. LMS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos de um filtro adaptativo.....	16
Figura 2 – Comparação entre os sinais de fala .....	18
Figura 3 – Erro entre os sinais de fala real e estimado através do filtro LMS .....	19
Figura 4 – Comparação entre o sinal de ruído e o sinal de interferência destrutiva.....	19
Figura 5 – Evolução dos coeficientes do filtro LMS no tempo .....	20
Figura 6 – Gráfico do sinal de áudio no tempo de um Sandero Sport R.S. 2.0 na estrada.....	21
Figura 7 – Gráfico do espectro em frequência do áudio de um Sandero Sport R.S. 2.0 na estrada. ....	22
Figura 8 – Diagrama funcional do sistema ANC projetado .....	23
Figura 9 – Fluxograma do sistema ANC projetado .....	24
Figura 10 – Gráfico do sinal da música The Sound of Silence no tempo.....	25
Figura 11 – Espectro do sinal da música The Sound of Silence .....	26
Figura 12 – Gráfico do sinal sonoro total no interior do veículo sem filtro LMS .....	26
Figura 13 – Espectro do sinal sonoro total no interior do veículo sem filtro LMS.....	27
Figura 14 – Gráfico do sinal sonoro filtrada resultante após utilização do filtro LMS .....	28
Figura 15 – Espectro do sinal sonoro filtrada resultante após utilização do filtro LMS.....	28
Figura 16 – Diferença entre o sinal da música real e o sinal estimado no tempo .....	29
Figura 17 – Evolução dos Coeficientes do Filtro LMS no Tempo.....	30



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANC	<i>Active Noise Cancelling</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
LMS	<i>Least Mean Square</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	PROBLEMA	11
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	JUSTIFICATIVA	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
<b>2</b>	<b>CONTROLE ATIVO DE RUÍDO (ANC)</b>	<b>15</b>
2.1	ESTRUTURA BÁSICO DE UM FILTRO ADAPTATIVO	15
2.2	ALGORÍTIMO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (LMS)	16
2.3	SIMULAÇÃO DO FILTRO LMS	17
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE RUÍDOS SONOROS EM UM VEÍCULO</b>	<b>20</b>
3.1	AQUISIÇÃO DOS SONS EMITIDOS POR UM VEÍCULO REAL	20
<b>4</b>	<b>PROJETO DE UM FILTRO LMS PARA UM VEÍCULO</b>	<b>22</b>
4.1	DIAGRAMA FUNCIONAL DO PROJETO	22
4.2	ALGORITMO LMS APLICADO	23
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.</b>	<b>24</b>
5.1	AUDIO NO INTERIOR DO VEÍCULO SEM RUÍDO	24
5.2	AUDIO NO INTERIOR DO VEÍCULO COM INTERFERÊNCIA DE RUÍDO	26
5.3	SINAL FILTRADO RESULTANTE	27
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>31</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com as novas exigências de consumo de combustíveis, normas regulamentadoras de emissões de carbono e as tendências do mercado consumidor em adquirir veículos cada vez mais econômicos, os fabricantes de automóveis desenvolveram uma variedade de medidas. Estas incluem o controle variável dos cilindros do motor, como por exemplo a desativação de cilindros sob condições de baixa carga no motor, operando o motor em baixa rotação e reduzindo materiais passivos de amortecimento com a finalidade de reduzir o peso do veículo (MASUDA, 2003).

Essas ações contribuem diretamente na economia de combustível, porém elas frequentemente resultam em ruídos excessivos no interior do veículo. Os ruídos originários do motor induzem tons em baixa frequência (menores do que 150 Hz) dentro da cabine que podem causar fadiga ao condutor e aos passageiros. Os ruídos são proporcionais à velocidade do veículo e são frequentemente causados pelo aumento da energia vibratória do motor ou do trem de transmissão, que é transferido como energia acústica para dentro da cabine. Isso ocorre durante acelerações e desacelerações normais ou em velocidades de cruzeiro quando os cilindros são desativados. A redução dos materiais passivos de controle de ruído apenas intensifica o problema (BOHN,2004).

Para tratar desses ruídos, as montadoras estão iniciando a utilização de tecnologias que aplicam técnicas de controle de ruído ativo (ANC, do inglês *Active Noise Cancellation*), uma abordagem efetiva para reduzir o ruído do motor na cabine.

O presente trabalho desenvolverá um estudo sobre as técnicas de controle de ruído ativo em estudo que podem ser aplicadas à indústria automotiva, onde também será projetado um sistema para redução de ruídos externos utilizando o ANC.

## 1.1 PROBLEMA

O caso de estudo será realizado em um veículo de motor a combustão, para o qual será projetado um sistema de controle de ruídos sonoros indesejados no interior da cabine.

Em resposta às necessidades do mercado na criação de automóveis mais econômicos, a indústria automotiva iniciou o desenvolvimento de veículos fabricados com materiais mais leves e a aplicação de técnicas de economia de combustível, tal como a desativação de cilindros do motor, conversores de torque, entre outros. Tais medidas resultam no aumento de ruídos internos na cabine do veículo provenientes do motor, os quais podem causar fadiga ao condutor e prejudicar a imagem da marca. Equipamentos automotores pesados, tais como tratores e escavadeiras, podem causar doenças funcionais graves, e até mesmo a perda parcial da audição, aos seus operadores por estarem diretamente expostos a altos níveis de ruído no interior do habitáculo durante as jornadas de trabalho.

Devido a esses problemas, técnicas de controle ativo de ruído estão sendo pesquisadas para diminuir a exposição do condutor de veículos automotores a ruídos provenientes do motor. Essas técnicas funcionam através da geração de interferências sonoras destrutivas em um sistema de malha fechada, empregando modelos de processamento digital de sinais e sistemas de tempo real.

No contexto acima apresentado, pretende-se verificar a eficácia da utilização dos métodos de Controle Ativo de Ruído (ANC) em veículos automotores com a finalidade de proporcionar maior conforto aos usuários.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Demonstrar a eficácia da aplicação da técnica de Controle Ativo de Ruído (ANC) em um veículo com a finalidade de reduzir dentro da cabine os ruídos provenientes de fontes externas, principalmente do motor, e prover maior conforto acústico aos seus usuários.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a aquisição de sinais sonoros no interior de um veículo em movimento a fim de estudar os ruídos sonoros que adentram à cabine;
- Desenvolver um sistema ativo para a redução de ruídos, emitindo ondas sonoras com interferência destrutiva;

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Visto o grau de importância da diminuição de ruídos internos em veículos de uso pessoal e máquinas de trabalho, faz-se importante desenvolver equipamentos eletrônicos que atuem ativamente na redução destes. Apesar da complexidade em seus desenvolvimentos, estes dispositivos apresentam grande vantagem em relação aos elementos mecânicos passivos utilizados hoje na maior parte dos automóveis, não agregando peso aos veículos, apresentando facilidade para a montagem e sendo mais eficazes na redução de ruídos comparados aos elementos de redução passivos, tais como tapetes e espumas acústicas.

O conforto é um dos principais critérios de seleção na compra de um novo veículo pela maior parte dos clientes. Um carro mais silencioso, além de mais leve e econômico, possui um alto valor agregado e gera uma boa imagem de marca frente aos usuários. Outra importante aplicação dessas técnicas é na redução de casos de doenças funcionais auditivas em motoristas e operadores de veículos pesados.

Conclui-se, portanto, que as aplicações de técnicas de Controle Ativo de Ruído (ANC) são altamente necessárias e apresentam grandes benefícios às montadoras e usuários.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho terá a estrutura abaixo apresentada.

**Capítulo 1 - Introdução:** serão apresentados o tema, o problema, os objetivos da pesquisa, a justificativa e a estrutura geral do trabalho.

**Capítulo 2 – Controle Ativo de Ruído (ANC):** será apresentado a técnica de filtragem adaptativa de controle ativo de ruído denominada LMS.

**Capítulo 3 – Análise de Ruídos Sonoros Em Um Veículo:** será abordado o comportamento, intensidade e banda de frequência dos ruídos sonoros presentes em um veículo.

