

Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado em Engenharia Elétrica

Marcelo Bergmann

**Aplicação de Técnicas de Cancelamento Adaptativo de Ruídos em
Equipamento de Proteção Auricular**

Porto Alegre - RS, Brazil

2018

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul

Marcelo Bergmann

Aplicação de Técnicas de Cancelamento Adaptativo de Ruídos em Equipamento de Proteção Auricular

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.
Linha de Pesquisa: Engenharia Biomédica.

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS

Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dario F. G. de Azevedo, Ph.D.

Marcelo Bergmann

Aplicação de Técnicas de Cancelamento Adaptativo de Ruídos em Equipamento de Proteção Auricular/ Marcelo Bergmann. – Porto Alegre - RS, Brazil, 2018-

89 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dario F. G. de Azevedo, Ph.D.

Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS

Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.

1. Protetores Auriculares. 2. Equipamentos de Proteção Individual. 3. Cancelamento Adaptativo de Ruídos. 4. Algoritmo NLMS. 5. Processamento Digital de Sinais. 6. Engenharia Biomédica. I. Prof. Dario F. G. de Azevedo, Ph.D.. II. . III. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS. IV. Escola Politécnica.

CDU 02:141:005.7

Marcelo Bergmann

Aplicação de Técnicas de Cancelamento Adaptativo de Ruídos em Equipamento de Proteção Auricular

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.

Linha de Pesquisa: Engenharia Biomédica.

Aprovado:

Prof. Dario F. G. de Azevedo, Ph.D.
Orientador

Co-orientador

Professor, Ph.D.
Universidade

Porto Alegre - RS, Brazil

2018

À minha família, a quem serei eternamente grato.

Agradecimentos

Sócrates afirmou que “... como não sei nada, também estou certo de não saber”. Essas palavras sempre me incentivaram à busca de novos conhecimentos, como já havia afirmado ao final da minha Graduação em Engenharia Elétrica. O Mestrado me ajudou a elevar o meu conhecimento sobre pesquisas científicas, assuntos específicos e novas técnicas em engenharia. O grande aprendizado da vida veio com as pessoas que participaram dessa jornada, e por isso é momento de agradecê-las.

Agradeço ao meu orientador, Dario Francisco Guimarães de Azevedo, Ph.D. por investir no meu potencial e ajudar no crescimento profissional e educacional.

Agradeço em memória de meus pais, Ita e Viktor, e em memória da minha tia do coração, Maria, pelo grande incentivo em minha educação, formação de caráter e como cidadão.

Agradeço à minha esposa, Andréia, pelo incentivo incondicional e a resiliência do amor concedido durante minha formação como mestre e na vida conjunta.

Agradeço aos meus filhos, Viktor e Laura, pelas demonstrações de carinho que me energizam sempre e me fazem ser uma pessoa melhor.

Agradeço aos colegas e amigos, Mestre Cassiano Moralles, Mestrando Flávio Ávila, Mestre Guilherme Froes, Doutoranda Nathalia Esper, Mestranda Mariana Pastro e Mestre Ricardo Doth, por todo o apoio durante a realização do mestrado e desta dissertação.

Agradeço ao professor Dr. Alexandre Franco, mesmo que por um breve espaço de tempo, pelo direcionamento no início da pesquisa de mestrado.

Agradeço a todos os integrantes do LABIMA, que sempre estiveram dispostos a ajudar e filosofar temas relacionados ao mestrado, à dissertação ou aos mais diversos assuntos.

Agradeço à CAPES e à HP, que financiou e propiciou a pesquisa aqui presente.

*"... aquele homem acredita saber alguma coisa,
sem sabê-la,
enquanto eu,
como não sei nada,
também estou certo de não saber."
(Platão, Apologia de Sócrates)*

Resumo

A utilização de equipamentos de proteção individual (EPI) na indústria é obrigatória para qualquer situação de risco à segurança e à saúde do trabalhador. Os protetores auriculares são utilizados para ambientes ruidosos e tem a função de preservar o sistema auditivo de seus usuários. No entanto, geram a sensação de isolamento acústico do usuário em relação ao ambiente de trabalho. O objetivo central da proposta que será apresentada nesta dissertação vem tentar resolver esta situação comum, bem como, propor melhorias nos protetores auditivos para que cumpram com maior eficiência o seu papel de proteção. As metodologias de Cancelamento Adaptativo de Ruídos podem ser empregadas para solucionar algumas destas questões e propõe-se um novo conceito baseado em Processamento Digital de Sinais.

Palavras-chaves: Protetores Auriculares, Equipamentos de Proteção Individual, Cancelamento Adaptativo de Ruídos, Algoritmo NLMS, Processamento Digital de Sinais, Engenharia Biomédica.

Abstract

The use of personal protective equipment (PPE) in the industry is mandatory for any situation of risk to the safety and health of the worker. Hearing protectors are used in noisy environments and have the function of preserving the auditory system. However, they generate the sensation of acoustic isolation of the user in relation to the work environment. The general objective that is presented in this thesis is to solve the isolation situation, as well as, to propose improvements in hearing protectors to more effectively fulfill their protective role. Digital Signal Processing and Adaptive Noise Cancelling methodologies can be used to solve some of these issues and to provide a new concept in hearing protectors.

Key-words: Hearing Protectors, Personal Protective Equipment, Adaptive Noise Cancelling, NLMS Algorithm, Digital Signal Processing, Biomedical Engineering.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Isolamento do usuário gerado pelo uso do protetor auricular . . .	17
Figura 2 – Conceito Original de ANC	20
Figura 3 – Filtro FIR de Wiener	22
Figura 4 – Realimentação do Filtro de Wiener	22
Figura 5 – Coeficientes do Filtro Passa-banda	28
Figura 6 – Resposta em Frequência do Filtro Passa-banda	28
Figura 7 – Coeficientes do Filtro Rejeita-banda	29
Figura 8 – Resposta em Frequência do Filtro Rejeita-banda	30
Figura 9 – Variações do algoritmo de Adaptação LMS	31
Figura 10 – Sistema ANC Gaussiano de Atar Mon	32
Figura 11 – Testes experimentais de Seong-Pil Moon	32
Figura 12 – Diagrama Esquemático da Eletrônica do Protetor Auricular. . .	34
Figura 13 – Diagrama Funcional da Eletrônica.	36
Figura 14 – Diagrama Funcional do Sistema.	37
Figura 15 – Diagrama Funcional do Cenário de Ruído Ambiente.	39
Figura 16 – Metodologia do Modo de Máxima Atenuação.	40
Figura 17 – Diagrama Funcional do Cenário de Alta Fidelidade.	41
Figura 18 – Primeira Metodologia para Alta Fidelidade.	42
Figura 19 – Segunda Metodologia para Alta Fidelidade.	42
Figura 20 – Segunda Metodologia para Alta Fidelidade.	43
Figura 21 – Metodologia do Modo de Alta Fidelidade.	44
Figura 22 – Diagrama Funcional do Cenário de Voz com Ruído Ambiente. .	45
Figura 23 – Metodologia do Modo de Banda de Voz.	46
Figura 24 – Metodologia do Modo de Ruído Impulsivo	47
Figura 25 – Metodologia de Proteção Auricular NLMS.	48
Figura 26 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Pa- drão de Frequência 2000 Hz	53
Figura 27 – Modo de Máxima Atenuação: Início da Simulação de Ruído Pa- drão de Frequência 2000 Hz	53

Figura 28 – Modo de Máxima Atenuação: Final da Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz	54
Figura 29 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz	55
Figura 30 – Modo de Máxima Atenuação: Final da Simulação de Ruído Padrão de Frequências 250, 2000 e 8000 Hz	56
Figura 31 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação vs Frequência do Ruído Padrão	58
Figura 32 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Real Carro	59
Figura 33 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Real Carro	59
Figura 34 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Real Cavalo	60
Figura 35 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Real Cavalo	60
Figura 36 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Real Tráfego	61
Figura 37 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Real Tráfego	61
Figura 38 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz	63
Figura 39 – Modo de Alta Fidelidade: Início da Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz	64
Figura 40 – Modo de Alta Fidelidade: Final da Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz	64
Figura 41 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz	65
Figura 42 – Gráfico de Superfície da Atenuação no Modo de Alta Fidelidade	68
Figura 43 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Carro e Voz .	69
Figura 44 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Carro e Voz	69

Figura 45 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Cavalo e Música 01	70
Figura 46 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Cavalo e Música 01	70
Figura 47 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Tráfego e Música 02	71
Figura 48 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Tráfego e Música 02	71
Figura 49 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz	73
Figura 50 – Modo de Banda de Voz: Início da Simulação de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz	74
Figura 51 – Modo de Banda de Voz: Final da Simulação de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz	75
Figura 52 – Modo de Banda de Voz: Atenuação obtida na Simulação de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz	75
Figura 53 – Gráfico de Superfície da Atenuação no Modo de Banda de Voz	77
Figura 54 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Carro	78
Figura 55 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Cavalo	78
Figura 56 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Tráfego	79
Figura 57 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Voz	79
Figura 58 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Música 01	80
Figura 59 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Música 02	80
Figura 60 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação do funcionamento do AGC	81
Figura 61 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação 01 do funcionamento do Detector de Ruídos Impulsivos	82
Figura 62 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação 02 do funcionamento do Detector de Ruídos Impulsivos	83

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de Atenuação do Abafador 3M Peltor X1A	49
Tabela 2 – Tabela de Atenuação do Abafador 3M Peltor X5A	49
Tabela 3 – Tabela de Atenuação do Abafador 3M Peltor ProTac II	50
Tabela 4 – Tabela de Atenuação do Abafador Honeywell Impact Pro	50
Tabela 5 – Resultado das Simulações do Modo de Atenuação Máxima com Sinais Padrões	57
Tabela 6 – Resultado das Simulações do Modo de Atenuação Máxima com Sinais Reais	62
Tabela 7 – Resultado das Simulações do Modo de Alta Fidelidade com Ruí- dos Padrões e Sinal de 532, 1540 e 3450 Hz	66
Tabela 8 – Resultado das Simulações do Modo de Alta Fidelidade com Si- nais Padrões e Ruído de 250, 2000 e 8000 Hz	67
Tabela 9 – Resultado das Simulações do Modo de Alta Fidelidade com Si- nais Reais	72
Tabela 10 – Resultado das Simulações do Modo de Banda de Voz com Sinais Padrão	76
Tabela 11 – Tabela Comparativa entre os Modos de Operação e Abafadores de Mercado	85

Lista de abreviaturas e siglas

AGC	Controle Automático de Ganho (do inglês, <i>Automatic Gain Control</i>)
ANC	Cancelamento Adaptativo de Ruídos (do inglês, <i>Adaptive Noise Cancellation</i>)
DSP	Processamento Digital de Sinais (do inglês, <i>Digital Signal Processing</i>)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FIR	Resposta ao Impulso Finita (do inglês, <i>Finite Impulse Response</i>)
LMS	Mínimos Quadrados Médios (do inglês, <i>Least Mean Square</i>)
NA	Não Aplicável
NLMS	Mínimos Quadrados Médios Normalizados (do inglês, <i>Normalized Least Mean Square</i>)
NRR	Nível de Redução de Ruído (do inglês, <i>Noise Reduction Rating</i>)
PPE	Equipamento de Proteção Individual (do inglês, <i>Personal Protective Equipment</i>)