**Capítulo 4 – Projeto de um Filtro LMS Para um Veículo:** será desenvolvido um sistema de ANC com base nos dados amostrados em um veículo real.

**Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados:** tendo como base os procedimentos metodológicos, neste capítulo serão descritos os resultados obtidos através de simulações realizadas por software aplicando a técnica proposta.

**Capítulo 6 – Considerações finais:** serão retomados a pergunta de pesquisa e os seus objetivos e apontado como foram solucionados, respondidos, atingidos, por meio do trabalho realizado. Além disto, serão sugeridos trabalhos futuros que poderiam ser realizados a partir do estudo realizado.

## 2 CONTROLE ATIVO DE RUÍDO (ANC)

Ruídos acústicos indesejados são um subproduto de muitos processos industriais, equipamentos e sistemas. No Controle Ativo de Ruído (ANC, do inglês: *Active Noise Cancellation*), uma fonte de ruído secundária é adicionada para gerar um campo acústico que interfira destrutivamente no ruído indesejado, e, portanto, atenuando-o (WARNAKA, 1984) (ZANGI, 1993). Tipicamente, as medições dos sinais do ruído indesejado são realizadas em um ou mais locais utilizando um ou múltiplos sensores, e os sinais de cancelamento são gerados baseados nessas medições. O presente trabalho demonstrará o projeto de um sistema de ANC, aplicadas no interior de um automóvel, para a eliminação de ruídos externos, utilizando o algoritmo adaptativo mínimos quadrados LMS (abreviado do inglês: *Least Mean Squares*).

### 2.1 ESTRUTURA BÁSICO DE UM FILTRO ADAPTATIVO

Um filtro adaptativo é em sua essência um filtro digital com características de auto ajuste. Ele consiste de duas partes distintas, as quais são um filtro digital com coeficiente ajustáveis, e um algoritmo adaptativo, o qual é utilizado para ajustar ou modificar os coeficientes do filtro, como demonstrado na figura 1, onde dois sinais de entrada  $d(n)$  e  $u(n)$  são aplicados simultaneamente no sistema de filtragem adaptativa. O sinal  $d(n)$ , chamado de sinal de medição, contém tanto o sinal desejado, o qual não será eliminado, como o sinal de ruído a ser atenuado. O sinal  $u(n)$  é o sinal da entrada de referência do filtro, e possui apenas as medições da fonte de ruído, cujos sinais são correlatos ao sinal de ruído presentes na entrada  $d(n)$ .

Na maior parte dos sistemas adaptativos o filtro digital FIR é utilizado devido à sua simplicidade e garantia de estabilidade. A maioria dos filtros FIR é implementada utilizando diretamente a sua estrutura clássica, entretanto a estrutura Lattice é preferível em algumas aplicações como no processamento de sinais de fala.

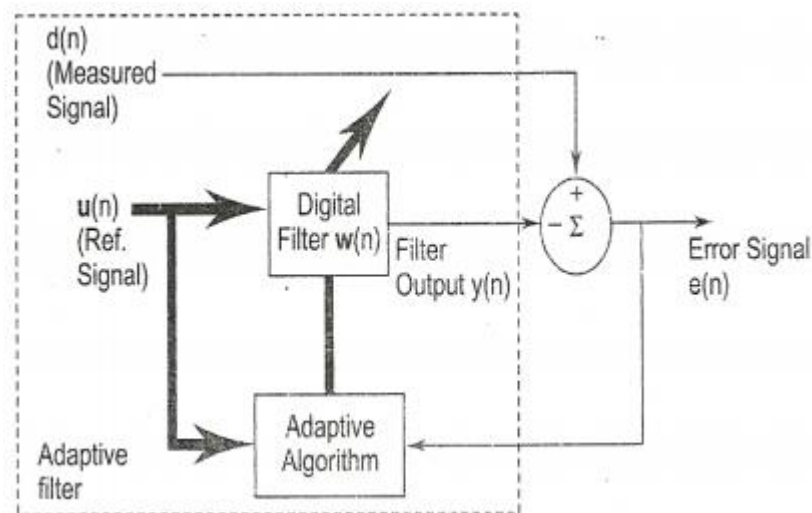
Os coeficientes do filtro no tempo  $n$  são dados pelo vetor  $w(n)$  de tamanho  $M$ , onde  $M$  representa o tamanho do filtro FIR, obtém-se então:

$$w(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{M-1}(n)]^T \quad (1)$$

$$u(n) = [u(n)u(n-1) \ \dots \ u(n-M+1)] \quad (2)$$

A saída resultante do filtro é representada pela equação 3:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} w_i(n)u(n-i) = w^T(n)u(n) \quad (3)$$



**Figura 1 – Diagrama de blocos de um filtro adaptativo**

Fonte: Designing and Implementation of Algorithms on MATLAB for Adaptive Noise Cancellation from ECG Signal, 2013.

## 2.2 ALGORÍTIMO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (LMS)

O LMS é uma aproximação do método do gradiente, o qual utiliza estimativas instantâneas do vetor gradiente. A estimação do gradiente é baseada em valores amostrados do vetor de entrada e um sinal de erro. A interação do algoritmo ocorre sobre cada coeficiente do filtro, movendo-se em direção do gradiente aproximado. A ideia por trás dos filtros LMS é utilizar o método do gradiente para encontrar um vetor de coeficientes  $w(n)$  que minimize a função custo (WIDROW, 1960).

A saída  $y(n)$  do filtro FIR pode ser obtida pela equação 4, onde  $n$  é o número de interações.



$$y(n) = \sum_{m=0}^{n-1} w(m)u(n-m) \quad (4)$$

O sinal de erro é calculado pela equação 5:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (5)$$

Os coeficientes do filtro são atualizados utilizando como base o sinal de erro  $e(n)$  e o sinal de entrada de ruído  $u(n)$ , como apresentado na equação 6.

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)u(n)y(n) \quad (6)$$

Onde  $w(n)$  é valor atual do vetor,  $w(n+1)$  é o próximo valor do valor,  $u(n)$  é sinal de entrada de ruído  $u(n)$ ,  $e(n)$  é o vetor de erro e  $\mu$  é o fator de convergência o qual determina a velocidade de convergência do filtro e o seu comportamento geral (JIASHU, 2007).

### 2.3 SIMULAÇÃO DO FILTRO LMS

Para comprovar a eficácia da filtragem adaptativa LMS, desenvolveu-se uma simulação MATLAB na qual um sinal simulado de fala  $s(n)$  é gerado como uma gaussiana de média 0 e variância 1.

No exemplo desenvolvido, o microfone 1 capta o sinal de medição  $d(n)$ , o qual é composto pelo sinal de fala  $s(n)$  adicionado à um sinal de ruído senoidal, resultando na equação 7.

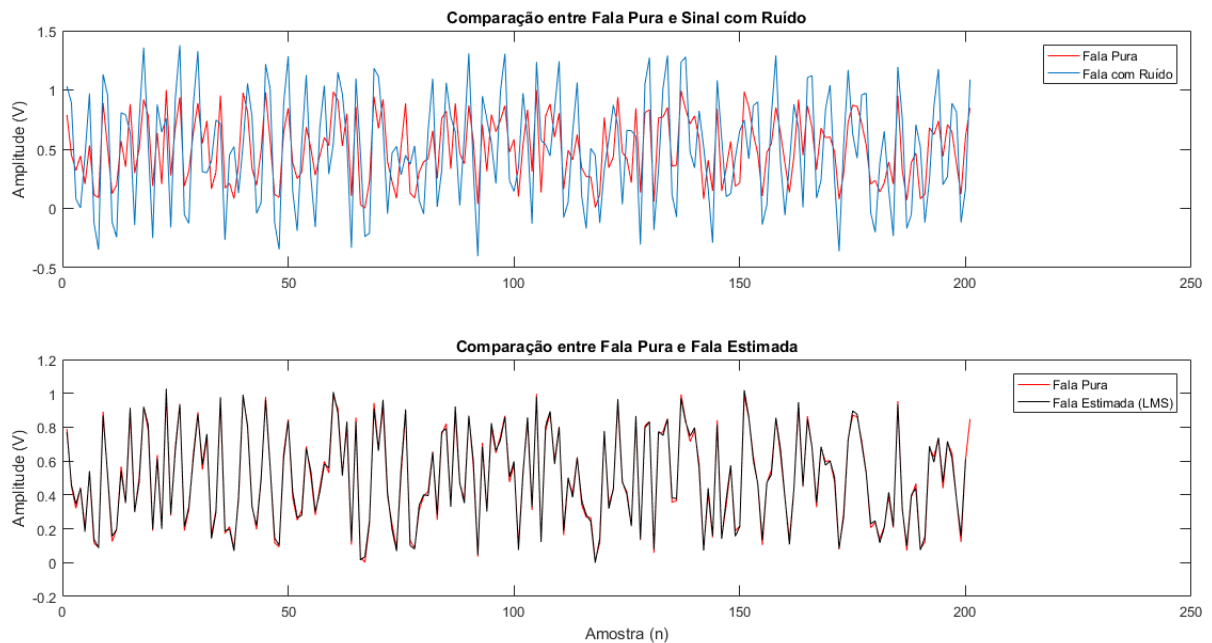
$$d(n) = s(n) + 0,5 \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2} + 0,5\right) \quad (7)$$