Sumário

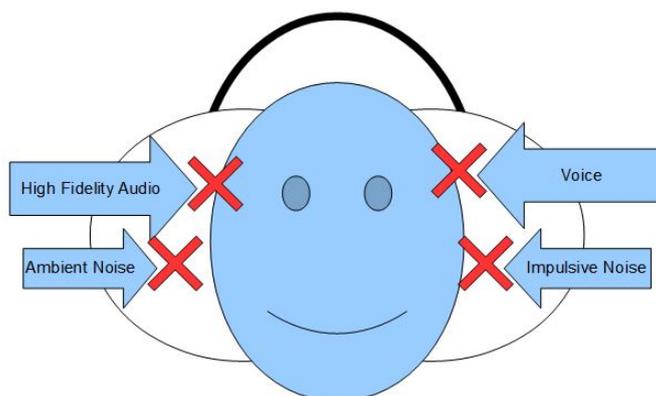
1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	BASE TEÓRICA E STATE OF ART	20
3.1	Cancelamento Adaptativo de Ruído - ANC	20
3.2	Outros Conceitos Básicos Utilizados	24
3.2.1	Teorema de Nyquist ou Teorema da Amostragem	24
3.2.2	Potência de um Sinal Discreto	25
3.2.3	Atenuação de um Sinal Discreto	26
3.2.4	Filtro FIR Passa-banda	27
3.2.5	Filtro FIR Rejeita-banda	29
3.3	<i>State of Art</i>	30
4	METODOLOGIA PROPOSTA	34
4.1	Modo de Atenuação Máxima	38
4.2	Modo de Alta Fidelidade	41
4.3	Modo de Banda de Voz	44
4.4	Modo de Ruído Impulsivo	46
4.5	Metodologia de Proteção Auricular NLMS	47
5	MATERIAIS E MÉTODOS	49
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS	52
6.1	Simulação e Resultados do Modo de Máxima Atenuação com Sinais Padrões	52
6.2	Simulação e Resultados do Modo de Máxima Atenuação com Sinais Reais	58

6.3	Simulação e Resultados do Modo de Alta Fidelidade com Sinais Padrões	62
6.4	Simulação e Resultados do Modo de Alta Fidelidade com Sinais Reais	68
6.5	Simulação e Resultados do Modo de Banda de Voz com Sinais Padrões	72
6.6	Simulação e Resultados do Modo de Banda de Voz com Sinais Reais	77
6.7	Simulação e Resultados do Controle Automático de Ganho e Detector de Ruídos Impulsivos	81
6.8	Resultado Final da Metodologia de Proteção Auricular NLMS	83
6.9	Comparativo entre a Metodologia de Proteção Auricular NLMS e Abafadores de Mercado	84
7	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	87

1 Introdução

A utilização de equipamentos de proteção individual (EPI) na indústria é obrigatória para situações de risco à segurança e à saúde do trabalhador. A Norma Regulamentadora nº 6 (MTE, 2006), norma brasileira estabelecida pelo Ministério do Trabalho e Emprego, garante que as empresas forneçam os EPI's gratuitamente aos trabalhadores. Dentre os diversos equipamentos de proteção individual, um dos mais utilizados é o protetor auricular. Os protetores auriculares são utilizados em ambientes ruidosos e têm a função de preservar o sistema auditivo dos trabalhadores, e para isso são estabelecidos limites de tolerância conforme o nível do ruído e máxima exposição diária permissível. Os limites de tolerância auditiva são definidos pela Norma Regulamentadora nº 15 (MTE, 2014) em seus Anexos 1 e 2. Os protetores auriculares comumente encontrados no mercado brasileiro são baseados em materiais abafadores de som e que diminuem mecanicamente a potência sonora, sem levar em conta o tempo de exposição. Devido a este fato, os seus usuários sofrem um isolamento na percepção do ambiente ao seu redor, mesmo que não estejam em um ambiente de risco. Abaixo, a Figura 1 ilustra a situação de isolamento sofrido pelos usuários.

Figura 1 – Isolamento do usuário gerado pelo uso do protetor auricular



Fonte: O Autor (2018).

Nos protetores auriculares são empregadas as mais diversas formas de polímeros, óleos e técnicas de absorção de som nas conchas acústicas para aumentar ao máximo a sua eficiência na absorção sonora. Fatores como pressão e o encaixe das conchas na cabeça do usuário também são relevantes na eficiência do produto. Analisando os EPIs disponíveis no mercado podemos perceber que o nível de proteção é diretamente proporcional à tecnologia dos materiais utilizados pelos fabricantes. Em uma busca nos certificados do Ministério do Trabalho e Emprego (CAEPI, 2017), podemos encontrar protetores auriculares circum-auriculares com nível de proteção, Nível de Redução de Ruído (NRR), de 33 dB de atenuação ou mais. Porém, ao analisar os certificados com o critério de níveis de proteção maiores de 21 dB, encontramos poucos fabricantes aptos a fornecer esse nível de proteção.

Assim sendo, existe uma oportunidade de melhorar a eficiência de protetores auriculares através da utilização de técnicas de Cancelamento Adaptativo de Ruído e a implementação de um circuito eletrônico baseado em Processamento Digital de Sinais, ao invés de investirmos somente no desenvolvimento de novos materiais absorvedores.

2 Objetivos Geral e Específicos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia, baseada em Cancelamento Adaptativo de Ruído com Processamento Digital de Sinais, que aumente a eficiência dos protetores circum-auriculares e elimine a sensação de isolamento acústico do usuário em relação ao ambiente de trabalho. A metodologia deve ser de factível e posterior implementação em um circuito eletrônico, bem como, ser possível adicioná-la a qualquer protetor auricular. O sistema final deve obedecer a regulamentação vigente, garantindo os limites de tolerância estipulados pela NR-15(MTE, 2014).

2.2 Objetivos Específicos

Partindo do objetivo geral, a metodologia de Cancelamento Adaptativo de Ruídos deve atingir os seguintes objetivos específicos:

1. Ser de factível implementação em circuito eletrônico e adição à protetores auriculares;
2. Elevar o nível de proteção total do EPI em no mínimo 6 dB;
3. Proporcionar ao usuário um canal de áudio de alta fidelidade que possibilite a reprodução de mensagens provenientes de sistemas externos;
4. Possibilitar que o usuário perceba o áudio ambiente relativo à banda de voz, eliminado as bandas laterais de baixa e alta frequências;
5. Garantir a proteção do usuário contra ruídos de alta potência sonora e/ou impulsivos, como estipulados pela NR-15(MTE, 2014).

No Capítulo 4 são apresentados os cenários correspondentes a cada um dos objetivos específicos citados, bem como, o circuito eletrônico proposto para o desenvolvimento da metodologia.

3 Base Teórica e State of Art

A base teórica que será utilizada para proposta de metodologia e desenvolvimento do protetor auricular eletrônico é fundamentada em Processamento Digital de Sinais (DSP) e em especial no Cancelamento Adaptativo de Ruídos. Esta Seção irá discursar sobre esta base teórica e fornecer o resultado da pesquisa científica atualizada de conteúdos relacionados a esse tema.

3.1 Cancelamento Adaptativo de Ruído - ANC

O Cancelamento Adaptativo de Ruído (ANC) foi apresentado pela primeira vez por Bernard Widrow em (WIDROW et al., 1975). Pelo seu conceito original, representado pela Figura 2, o Cancelamento Adaptativo de Ruído foi baseado no Filtro de Wiener e no Algoritmo Adaptativo “*Least Mean Squares*” (LMS).

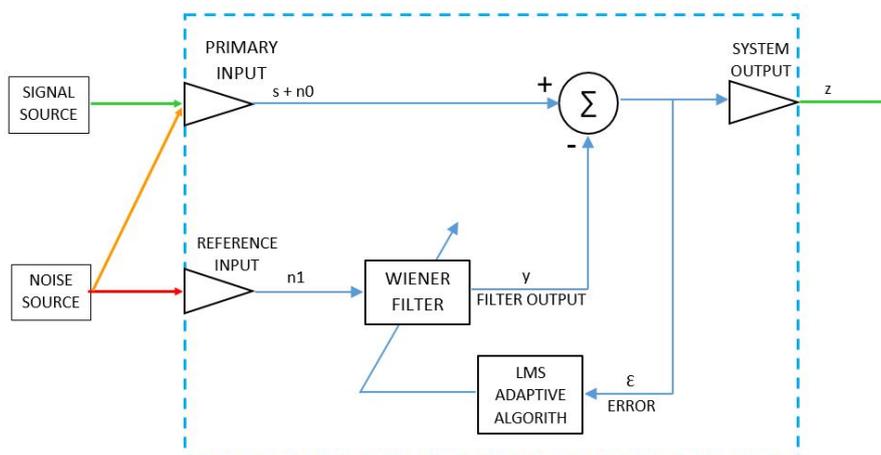


Figura 2 – Conceito Original de ANC
Fonte: O Autor (2018).

Segundo a problemática original, deseja-se obter um sistema capaz de gerar uma saída z livre de ruído a partir de uma entrada primária que capta o sinal s combinado com um ruído n_0 e uma entrada de referência de ruído n_1 .

A saída z é representada pela Equação 3.1

$$z = s + n_0 - y \quad (3.1)$$

A solução para o problema pode ser encontrada desde que o processo de adaptação do filtro gere uma saída y tal que $y = \hat{n} \approx n_0$. Como o sinal s não possui correlação com o ruído n_0 , pode ser comprovada que a convergência do filtro se dará desta forma. Assim teremos

$$z = s + n_0 - w^T * n_1 = s + n_0 - \hat{n} \Rightarrow z = s \quad (3.2)$$

Para iniciar a explicação de como funciona o sistema ANC, necessita-se da definição do Filtro de Wiener. A Equação 3.3 define o modelo matemático da saída $y(n)$ do filtro e Figura 3 corresponde a sua representação gráfica.

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w(i) x(n-i) \quad (3.3)$$

onde

n é o índice de tempo;

L é a ordem do filtro;

$w(i)$ são os coeficientes filtro;

$y(n)$ é a saída do filtro no instante n ;

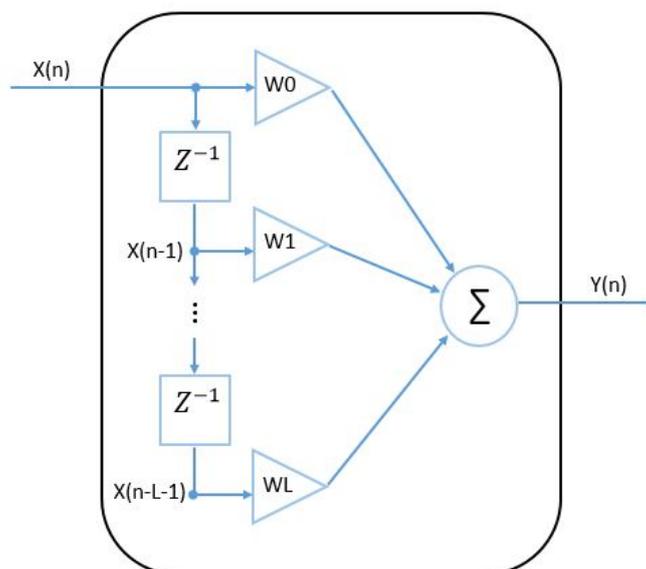


Figura 3 – Filtro FIR de Wiener
 Fonte: O Autor (2018).