O microfone 2 capta o sinal apenas da fonte de ruído,  $u(n)$ , e é representado pela equação 8.

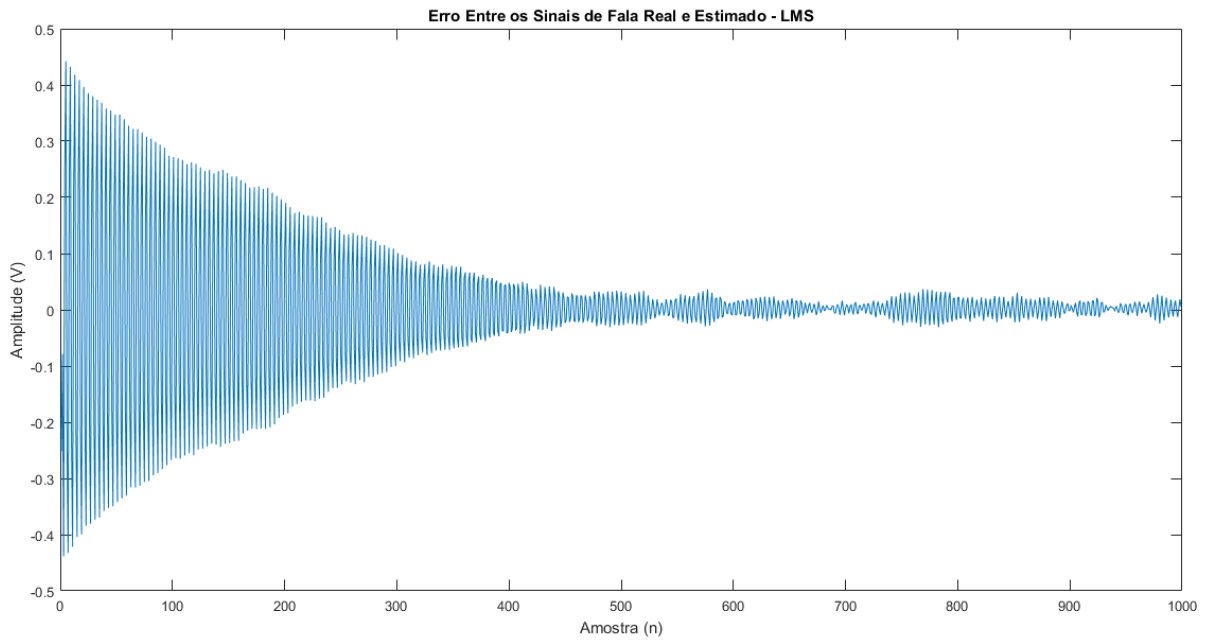
$$u(n) = 10 \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (8)$$

Os ruídos presentes em ambos os microfones são senoidais, entretanto com diferentes amplitudes e fases, porém esses sinais de são correlatos entre si.

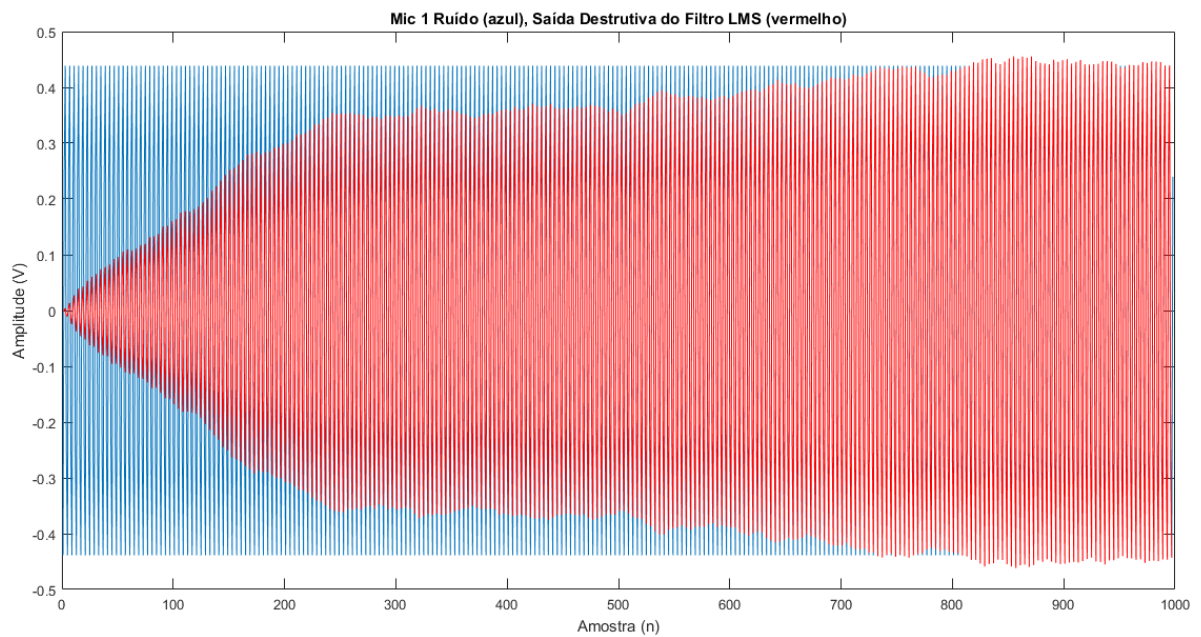
As figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam os resultados da simulação, onde é possível visualizar a diminuição da diferença entre o sinal de fala puro e o sinal de fala estimado com o passar do tempo. O sinal de interferência destrutiva gerado pelo filtro torna-se similar ao sinal de ruído indesejado e os coeficientes do filtro convergem os seus valores.



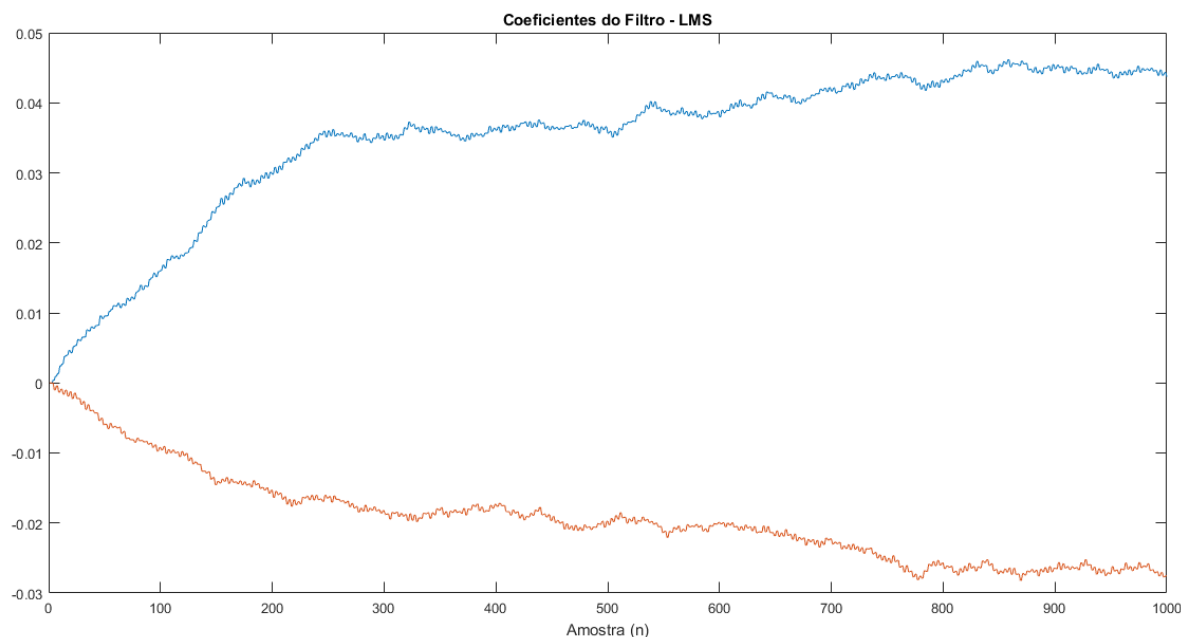
**Figura 2 – Comparação entre os sinais de fala**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 3 – Erro entre os sinais de fala real e estimado através do filtro LMS**  
Fonte: Autoria própria



**Figura 4 – Comparação entre o sinal de ruído e o sinal de interferência destrutiva**  
Fonte: Autoria própria



**Figura 5 – Evolução dos coeficientes do filtro LMS no tempo**  
**Fonte: Autoria própria**

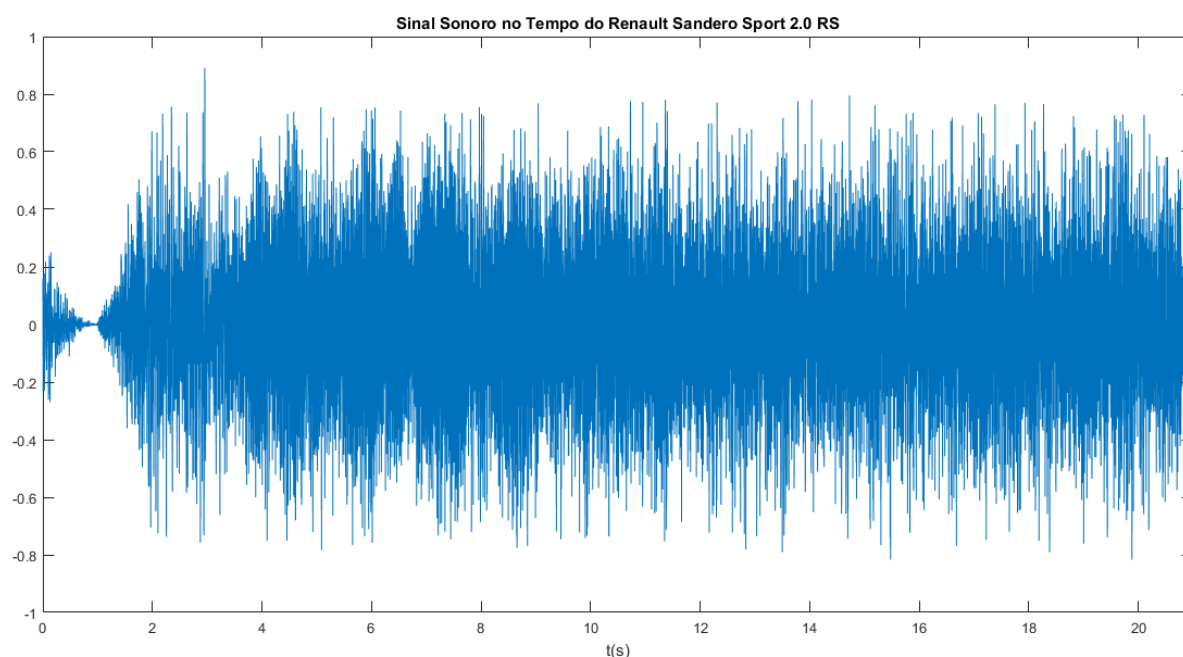
### 3 ANÁLISE DE RUÍDOS SONOROS EM UM VEÍCULO

Este capítulo apresentará um estudo dos sinais no tempo e na frequência de ruídos sonoros captados no interior de um veículo real.

#### 3.1 AQUISIÇÃO DOS SONS EMITIDOS POR UM VEÍCULO REAL

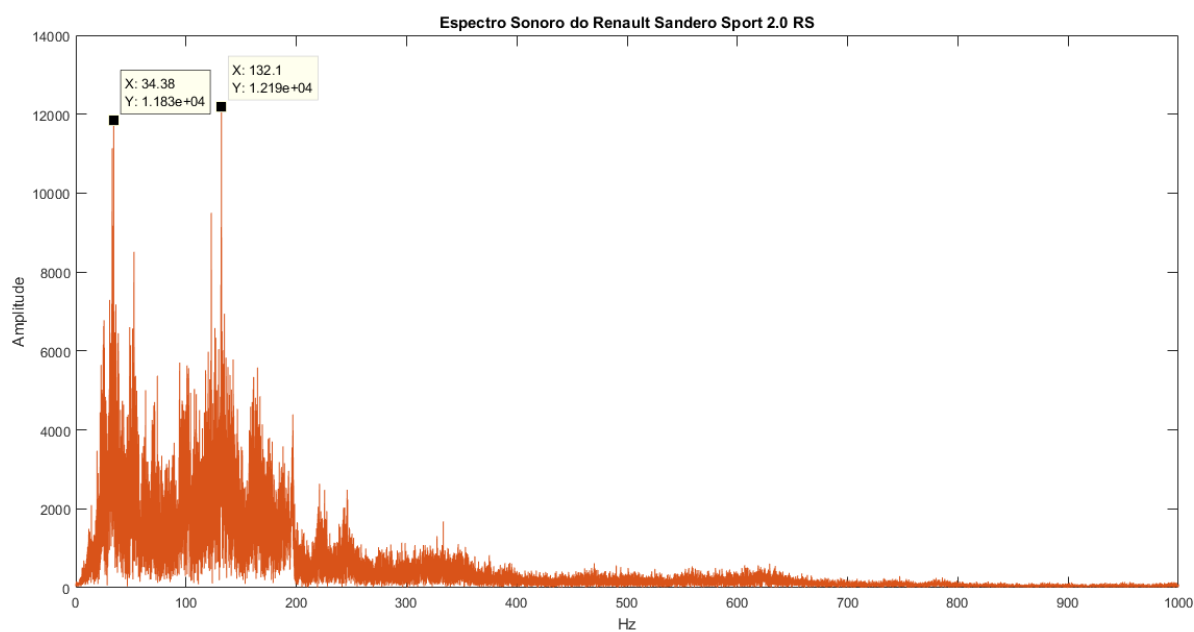
Com a finalidade de analisar os ruídos sonoros gerados em um veículo em movimento e, posteriormente, projetar um filtro adaptativo LMS para que a sua intensidade seja mitigada, realizou-se uma amostragem em 44,1 kHz em formato WAV do áudio no interior de um veículo por meio de um microfone, em uma situação real de direção em uma estrada. O veículo de passageiros escolhido e utilizado foi um Renault Sandero Sport R.S. 2017 com um motor F4R 2.0 de 150 CV (RENAULT, 2017). Por possuir um motor e calibração esportivos, este veículo apresenta ruídos sonoros de alta intensidade no interior da cabine.

O sinal de áudio no tempo gravado no interior do veículo é apresentado na figura 6.



**Figura 6 – Gráfico do sinal de áudio no tempo de um Sandero Sport R.S. 2.0 na estrada**  
Fonte: Autoria própria

Para melhor analisar o comportamento do sinal da aquisição, realizou-se um estudo do espectro do sinal em frequência, com o auxílio da ferramenta Matlab. O resultado é apresentado na figura 7.