No processo de “*feedback*” do Filtro de Wiener, para determinar o erro da saída deve-se comparar a saída do filtro com o sinal desejado. A malha de realimentação é representada graficamente pela Figura 4.

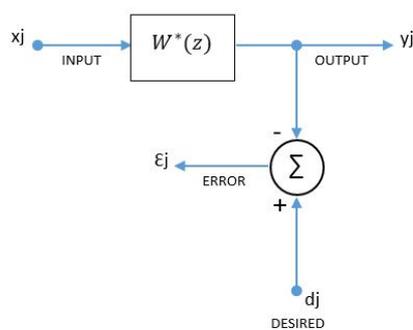


Figura 4 – Realimentação do Filtro de Wiener
 Fonte: O Autor (2018).

Analisando a Figura 4 podemos obter a Equação 3.4, que representa o

“feedback” de Erro do filtro.

$$e(n) = d(n) - y(n); \quad (3.4)$$

onde

- n é o índice de tempo;
- $e(n)$ é o erro no instante n ;
- $d(n)$ é o sinal desejado no instante n ;
- $y(n)$ é a saída do filtro no instante n ;

O cálculo dos novos coeficientes e a adaptação do Filtro de Wiener poderá ser realidade por diversas metodologias. Na problemática original, Widrow utilizou a adaptação LMS para o ANC. O processo de Adaptação LMS é definido pela Equação 3.5:

$$w(k+1) = w(k) + \mu * e(k) * x(k); \quad (3.5)$$

onde

- k é o índice de tempo;
- μ é uma constante de adaptação, geralmente definida no intervalo $(0 : 2]$;
- $e(k)$ é o erro no instante k ;
- $x(k)$ é a entrada no instante k ;
- $w(k)$ é coeficiente do filtro do instante k ;
- $w(k+1)$ é coeficiente do filtro do instante $k+1$;

Neste trabalho utilizaremos a adaptação “*Normalized Least Mean Squares*” (NLMS), que se mostrou mais eficiente ao longo do tempo por utilizar um passo normalizado no processo de adaptação. Isso faz com que a saída do filtro tenha uma adaptação mais rápida. O processo de Adaptação NLMS é definido pela Equação 3.6:

$$w(k+1) = w(k) + \frac{2\alpha}{\varepsilon + \|x(k)\|^2} * e(k) * x(k); \quad (3.6)$$

onde

k é o índice de tempo;

α é uma constante de adaptação, geralmente definida no intervalo $(0 : 1]$;

ε é uma constante próxima de zero e evita a divisão por zero;

$\|x(k)\|^2$ é normalização pelo vetor de entrada, norma Euclidiana quadrática do vetor de entrada $x(k)$ e obtido por $x^T(k)x(k)$;

$e(k)$ é o erro no instante k ;

$x(k)$ é a entrada no instante k ;

$w(k)$ é coeficiente do filtro do instante k ;

$w(k + 1)$ é coeficiente do filtro do instante $k+1$;

3.2 Outros Conceitos Básicos Utilizados

A base teórica que será utilizada para proposta de metodologia e desenvolvimento do protetor auricular eletrônico é fundamentada em Processamento Digital de Sinais. Esta Seção irá discursar sobre a base teórica e fazer a inter-relação com a aplicação proposta, bem como, fornecer o resultado da pesquisa científica atualizada de conteúdos relacionados a esse tema.

3.2.1 Teorema de Nyquist ou Teorema da Amostragem

A base da teoria de Processamento Digital de Sinais está fundamentada na teoria da amostragem, portanto o conhecimento em frequência de amostragem, quantização e *aliasing* são fundamentais para a proposta. Durante o processo de amostragem de um sinal contínuo temos de ter em mente o teorema de Nyquist: a frequência de amostragem deve ser maior do que duas vezes a frequência máxima do sinal, e é representada pela Equação 3.7.

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (3.7)$$

Relacionando isso com a aplicação proposta e sabendo que um sinal de áudio $\in [20, 20.000]$ Hz no domínio frequência, podemos determinar que a frequência

de amostragem é dada pela equação 3.8.

$$f_s \geq 40.000 \text{ Hz} \quad (3.8)$$

Portanto, segundo Nyquist, deveremos ter uma frequência de amostragem superior à demonstrada pela Equação 3.8. Porém isso nos leva à um mínimo de pouco mais duas amostras na frequência máxima do sinal. Pensando no objetivo de produzirmos um sistema de alta qualidade e que pretende cancelar ruídos de frequências próximas à 20 kHz, propomos uma f_s maior que Nyquist e que seja factível com os processadores DSP atuais. No sistema proposto utilizaremos a frequência de amostragem f_s definida pela Equação 3.9

$$f_s = 192.000 \text{ Hz} \quad (3.9)$$

3.2.2 Potência de um Sinal Discreto

A Potência de um sinal é definida como a Energia de um sinal em um dado intervalo de tempo. No domínio discreto é obtida através da Equação 3.10:

$$P(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2 \quad (3.10)$$

onde

$P(n)$ é a Potência do sinal x no instante de tempo n ;

n é o instante de tempo;

N é o tamanho do intervalo de tempo em que se quer avaliar a Potência do sinal x ;

$x(n)$ é o valor da amplitude do sinal x no instante de tempo n ;

Para diminuir o esforço computacional do sistema utilizaremos a Equação 3.11 na estimativa de Potência de sinal do próximo instante:

$$P(n+1) = P(n) - \frac{[x(1)]^2}{N} + \frac{[x(n+1)]^2}{N} \quad (3.11)$$

onde

$P(n + 1)$ é a Potência do sinal x no próximo instante de tempo;

$P(n)$ é a Potência do sinal x no instante de tempo n ;

n é o instante de tempo;

N é o tamanho do intervalo de tempo em que se quer avaliar a Potência do sinal x ;

$x(1)$ é o valor da amplitude do sinal x no instante de tempo 1;

$x(n + 1)$ é o valor da amplitude do sinal x no próximo instante de tempo;

3.2.3 Atenuação de um Sinal Discreto

A Atenuação de um sinal é definida como a relação entre o módulo da Amplitude de Saída e o módulo da Amplitude de Entrada de um sistema. A Atenuação é comumente expressa em decibéis para sistemas que trabalham com áudio e definida pela Equação 3.12:

$$A_{dB}(n) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^N |x_{out}(n)|}{\sum_{n=1}^N |x_{in}(n)|} \right) \quad (3.12)$$

onde

$A_{dB}(n)$ é o valor de atenuação em dB no instante de tempo n ;

n é o instante de tempo;

N é o tamanho do intervalo de tempo em que se quer avaliar a Atenuação do sinal x ;

$|x_{out}(n)|$ é o módulo do valor da amplitude do sinal de saída no instante de tempo n ;

$|x_{in}(n)|$ é o módulo do valor da amplitude do sinal de entrada no instante de tempo n ;

3.2.4 Filtro FIR Passa-banda

Filtros FIR Passa-banda são filtros digitais de resposta ao impulso finito que permitem a passagem de sinais dentro de uma determinada faixa de frequências específica. São filtros de convolução e genericamente definidos pela Equação 3.13 abaixo:

$$y(n) = \sum_{i=0}^P h_i x(n - i) \quad (3.13)$$

onde

$y(n)$ é a saída do filtro;

n é o instante de tempo;

P é a ordem do filtro;

h_i são os coeficientes do filtro;

$x(n - i)$ é o valor do sinal de entrada no instante de tempo $n-i$;

No sistema proposto, iremos utilizar um Filtro FIR Passa-banda para identificar a banda de voz do áudio ambiente. Na implementação do filtro, definimos como banda de voz a faixa de frequências entre [320, 3400] Hz, um ripple máximo na banda de passagem de 1 e uma atenuação mínima da banda de rejeição de -80 dB. O filtro deve ter uma distorção de fase linear por se tratar de sinais de áudio e escolhemos o tipo de filtro Kaiser Window. Através da implementação de filtro pelo Matlab obtemos um filtro de ordem 24090, com os seus coeficientes representados pela Figura 5 e a resposta em frequência representada na Figura 6 abaixo:

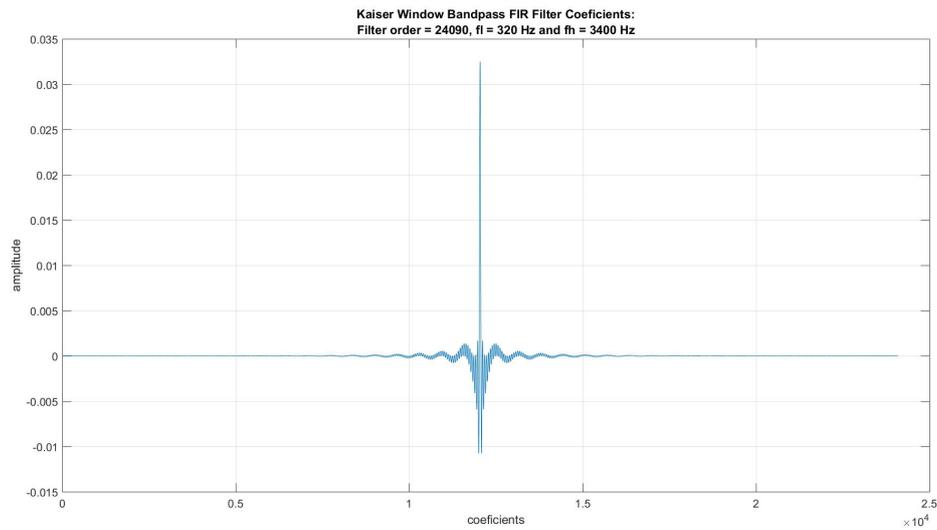


Figura 5 – Coeficientes do Filtro Passa-banda
 Fonte: O Autor (2018).

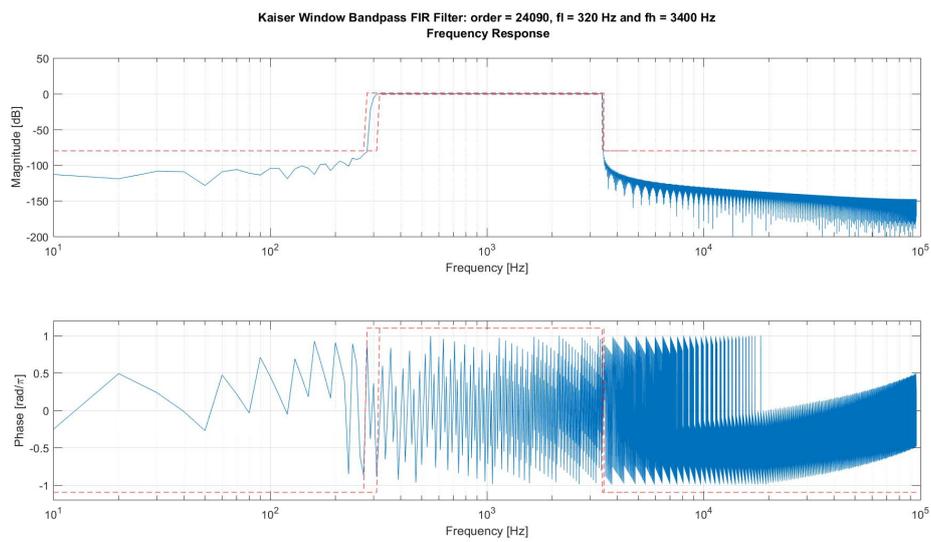


Figura 6 – Resposta em Frequência do Filtro Passa-banda
 Fonte: O Autor (2018).