**Figura 7 – Gráfico do espectro em frequência do áudio de um Sandero Sport R.S. 2.0 na estrada.**

**Fonte: Autoria própria**

Através da análise gráfica do espectro apresentado é possível verificar que a banda do ruído no interior do veículo, proveniente de seus componentes externos, está entre 10 e 400 Hz, com dois picos de maior intensidade nas frequências de 34,38 Hz e 132,1 Hz, o primeiro proveniente do som da rotação do motor, cuja frequência convertida equivalente à 2062,8 RPM e o segundo pico do trem de transmissão e o som dos pneus do veículo no solo. A frequência de rotação de motor F4R do Sandero Sport R.S. 2.0 vai de 1000 RPM (16,67 Hz) até 6500 RPM (108,33 Hz) (RENAULT, 2017).

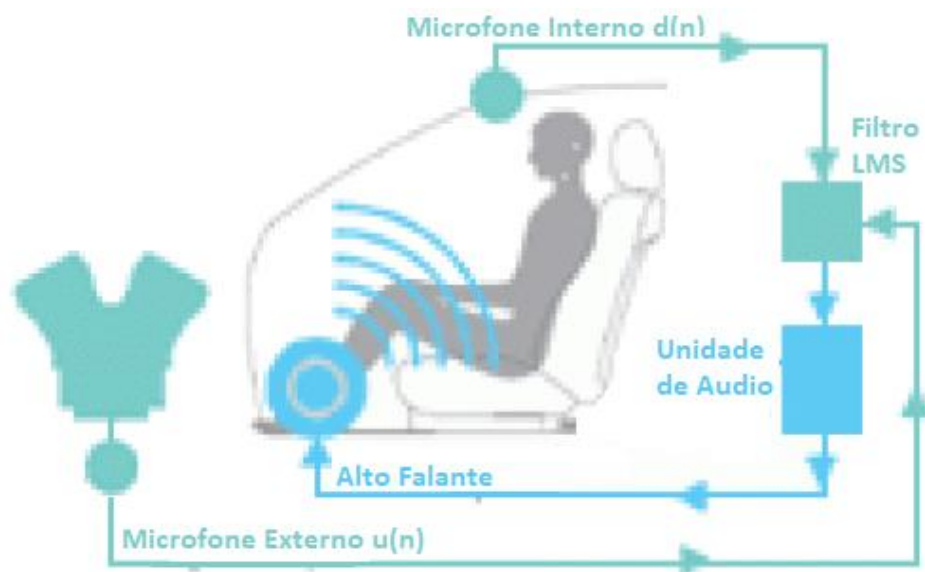
## **4 PROJETO DE UM FILTRO LMS PARA UM VEÍCULO**

Com a finalidade de diminuir a intensidade dos ruídos sonoros apresentados no capítulo anterior, projetou-se um sistema ANC simulado na plataforma Matlab. Aplicou-se o algoritmo adaptativo do método dos mínimos quadrados (LMS) com um filtro FIR de segunda ordem de coeficientes ajustáveis, como o apresentado no capítulo 2.

### **4.1 DIAGRAMA FUNCIONAL DO PROJETO**

O diagrama funcional do projeto é apresentado na figura 8. O sistema é uma malha fechada composta por dois microfones, um conjunto de alto falantes e a unidade de controle do filtro LMS integrada à unidade de áudio. O microfone externo capta os ruídos externos do veículo, tais como ruído do motor, dos pneus,

transmissão, do vento, entre outros. O microfone interno é utilizado para captar tanto o som ambiente do interior do veículo, como exemplo uma música sendo escutada ou uma conversa entre passageiros, bem como o ruído externo que adentra ao veículo. O conjunto de alto falantes presentes do interior do veículo têm a finalidade de reproduzir a multimídia proveniente da unidade de áudio, bem como reproduzir os sinais de áudio destrutivos para mitigar, no interior do veículo, os ruídos externos.

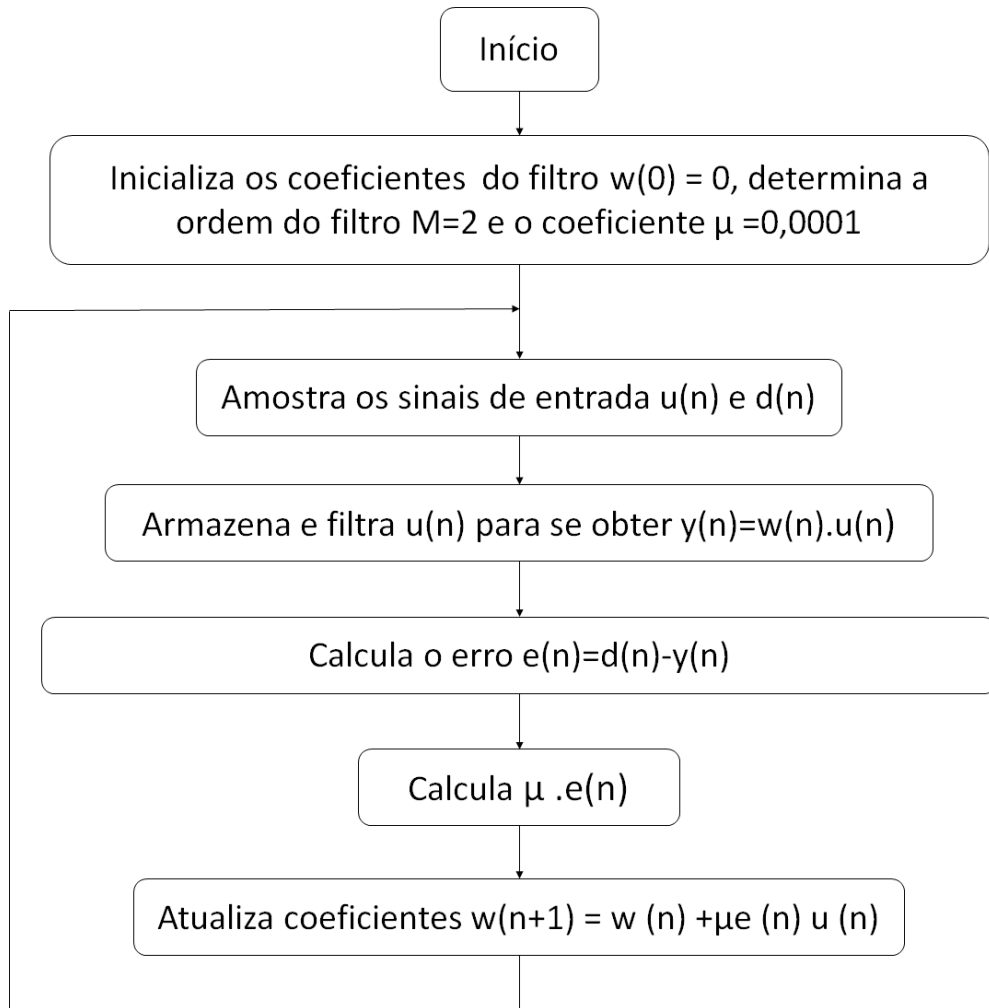


**Figura 8 – Diagrama funcional do sistema ANC projetado**

Fonte: Autoria própria

#### 4.2 ALGORITMO LMS APLICADO

Utilizando as equações da filtragem adaptativa LMS apresentadas no capítulo 2, desenvolveu-se o algoritmo apresentado na figura 9, o qual é computacionalmente simples e pode ser aplicado em sistemas de processamento de sinais em tempo real. Optou-se pela aplicação de um filtro de segunda ordem ( $M=2$ ) e um coeficiente de convergência  $\mu$  de valor 0,0001.



**Figura 9 – Fluxograma do sistema ANC projetado**  
**Fonte: Autoria própria**

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.