3.2.5 Filtro FIR Rejeita-banda

Filtros FIR Rejeita-banda são filtros digitais de resposta ao impulso finito que impedem a passagem de sinais dentro de uma determinada faixa de frequências específica. São filtros de convolução e definidos genericamente pela mesma Equação 3.13.

No sistema proposto, iremos utilizar um Filtro FIR Rejeita-banda para identificar as bandas laterais da voz no áudio ambiente. Na implementação do filtro, definimos como banda rejeitada a faixa de frequências entre [320, 3400] Hz, um ripple máximo na banda de passagem de 1 e uma atenuação mínima da banda de rejeição de -80 dB. O filtro deve ter uma distorção de fase linear por se tratar de sinais de áudio e escolhemos o tipo de filtro Kaiser Window. Através da implementação de filtro pelo Matlab obtemos um filtro de ordem 24091, com os seus coeficientes representados pela Figura 7 e a resposta em frequência representada na Figura 8 abaixo:

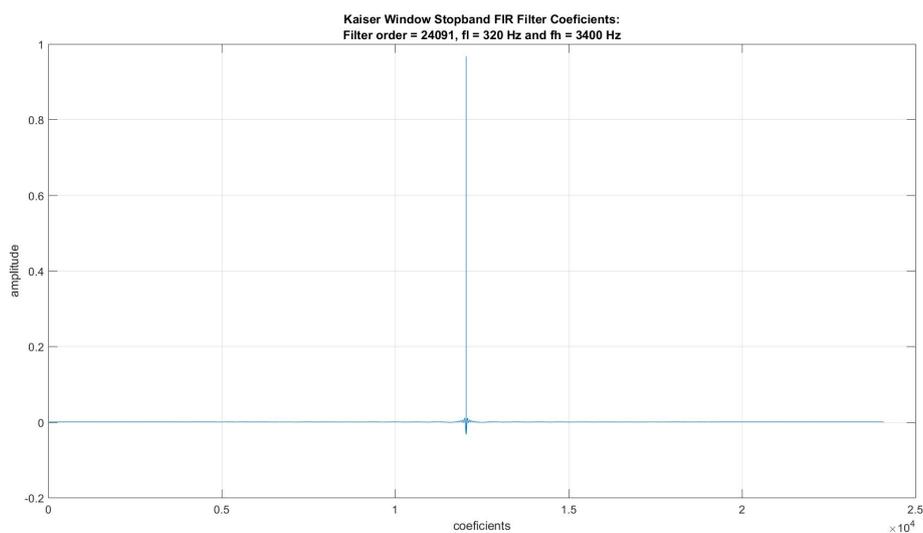


Figura 7 – Coeficientes do Filtro Rejeita-banda
Fonte: O Autor (2018).

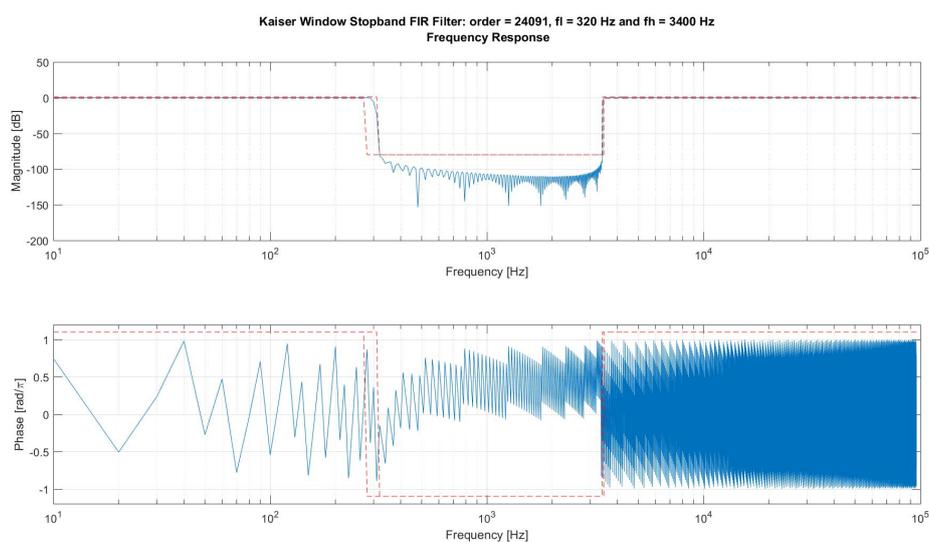


Figura 8 – Resposta em Frequência do Filtro Rejeita-banda
Fonte: O Autor (2018).

3.3 State of Art

O artigo de (DIXIT, 2017) faz a revisão e o levantamento dos algoritmos de adaptação LMS estudados nos últimos tempos. Pode-se destacar no artigo a Tabela que apresenta os algoritmos adaptativos e as fórmulas dos métodos recursivos. Na Figura 9 é apresentada as variações do algoritmo LMS levantadas.

Variation of LMS algorithm	
Algorithm type	Recursion (Weighted)
Conventional LMS	$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu^* e(n) * x(n-i)$
NLMS	$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{c + \ x(n)\ ^2} e(n) x(n)$
(MN-LMS)	$W(n+1) = W(n) + \beta \frac{X(n)}{\epsilon + \ X(n)\ ^2} \mu e(n)$ Where, $0 < \beta < 2$
Leaky LMS	$W(n+1) = (1 - \mu\gamma)W(n) + X(n)\mu e(n)$ Where, leaky coefficient γ , $0 < \gamma < 1$ $0 < \mu < (\gamma + \lambda_{max})$
(B-LMS)	$W((k+1)L) = W(kL) + \mu \sum_{l=0}^{L-1} e(kL+l) X(kL+l)$ Where, $l = 0, 1, 2, \dots, L-1$
(SE-LMS)	$W(n+1) = W(n) + X(n)\mu \text{sgn}[e(n)]$ Where, $\text{sgn}(\cdot) = \text{signum function } \text{sgn}[e(n)] = \begin{cases} 1 & \text{for } e(n) > 0 \\ 0 & \text{for } e(n) = 0 \\ -1 & \text{for } e(n) < 0 \end{cases}$
(SD-LMS)	$W(n+1) = W(n) + \text{sgn}[X(n)]\mu e(n)$ Where, $\text{sgn}(\cdot) = \text{signum function}$
(SDN-LMS)	$w_k(n+1) = w_k(n) + \frac{\mu}{ x(n-k) } e(n)x(n-k)$ Where, $\text{sgn}(\cdot) = \text{signum function}$
(SS-LMS)	$W(n+1) = W(n) + \text{sgn}[X(n)]\mu \text{sgn}[e(n)]$ Where, $\text{sgn}(\cdot) = \text{signum function}$
(VS-LMS)	$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu_k e(n)x(n-k)$ Where, $\mu_{min} < \mu < \mu_{max}$
(SS-LMS-LT)	$W(n+1) = (1 - \mu\gamma)W(n) + \text{sgn}[X(n)]\mu \text{sgn}[e(n)]$
(FX-LMS)	$W(n+1) = W(n) + X^{(n)}\mu e(n)$ Where, $X^{(n)} = \hat{s}(n)X(n)$
(FRS-LMS)	$W(n+1) = [I - \mu F]W(n) + X(n)\mu e(n)$ Where, $F = \square F_0$ and \square is constant
(H-LMS)	$W(n+1) = W(n) + X(n)\mu e(n)$ for, $0 \leq n \leq p$ $W(n+1) = W(n) + \frac{X(n)\mu(n)e(n)}{E[X(n)X^T(n)]}$ for, $n \geq p+1$

Figura 9 – Variações do algoritmo de Adaptação LMS
Fonte: (DIXIT, 2017)).

O tema ANC vem sendo referência em vários artigos científicos nos últimos anos. Nos artigos de (MON THIRI THANDAR AUNG, 2016), (GIRISHA, 2015), (LEE LU-EAN OOI; TEOH, 2017), (JI CHUNRONG HUANG et al., 2017) e (HIEU, 2016) são apresentadas simulações em MatLab de diferentes modelos e metodologias. Em (MON THIRI THANDAR AUNG, 2016) foram realizadas simulações de uma metodologia NLMS modificada e associada a um ruído Gaussiano como referência primária, conforme apresentada na Figura 10.

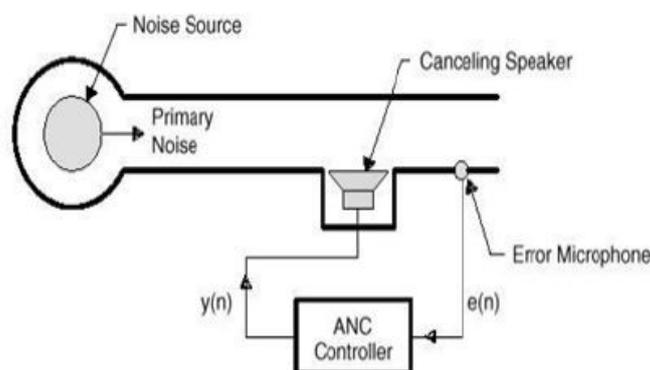


Figura 10 – Sistema ANC Gaussiano de Atar Mon
Fonte: (MON THIRI THANDAR AUNG, 2016).

Já em artigos como de (CHEN CHENG YUAN CHANG, 2017), (MOON, 2017) e (ANG YONG KHIANG KOH, 2017), são apresentados resultados experimentais de implementações do ANC. No artigo (MOON, 2017) o objetivo é um sistema com ANC LMS com *feedback* ativo (FBANC) e neste artigo são realizados ensaios experimentais da metodologia, conforme citado pela Figura 11.

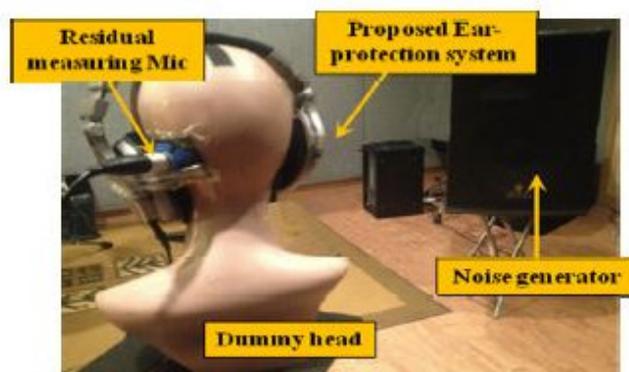


Figura 11 – Testes experimentais de Seong-Pil Moon
Fonte: (MOON, 2017).