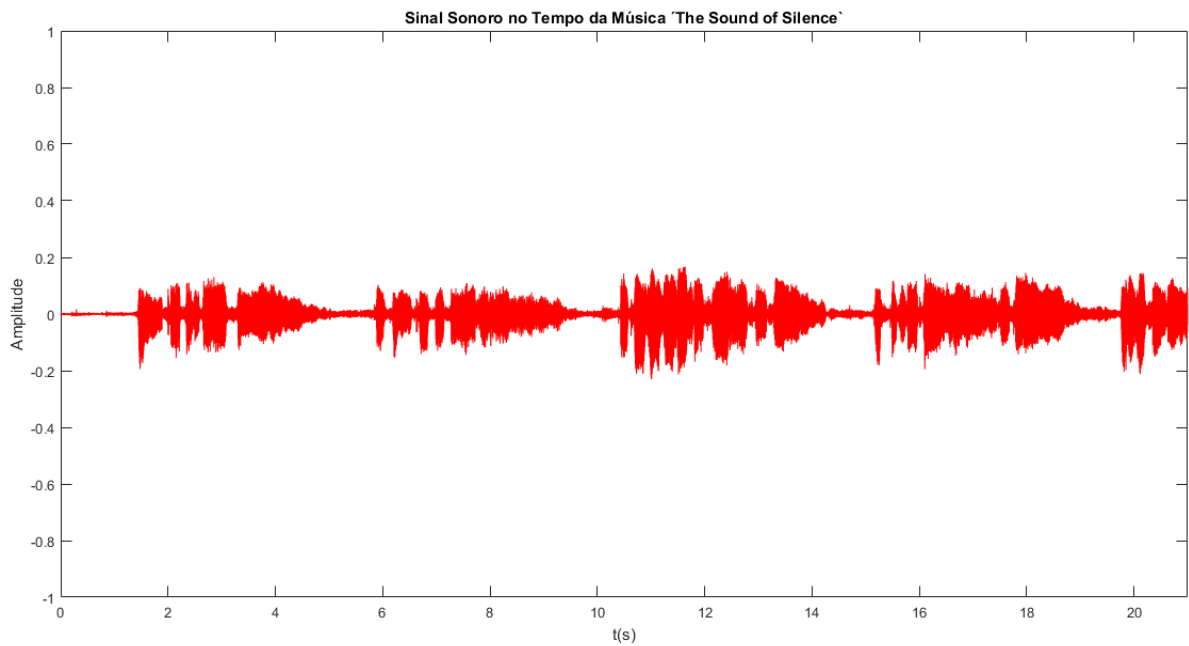
Tendo como base os procedimentos metodológicos anteriormente descritos, neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos através de simulações realizadas no software Matlab, aplicando a técnica proposta.

### 5.1 AUDIO NO INTERIOR DO VEÍCULO SEM RUÍDO

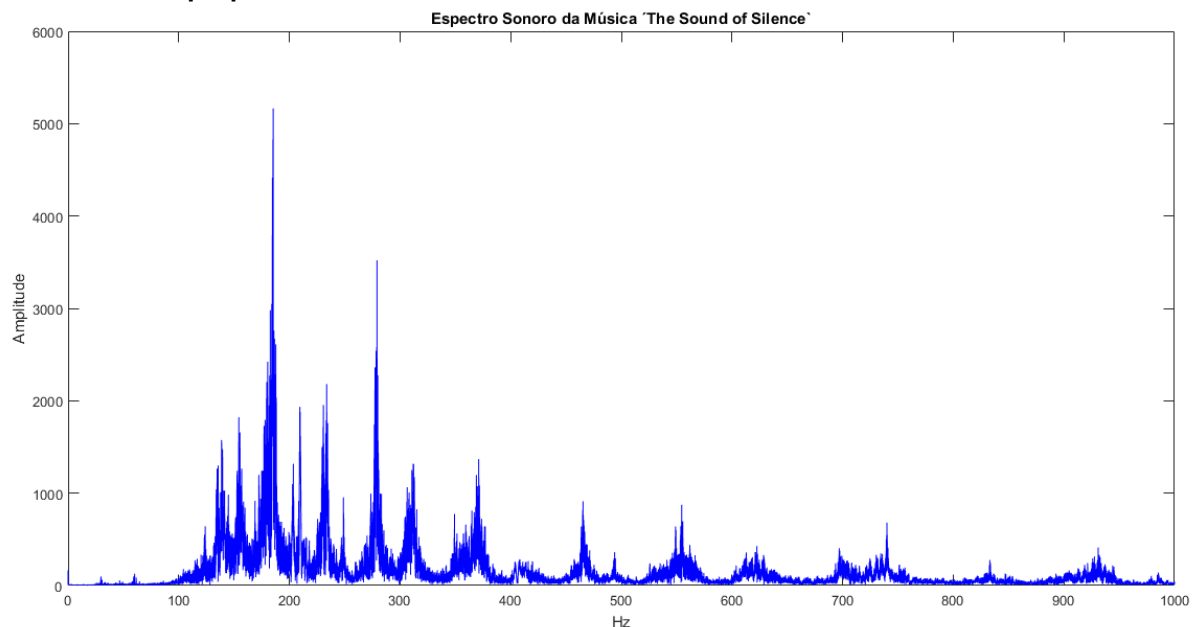


Para poder melhor exemplificar e ilustrar em uma situação real a interferência dos ruídos externos no ambiente interno do veículo, utilizou-se como referência de som interno a música *The Sound of Silence* gravada pela dupla Simon & Garfunkel.

O áudio foi convertido em formato WAV, e assim como o som gravado do veículo, também foi amostrado a uma taxa de 44,1 kHz. O gráfico do sinal da música no tempo é apresentado na figura 10 e o espectro do sinal da música na frequência é apresentado na figura 11, cuja banda vai de 100 Hz até 1 kHz.



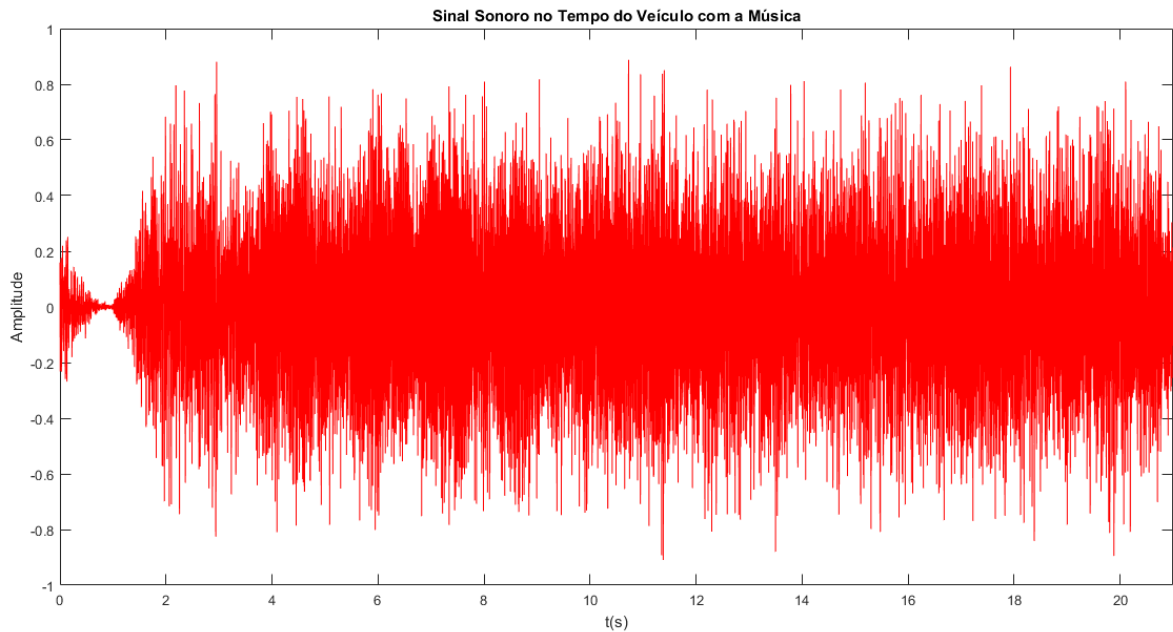
**Figura 10 – Gráfico do sinal da música *The Sound of Silence* no tempo**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 11 – Espectro do sinal da música The Sound of Silence**  
**Fonte: Autoria própria**