..

A proposta deste trabalho é continuar a linha de pesquisa dos artigos citados, com a apresentação de simulações em MatLab de uma metodologia aplicada em protetores auriculares e obter resultados para justificar uma implementação de

um protetor auricular eletrônico. Este trabalho diferencia-se na metodologia e modelamento do sistema, onde a solução que se deseja alcançar é de caráter prático e seu resultado pode gerar um produto final com melhor eficiência.

4 Metodologia Proposta

A solução do problema proposto na Seção 2 inicia pela proposta de um circuito eletrônico baseada em DSP que será adicionada em um protetor auricular convencional. Assim sendo, antes de discutirmos a metodologia propriamente dita, devemos definir o circuito eletrônico que servirá de base para a metodologia. A Figura 12 apresenta um diagrama do sistema proposto. Cada item pode ser descrito pela sua funcionalidade da seguinte forma:

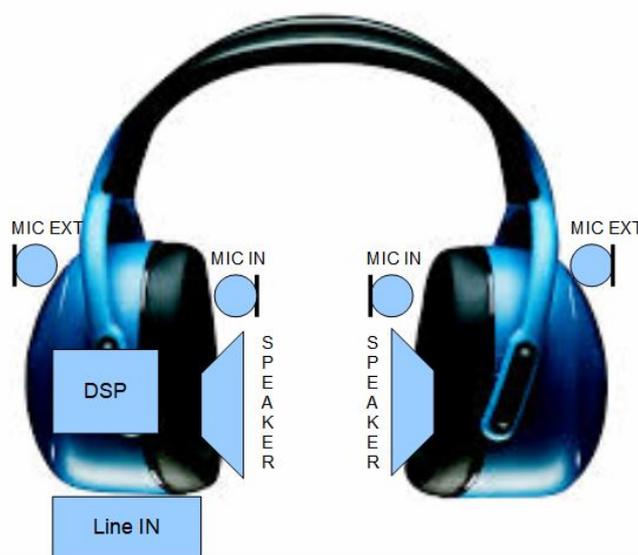


Figura 12 – Diagrama Esquemático da Eletrônica do Protetor Auricular.
Fonte: O Autor (2018).

1. *Line IN*: responsável pela captura da entrada de áudio de alta fidelidade, possuindo os estágios de amplificação, quantização e amostragem do sinal de áudio de entrada; é uma entrada *stereo* e, portanto, o seu circuito é duplicado em *Left* e *Right*;
2. *MIC EXT*: responsável pela captura do ruído ambiente externo ao protetor auricular, bem como, a captura do sinal da banda de voz externo; é uma entrada *stereo* e, portanto, o seu circuito é duplicado em *Left* e *Right*; possui

- um amplificador de entrada para condicionar o sinal do microfone externo na melhor faixa dinâmica para o quantizador; e um filtro anti-aliasing para limitar a frequência máxima do sinal e respeitar o limite da frequência de amostragem;
3. *SPEAKER*: responsável por gerar a saída do sistema de cancelamento adaptativo de ruído, a saída de áudio para a reprodução das mensagens e a saída da banda de voz limitada em potência; é uma saída *stereo* e, portanto, o seu circuito é duplicado em *Left* e *Right*; possui um filtro de saída e um amplificador para o condicionamento do sinal que será enviado ao autofalante;
 4. *MIC IN*: responsável pela realimentação através da captura de uma amostra do áudio dentro da concha acústica do protetor auricular e que será utilizada na adaptação do filtro ANC implementado no processador DSP; é uma entrada *stereo* e portanto o seu circuito é duplicado em *Left* e *Right*; possui um amplificador de entrada para condicionar o sinal do microfone interno na melhor faixa dinâmica para o quantizador; e um filtro anti-aliasing para limitar a frequência máxima do sinal e respeitar o limite da frequência de amostragem;
 5. *DSP*: responsável pelo tratamento matemático de todas as entradas e saídas do sistema dependendo do modo de operação selecionado pelo usuário. Este bloco será melhor detalhado nas próximas subseções com a descrição da metodologia que será proposta nesse artigo.

A eletrônica proposta é apresentada em diagrama de blocos conforme a Figura 13.

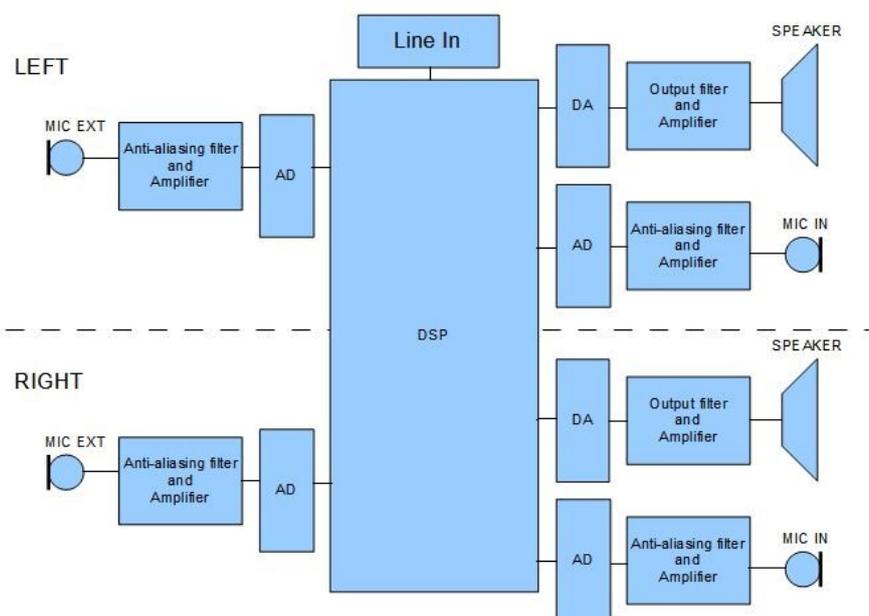


Figura 13 – Diagrama Funcional da Eletrônica.
 Fonte: O Autor (2018).

Para prosseguir com a discussão dos modos de operação e as metodologias necessárias na implementação do bloco DSP, apresentamos o Diagrama Funcional do sistema eletrônico de proteção auricular na Figura 14. Faremos a análise de sua relação com os objetivos do Capítulo 2.

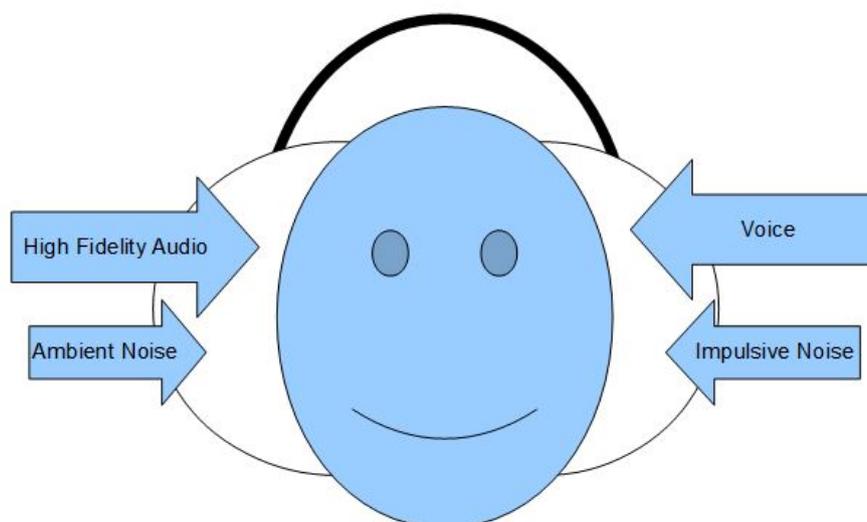


Figura 14 – Diagrama Funcional do Sistema.
Fonte: O Autor (2018).

A partir do Diagrama Funcional do sistema eletrônico de proteção auricular podemos perceber que existem quatro fontes distintas de áudio. Isso nos leva a divisão em cenários distintos para uma análise mais robusta: Cenário de Ruído Ambiente, Cenário de Áudio de Alta Fidelidade, Cenário de Voz com Ruído Ambiente e Cenário de Ruídos de Alta Potência e Impulsivos. Cada cenário caracteriza-se da seguinte forma:

1. Cenário de Ruído Ambiente: neste cenário o usuário recebe o estímulo proveniente do ruído que o cerca. Sendo assim, na modelagem do sistema utilizaremos a captação do ruído ambiente através do microfone externo como entrada de referência de ruído do ANC, a saída do autofalante como gerador de um sinal de cancelamento de ruído e a entrada de microfone interno como o erro para os algoritmos de adaptação NLMS. Esse será definido como o modo de operação de **Atenuação Máxima** e se relaciona diretamente com o objetivo específico de elevar o nível de proteção do EPI;
2. Cenário de Áudio de Alta Fidelidade com Ruído Ambiente: neste cenário o usuário deve escutar um áudio de alta fidelidade proveniente de um sistema externo e minimizar a interferência do ruído do ambiente que o cerca. Para

isso, utilizaremos a entrada de áudio Line_In com o áudio desejado, a entrada de microfone externo como referência de ruído, reproduzir o áudio de alta fidelidade no autofalante e utilizar a entrada de microfone interno como sinal de *feedback* para o sistema. Esse será definido como o modo de operação de **Alta Fidelidade** e se relaciona diretamente com o objetivo específico de proporcionar um canal de áudio para sistemas externos;

3. Cenário de Voz com Ruído Ambiente: neste cenário o usuário deseja escutar uma pessoa próxima falando em um ambiente com ruído. Para isso, iremos capturar a fala e o ruído ambiente através do microfone externo, reproduzir a banda de voz deste áudio através do autofalante, utilizar as bandas laterais como referência de ruído externo e utilizar a entrada de microfone interno como sinal de *feedback* para o sistema. Esse será definido como o modo de operação de **Banda de Voz** e se relaciona diretamente com o objetivo específico de possibilitar ao usuário perceber o áudio da banda de voz ambiente;
4. Cenário de Ruídos de Alta Potência e Impulsivos: neste cenário existem ruídos de alta potência sonora ou ruídos impulsivos presentes no ambiente que cerca o usuário. Com o intuito de proteger o usuário contra esse tipo de fonte sonora, utilizaremos a entrada de microfone externo na detecção de fontes desta natureza e proteger o usuário conforme os limites estabelecidos por norma. Esse será definido como um modo de operação perene e denominado como **Ruído Impulsivo**. Está relacionado com todos os modos de operação anteriores, em especial no Modo de Banda de Voz, e serve como medida protetiva para o usuário;

Agora que definimos os modos de operação do sistema e entendemos a sua relação com os objetivos e os cenários em que o protetor auricular eletrônico estará submetido, podemos passar para a implementação da metodologia de cada modo.

4.1 Modo de Atenuação Máxima

O Modo de Atenuação Máxima tem como objetivo específico elevar em no mínimo 6 dB o nível de proteção total do protetor auricular através da eletrônica. Podemos perceber pelo diagrama funcional apresentado na Figura 15, e referente

ao Cenário de Ruído Ambiente, que se trata da aplicação direta de um filtro de Cancelamento Adaptativo de Ruído.

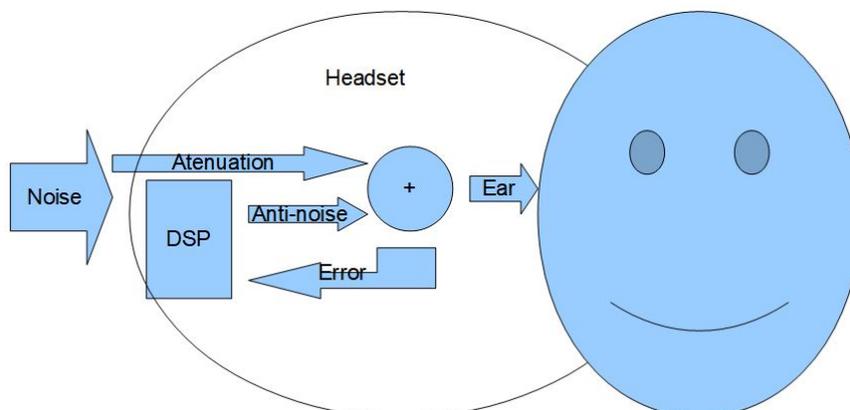


Figura 15 – Diagrama Funcional do Cenário de Ruído Ambiente.
Fonte: O Autor (2018).

Para a utilização do filtro ANC como metodologia de Cancelamento de Ruído, modelamos o sistema através da ligação da entrada de referência de ruído do filtro ao microfone externo, a saída do filtro ao autofalante e a entrada de *feedback* ao microfone interno da concha acústica. O usuário deseja silêncio e assim o sinal de entrada desejado para o filtro é nulo. Esse será o modelamento para o modo de operação Atenuação Máxima e sua metodologia representada pela Figura 16.

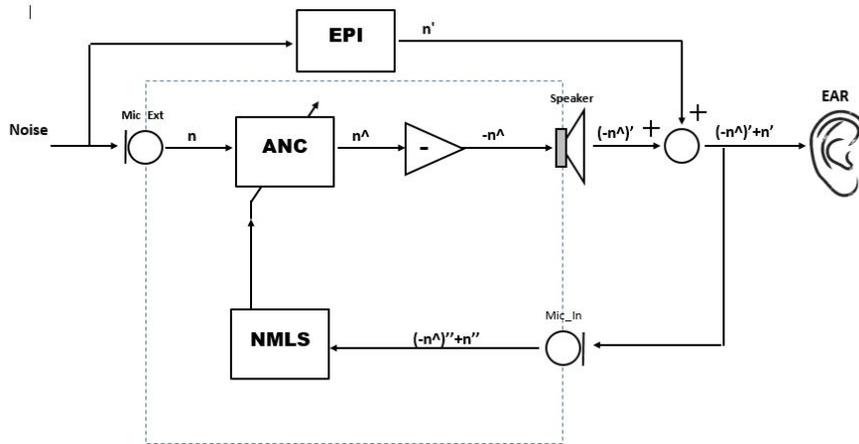


Figura 16 – Metodologia do Modo de Máxima Atenuação.
 Fonte: O Autor (2018).

Neste modo o filtro ANC e o algoritmo de adaptação NLMS geram uma saída que é a predição do sinal de ruído n , e representada por \hat{n} . A predição é reproduzida no autofalante em contra fase para que a resultante dentro da concha acústica seja quase nula. A resultante entre o ruído ambiente atenuado pelo EPI e a saída do autofalante é captada pelo microfone interno e utilizada como sinal de erro para adaptação NLMS dos coeficientes do filtro ANC. O filtro adaptativo é necessário neste modo de operação pois não conhecemos a função de transferência do EPI que atenua o ruído ambiente (n'). Além disso, devemos inferir o valor do ruído atenuado para o próximo instante de tempo através das amostras anteriores do ruído, de modo que a saída seja uma predição da referência de entrada. Isso torna o filtro ANC em um filtro preditivo, onde fazemos a adaptação do filtro a partir da entrada atual e calculamos a sua saída para o instante seguinte. Para uma análise da metodologia, existem mais três funções de transferência desconhecidas no sistema, são elas: a função de transferência do autofalante e as funções de transferência dos microfones externo e interno. Estas funções serão importantes nos demais modelamentos e metodologias que serão propostas nesta solução. Neste modelo basta entender que são compensadas diretamente pela adaptação do filtro ANC e não geram descontinuidade durante as passagens entre o domínio real (sonoro) e o domínio digital.

4.2 Modo de Alta Fidelidade

O Modo de Alta Fidelidade tem como objetivo específico criar um canal que possibilite o recebimento de mensagens e a reprodução em alta fidelidade de áudios provenientes de sistemas externos. Esse modo, representado pelo diagrama funcional da Figura 17, diferencia-se do modo de Atenuação Máxima pelo fato de que o usuário deseja escutar o áudio referente ao sistema externo de som, adquirido pela entrada de áudio Line_ In.

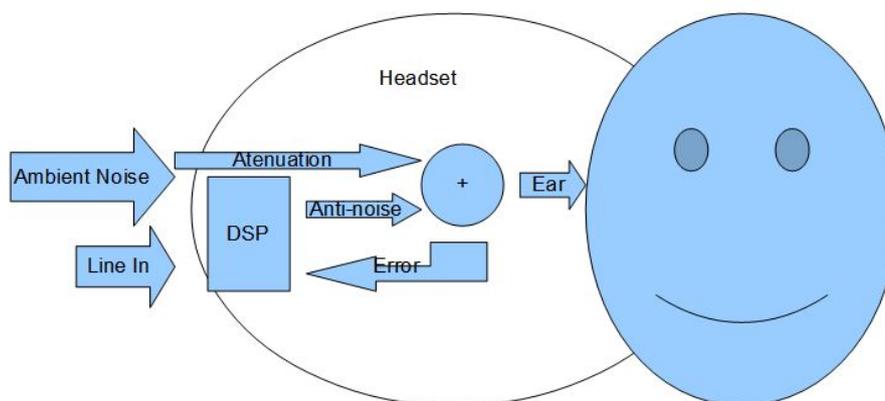


Figura 17 – Diagrama Funcional do Cenário de Alta Fidelidade.
Fonte: O Autor (2018).

Inicialmente a metodologia proposta para esse modo de Alta Fidelidade poderia ser representada pela Figura 18, porém vamos identificar pontos de melhoria na estimativa do erro que geraram um caráter inovador no processo.

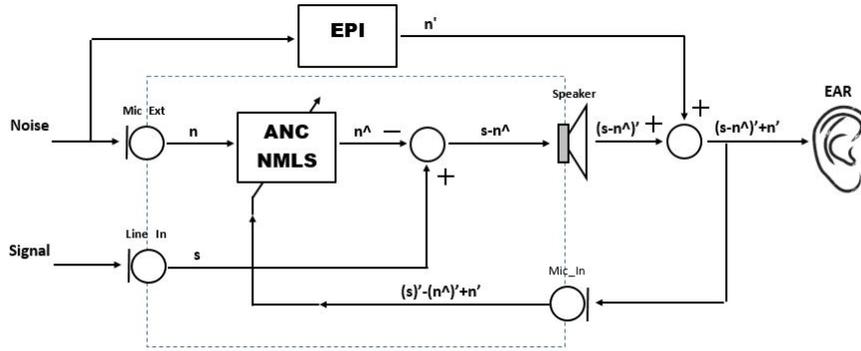


Figura 18 – Primeira Metodologia para Alta Fidelidade.
 Fonte: O Autor (2018).

Observamos durante as simulações deste modo de operação que o algoritmo de adaptação NLMS leva um grande tempo para a estabilização, e isso é causado pela influência numérica do sinal s no cálculo do erro $e(n)$. Utilizando o fato de que conhecemos a entrada de Line_In, propomos uma modificação na rede de cálculo do erro de modo que elimine a influência numérica. Esta modificação é representada na Figura 19.

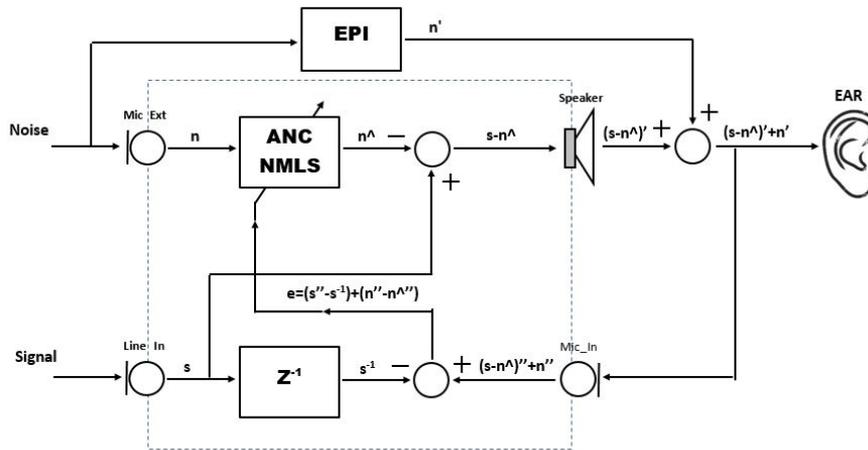


Figura 19 – Segunda Metodologia para Alta Fidelidade.
 Fonte: O Autor (2018).

Considere a equação do erro proposta nesta metodologia: $e = (s'' - s^{-1}) + (n'' - \hat{n}'')$. O sinal s passa pelo autofalante e é recapturado pelo microfone interno,

e isso gera uma modificação na sua resultante s'' . Essas transições de domínios digital-real-digital não ocorrem com o sinal atrasado s^{-1} e o termo $(s'' - s^{-1})$ do erro não é cancelado corretamente. Proveniente deste fato, necessitamos uma nova modificação na metodologia de maneira que o cancelamento se realize de uma forma apropriada. Assim surge a terceira proposta para a metodologia de Alta Fidelidade representada pela Figura 20. Nesta forma as funções de transferência do autofalante e do microfone são linearizadas por uma constante “A” e que pode ser calibrada durante o processo de produção do protetor auricular eletrônico.

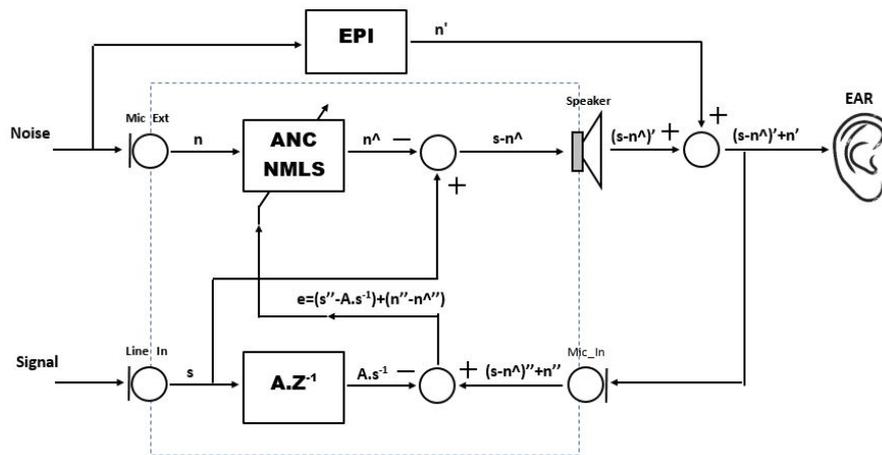


Figura 20 – Segunda Metodologia para Alta Fidelidade.
 Fonte: O Autor (2018).