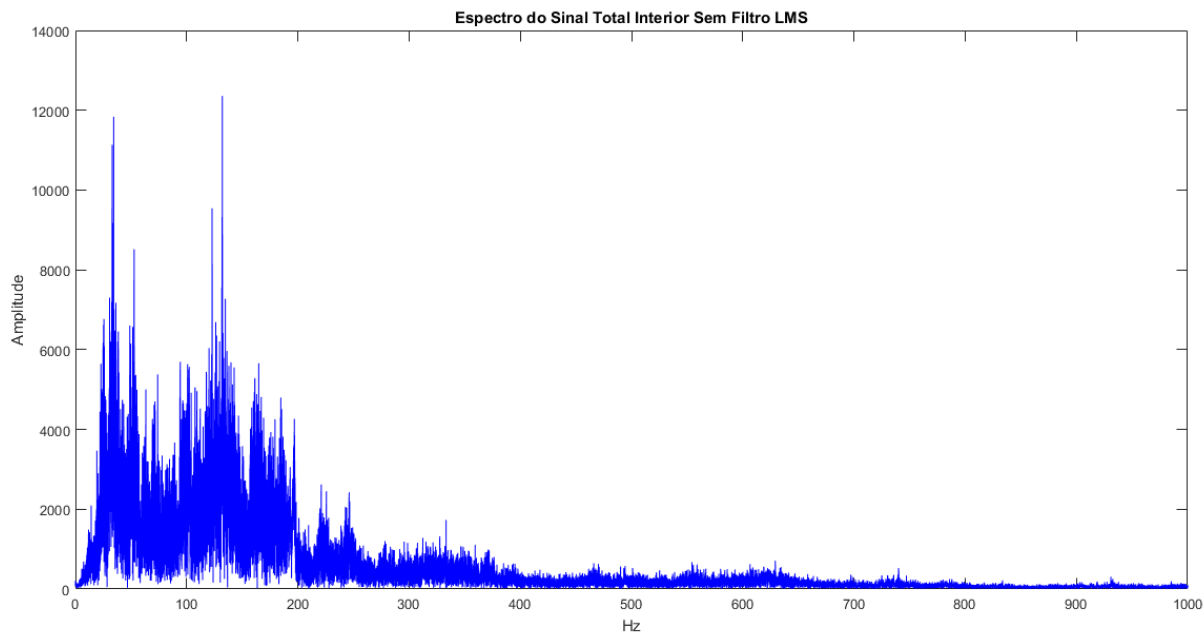
## 5.2 AUDIO NO INTERIOR DO VEÍCULO COM INTERFERÊNCIA DE RUÍDO

Adicionando o sinal da música citada anteriormente ao sinal de ruído do veículo apresentado no capítulo 3, obtém-se o sinal resultante demonstrado na figura 12 no domínio do tempo e na figura 13 no domínio da frequência.



**Figura 12 – Gráfico do sinal sonoro total no interior do veículo sem filtro LMS**  
**Fonte: Autoria própria**

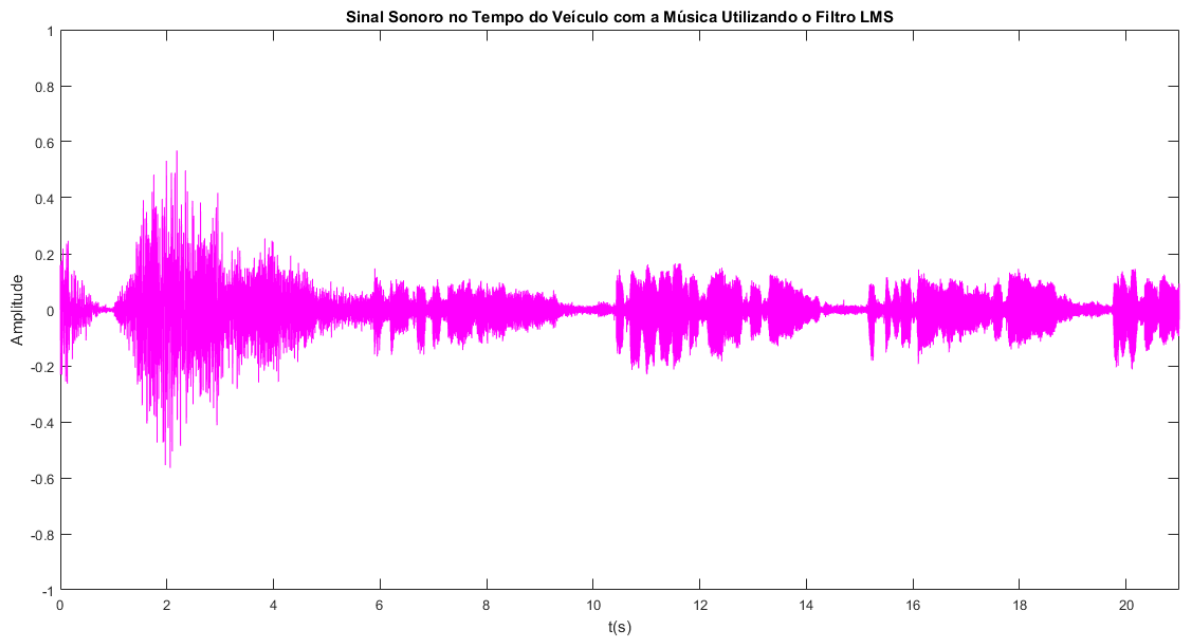
Através da análise do espectro resultante, pode-se observar sua maior semelhança com o espectro do sinal de ruídos externos.



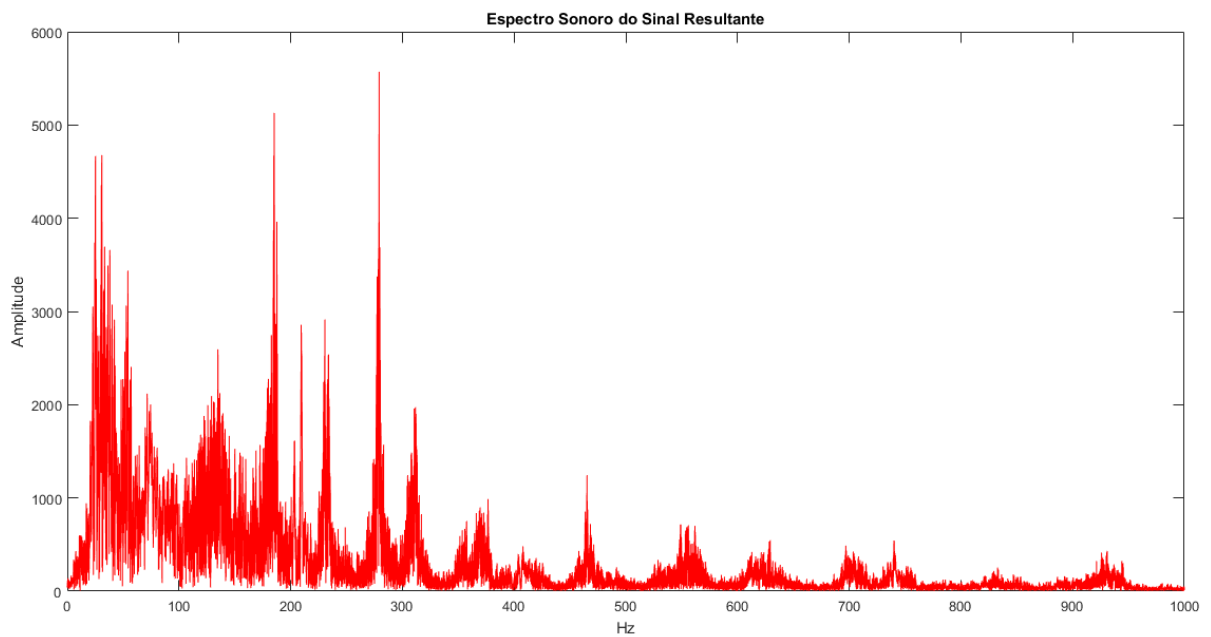
**Figura 13 – Espectro do sinal sonoro total no interior do veículo sem filtro LMS**  
**Fonte: Autoria própria**

### 5.3 SINAL FILTRADO RESULTANTE

Após a utilização da técnica de filtragem adaptativa LMS, observou-se que este método foi de grande eficácia para a filtragem do ruído externo, apresentando a convergência do filtro 8 segundos após o início do tratamento do sinal. A figura 14 apresenta o sinal resultante no interior do veículo após a aplicação da interferência destrutiva e a figura 15 apresenta o espectro desse sinal no domínio da frequência.