De fato, estamos utilizando filtros adaptativos para o cancelamento de ruído e podemos utilizar a mesma técnica para o sinal s na rede de cálculo do erro. Isso eliminará o processo de calibração da constante “A” e proporciona uma metodologia mais robusta para o filtro.

Assim a metodologia final para o Modo de Alta Fidelidade pode ser representada pela Figura 21.

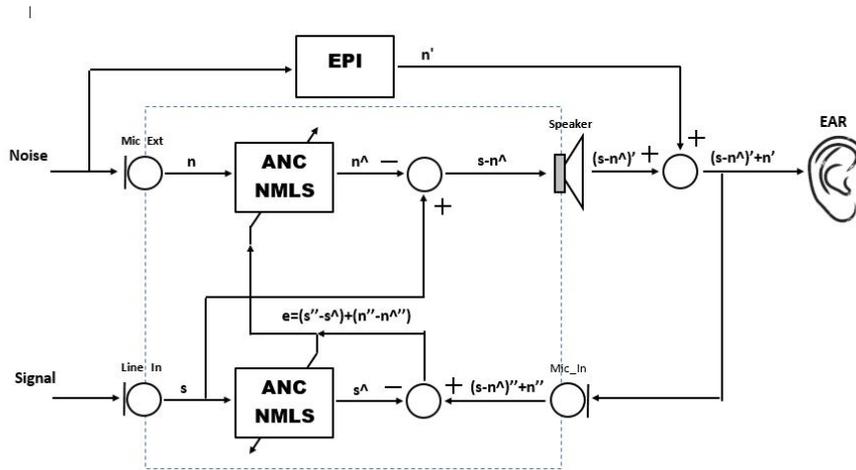


Figura 21 – Metodologia do Modo de Alta Fidelidade.
 Fonte: O Autor (2018).

Na metodologia do Modo Alta Fidelidade temos dois filtros adaptativos, um fazendo a predição do ruído e gerando como saída o sinal \hat{n} para o cancelamento do ruído dentro da concha acústica do protetor; e outro fazendo a adaptação do sinal de Line_In e tendo como saída o sinal \hat{s} que diminui a sua influência numérica na rede de erro. As realimentações de ambos os filtros acabaram tornando-se uma só e o sinal de Erro ($e(n)$) para a adaptação NLMS de ambos os filtros é o mesmo. Porém o processo de adaptação é diferente para cada um dos filtros, sendo sua adaptação independente e em relação ao seu sinal de entrada (referência de ruído externo e Line_In).

4.3 Modo de Banda de Voz

O Modo de Banda de Voz tem como objetivo específico possibilitar que o usuário perceba o áudio ambiente relativo a banda de voz, cancelando o ruído ambiente das bandas laterais e garantindo a proteção nos limites estipulados na regulamentação da NR-15 (MTE, 2014). Trata-se de uma variação do Modo de Alta Fidelidade, como iremos demonstrar na sequência desta metodologia. O Modo Banda de Voz é decorrente do diagrama funcional da Figura 22.

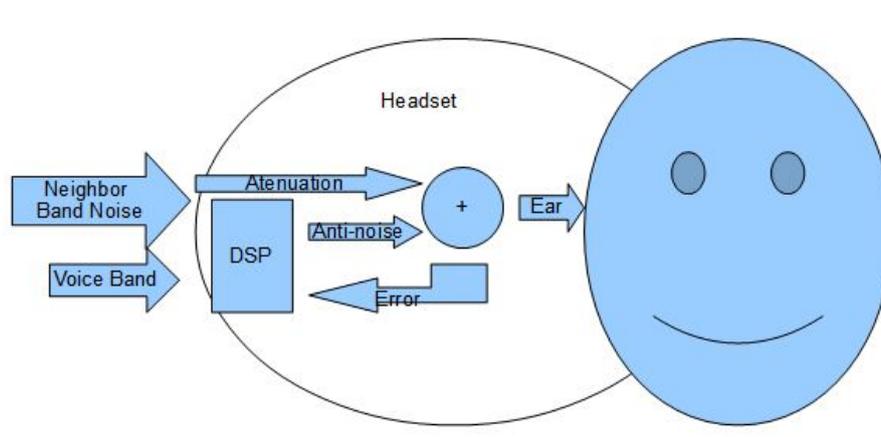


Figura 22 – Diagrama Funcional do Cenário de Voz com Ruído Ambiente.
Fonte: O Autor (2018).

Neste modelamento utilizamos somente a entrada de microfone externo para desenvolver a metodologia. O áudio do microfone externo é dividido em um sinal da banda de voz, proveniente de um filtro ideal passa-banda; e um sinal das bandas laterais, proveniente de um filtro ideal rejeita-banda. As frequências de corte para ambos os filtros são definidas pela escolha da banda de voz desejada, que para essa implementação foram definidas em 320 e 3400 Hz. Como mencionamos anteriormente, o sinal da banda de voz deve ser limitado em potência para que não haja dano ao sistema auditivo do usuário, e para isso utilizaremos um subsistema de Controle Automático de Ganho (AGC) baseado na potência sonora deste sinal. O AGC funcionará como um atenuador lento do sinal de entrada e é baseado em um conceito de histerese de atenuação. O limite do AGC deve ser calibrado uma única vez na fase de desenvolvimento do produto, pois pequenas variações não influenciarão na efetividade da proteção. Assim a metodologia proposta para o Modo de Banda Voz pode ser representado pela Figura 23.

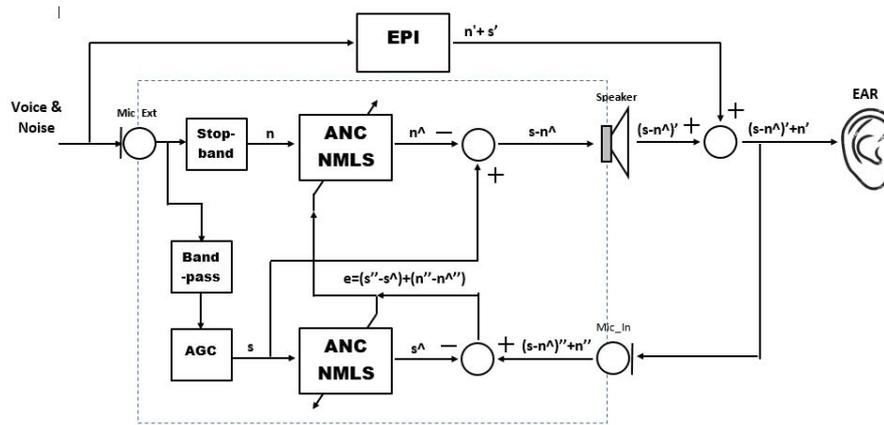


Figura 23 – Metodologia do Modo de Banda de Voz.
 Fonte: O Autor (2018).

Nesta metodologia existe uma modificação no filtro adaptativo NLMS do sinal em relação ao Modo de Alta fidelidade. No Modo de Banda de Voz esse filtro deve ser preditivo, como o filtro adaptativo de ruído. Isso se dá devido ao fato de que ruído e sinal estão atrasados em relação ao erro captado pelo microfone externo.

4.4 Modo de Ruído Impulsivo

O último objetivo específico é garantir a proteção do usuário contra ruídos de alta potência sonora e ruídos impulsivos. Esses ruídos caracterizam-se pela sua alta potência sonora concentrada em um breve instante de tempo e o AGC proposto no Modo de Banda de Voz não irá funcionar para estes casos. O AGC possui uma histerese lenta demais nesse caso. Por isso será acrescentado um bloco funcional, trabalhando em paralelo a todo sistema, de detecção de ruído de alta energia. Quando houver uma variação brusca de potência sonora e/ou superado um limite, poderemos inferir que houve a ocorrência de um ruído impulsivo. Então o sistema deve atuar no sentido de proteção do usuário através da troca de seu funcionamento para o Modo Atenuação Máxima. A troca ocorrerá durante um intervalo de tempo pré-estipulado, que foi definido como sendo dois (2) segundos, e ao seu término voltará para o modo de operação selecionado. Se ocorrer um

novo ruído impulsivo durante o período de proteção, será reiniciada a histerese de tempo. A metodologia para esta implementação é representada na Figura 24, onde o bloco funcional de detecção de ruído impulsivo verifica a potência sonora para a seleção do modo de proteção adequadamente.

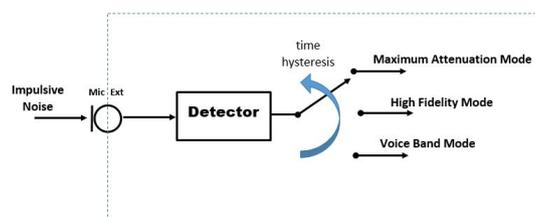


Figura 24 – Metodologia do Modo de Ruído Impulsivo
Fonte: O Autor (2018).

4.5 Metodologia de Proteção Auricular NLMS

Agora que possuímos quatro metodologias distintas e que resolvem todos os objetivos específicos, devemos unificá-las em uma só. Para isso devemos acrescentar ao sistema uma entrada para que o usuário escolha o modo de operação do protetor auricular eletrônico e unir todas as funcionalidades em um único diagrama funcional. Assim surge a metodologia final do sistema, representada na Figura 25 e denominada Metodologia de Proteção Auricular NLMS.

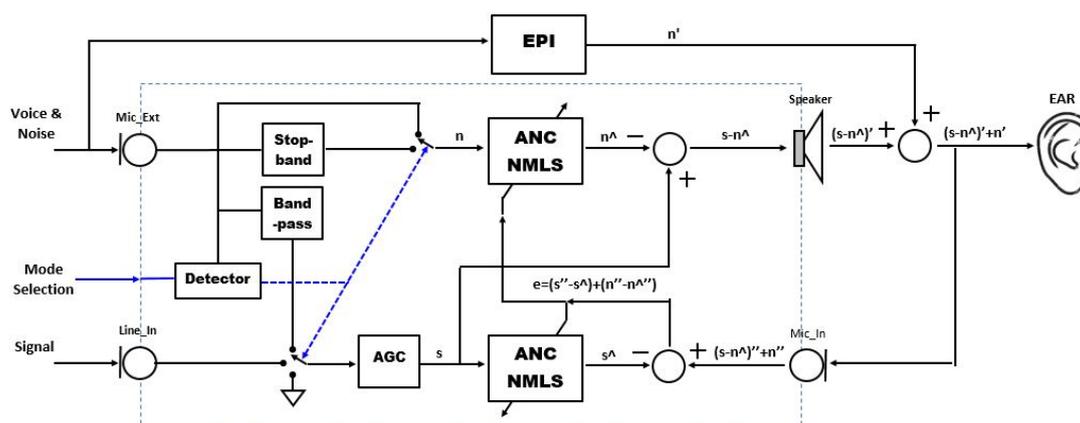


Figura 25 – Metodologia de Proteção Auricular NLMS.
 Fonte: O Autor (2018).