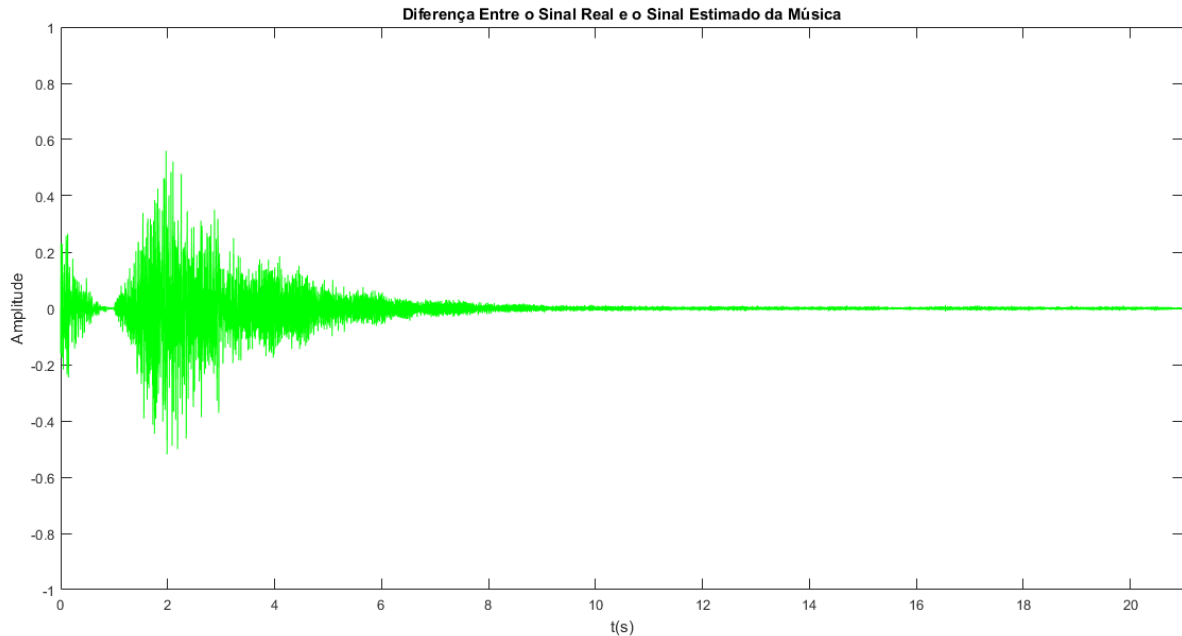


**Figura 14 – Gráfico do sinal sonoro filtrada resultante após utilização do filtro LMS**  
Fonte: Autoria própria



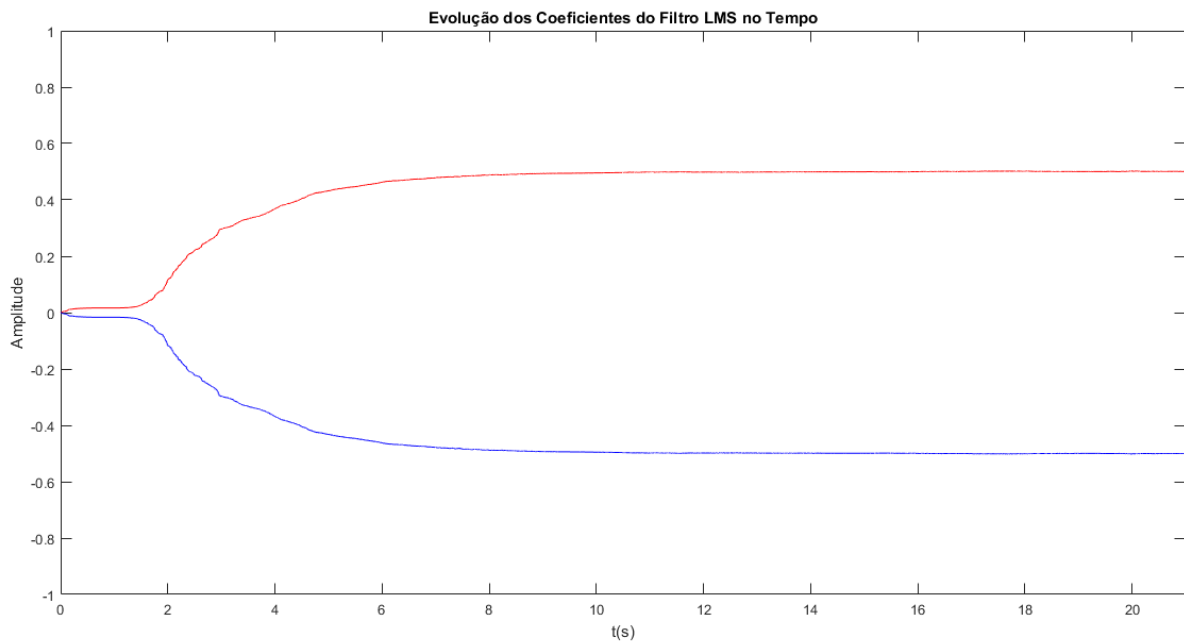
**Figura 15 – Espectro do sinal sonoro filtrada resultante após utilização do filtro LMS**  
Fonte: Autoria própria

A diferença entre o sinal real da música antes da adição de ruído e o sinal estimado resultante é apresentada na figura 16, na qual pode-se comprovar a eficácia da filtragem adaptativa LMS em um sistema ANC. A estabilidade do filtro ocorre após 8 segundos.



**Figura 16 – Diferença entre o sinal da música real e o sinal estimado no tempo**  
**Fonte: Autoria própria**

Os coeficientes do filtro LMS se estabilizam após 8 segundos, conforme a figura 17, demonstrando assim que os sinais de ruído que o filtro elimina são estacionários.



**Figura 17 – Evolução dos Coeficientes do Filtro LMS no Tempo**

Fonte: Autoria própria

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao fim deste documento, conclui-se que o trabalho desenvolvido comprovou, através de um modelo teórico e simulações, que é possível utilizar o filtro adaptativo LMS como um sistema de controle ativo de ruído (ANC), obtendo resultados satisfatórios na eliminação de ruídos externos no interior de um veículo automotor.

Cumpriu-se assim com os objetivos gerais e específicos e a justificativa propostos no capítulo inicial. Suas maiores dificuldades foram a escolha do filtro adaptativo a ser utilizado e a determinação de sua ordem e coeficiente de convergência, os quais ficam a critério do projetista após realizar testes de eficiência.

Para trabalhos futuros propõe-se o desenvolvimento de um hardware que possua um sistema em tempo real de aquisição, processamento e reprodução de sons para que o projeto proposto seja aplicado em um dispositivo funcional, atendendo as necessidades dos usuários em anular os ruídos externos no interior das cabines em veículos automotores.

## REFERÊNCIAS

BOHN, C. ; CORTABARRIA, A. **Active Control of Engine-induced Vibrations in Automotive Vehicles Using Disturbance Observer Gain Scheduling**. Control Engineering Practice, Hannover, 2004.

JIASHU, Zhang; HENG-Ming, Tai. **Adaptive Noise Cancellation Algorithm for Speech Processing**, IEEE Transactions, pp 2489-2492. Taipei, 2007.

MASUDA, K.; OHUCHI, H. **Active Noise Control of a Variable Displacement Axial Piston Pump with Even Number of Cylinders**. Proc 4th. JHPS International Symposium on Fluid Power, Tóquio, 1999.

RENAULT DO BRASIL. **Manual do Proprietário – Sandero R.S**. Disponível em: <<https://www.renault.com.br/veiculos/conheca-nossa-gama/sandero-rs/caracteristicas.html>>. Acesso em: 17 out. 2017

WARNAKA, G.E, POOLE, L. **Active Attenuator**, Número de Patente EUA 4,473,906., 1984.

WIDROW, B.; HOFF, M.E. **Adaptive Switching Circuits**, IIREWESCON Convention Record, pp. 96- 104, Nova Iorque, 1960.

ZANGI, Kambiz. **A New Two-Sensor Active Noise Cancellation Algorithm**. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1993.