A Metodologia de Proteção Auricular NLMS contempla todas as funcionalidades exigidas pelos objetivos. Observamos que os modos de funcionamento do sistema de proteção auricular eletrônico é selecionado pelo usuário através da entrada de modo de seleção e que o modo efetivo de operação depende também do bloco de Detecção de ruídos impulsivos. Os sinais que serão utilizados pelos filtros adaptativos de ruído e sinal são selecionados automaticamente pelo modo de operação nas chaves seletoras.

Com a Metodologia de Proteção Auricular NLMS desenvolvida, partiremos para a descrição dos demais Capítulos dessa dissertação e onde serão demonstrados os resultados alcançados e as conclusões do trabalho.

5 Materiais e Métodos

O sistema eletrônico de proteção auricular tem como base um abafador mecânico de mercado. Como parâmetro de comparação e simulação do sistema, utilizaremos o Abafador 3M™ Peltor™ X1A da 3M do Brasil. Este modelo foi aprovado para um nível de proteção total de 21 dB (CAEPI, 2017) e sua certificação foi obtida e registrada sob número C.A. 32.837. Na Tabela 1 transcrevemos os níveis de proteção que constam na certificação do produto, cujos testes foram realizados pelo LAEPI - LABORATÓRIO DE EQUIPAMENTO DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL.

Tabela 1 – Tabela de Atenuação do Abafador 3M Peltor X1A

Frequência (Hz):	125	250	500	1000	2000	4000	8000	NRR
Atenuação dB:	12	16	24	32	33	38	30	21
Desvio Padrão:	3	3	2	3	3	3	3	

Fonte: Certificado C.A. 32837(CAEPI, 2017).

Como base de comparação da metodologia protetor auricular NLMS iremos utilizar três modelos de abafadores de mercado: 3M Peltor X5A, 3M Peltor ProTac II e Honeywell Impact Pro.

O modelo 3M Peltor X5A é um abafador mecânico e que durante a pesquisa nos certificados do Ministério do Trabalho e Emprego (CAEPI, 2017) obteve o maior nível de atenuação (NRR) encontrada. Esse modelo foi aprovado para um nível de proteção total de 29 dB (CAEPI, 2017) e sua certificação foi obtida e registrada sob número C.A. 32.841. Na Tabela 2 transcrevemos os níveis de proteção que constam na certificação do produto:

Tabela 2 – Tabela de Atenuação do Abafador 3M Peltor X5A

Frequência (Hz):	125	250	500	1000	2000	4000	8000	NRR
Atenuação dB:	20	28	39	43	38	37	35	29
Desvio Padrão:	3	4	3	3	2	3	3	

Fonte: Certificado C.A. 32841(CAEPI, 2017).

O modelo 3M Peltor ProTac II é um abafador ativo, possui uma eletrônica de cancelamento de ruído e é vendido como um comunicador, pois possui um canal de comunicação conforme proposto no terceiro objetivo específico. Esse modelo foi aprovado para um nível de proteção total de 25 dB (CAEPI, 2017) e sua certificação foi obtida e registrada sob número C.A. 28.584. Na Tabela 3 transcrevemos os níveis de proteção que constam na certificação do produto:

Tabela 3 – Tabela de Atenuação do Abafador 3M Peltor ProTac II

Frequência (Hz):	125	250	500	1000	2000	4000	8000	NRR
Atenuação dB:	14	22	32	33	33	35	36	25
Desvio Padrão:	3	2	2	3	2	2	3	

Fonte: Certificado C.A. 28584(CAEPI, 2017).

O modelo Honeywell Impact Pro é um abafador ativo, possui uma eletrônica de cancelamento de ruído e é considerado um dos melhores abafadores no mercado internacional. Esse modelo foi aprovado para um nível de proteção total de 33 dB (PZT, 2013) e sua certificação foi obtida e registrada sob número 391202-a em testes realizados pela PZT GmbH, Alemanha. Na Tabela 4 transcrevemos os níveis de proteção que constam na certificação do produto:

Tabela 4 – Tabela de Atenuação do Abafador Honeywell Impact Pro

Frequência (Hz):	125	250	500	1000	2000	4000	8000	NRR
Atenuação dB:	22.6	26.9	32.0	37.1	33.8	35.6	38.0	33
Desvio Padrão:	3.5	2.3	1.8	1.7	3.6	2.9	3.2	

Fonte: Certificado 391202-a(PZT, 2013).

As simulações da Metodologia de Proteção Auricular NLMS proposta para o sistema eletrônico foram realizadas através do software MatLab, versão R2016a. Nos modelos de simulação foram implementados com as especificações:

- Filtro de Cancelamento Adaptativo implementado conforme a metodologias propostas no Capítulo 4;
- Ordem dos Filtros ANC: 3;
- Frequência de Amostragem do sistema de 192 kHz;

- A janela de aquisição foi de 5 segundos (960000 amostras);
- Função de transferência do EPI simplificada com resposta espectral plana, sem ruído e ganho constante igual ao certificado conforme a faixa de frequência do ruído;
- Função de transferência dos microfones simplificada com resposta espectral plana, sem ruído e ganho constante igual à 0.97847;
- Função de transferência do autofalante simplificada com resposta espectral plana, sem ruído e ganho constante igual à 0.9475;
- Sinal de alta fidelidade de Entrada (Line_In) modelado por uma ou várias senoidais de amplitude 1 e variando a frequência conforme a análise; ou modelado por arquivos de áudio de sons reais com frequência de amostragem compatível com a do sistema;
- Ruído ambiente de Entrada modelado por uma ou várias senoidais de amplitude 1 e variando a frequência conforme a análise; ou modelado por arquivos de áudio de sons reais com frequência de amostragem compatível com a do sistema;

6 Simulações e Resultados Obtidos

O Capítulo de Simulações e Resultados Obtidos será dividido conforme os conjuntos de teste realizados. Essa divisão foi organizada de forma que possa mostrar os diversos Modos de Operação do sistema, as variações de sinais de entradas e as funcionalidades do AGC e do Detector de Ruídos Impulsivos implementados na Metodologia de Proteção Auricular NLMS.

6.1 Simulação e Resultados do Modo de Máxima Atenuação com Sinais Padrões

O primeiro conjunto de simulações validou o Modo de Atenuação Máxima com sinais conhecidos. Para isso foram feitas 7 simulações com ruído conforme as faixas de frequências estipuladas pela norma e apresentadas nos certificados dos equipamentos. Para melhorar a análise e verificar a performance da proposta como um sistema de alta fidelidade, foram propostas mais 3 simulações com as frequências de 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz, onde assumimos que a atenuação do EPI para estas frequências seja igual à declarada como $NRR = 21\text{dB}$. As Figuras 26, 27, 28 e 29 demonstram os gráficos dos resultados encontrados na simulação de 2000 Hz, onde a primeira mostra a visão geral da simulação, a segunda o início da simulação, a terceira o final da simulação e a última o gráfico de atenuação durante todo o intervalo simulado. No eixo x de todos os gráficos é representado o tempo transcorrido e no eixo y as amplitudes dos diversos sinais analisados. Os sinais representados são:

- *Environment Noise*: representa o sinal capturado pelo microfone externo;
- *Noise after PPE attenuation*: representa o ruído após a atenuação do EPI;
- *Noise ANC Output*: representa o sinal de saída do Filtro ANC NLMS de Ruído;
- *Speaker Output*: representa o sinal de saída do autofalante;

- *Audible Signal*: representa o sinal resultante dentro da concha acústico do protetor e que será ouvido pelo usuário;

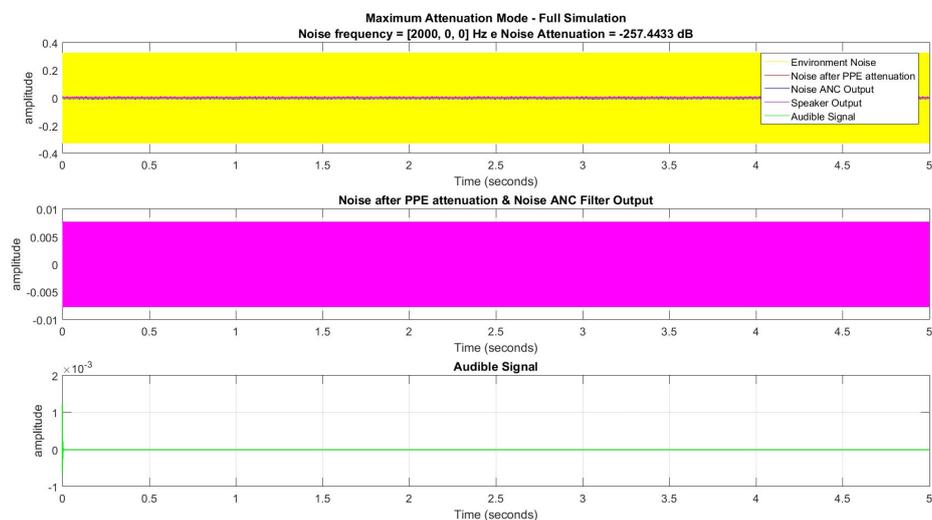


Figura 26 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz

Fonte: O Autor (2018).

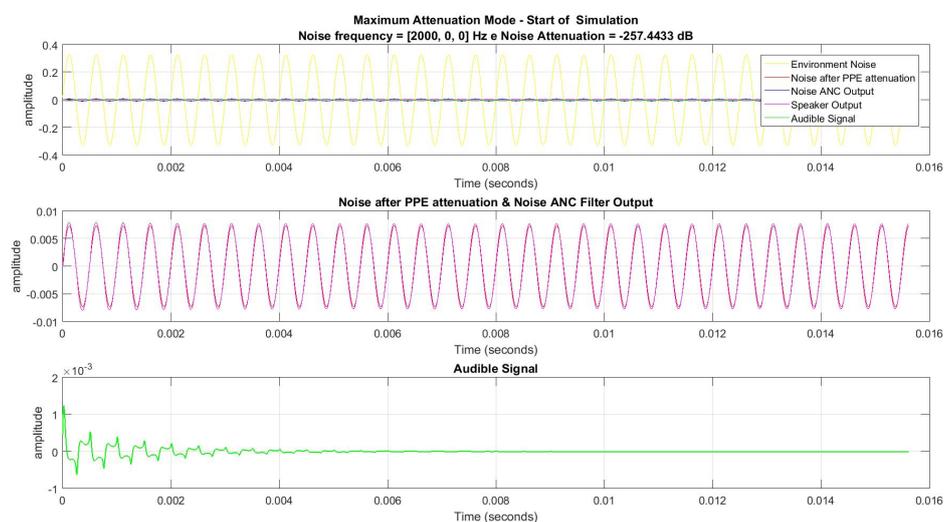


Figura 27 – Modo de Máxima Atenuação: Início da Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz

Fonte: O Autor (2018).

Note que no início da simulação o sinal audível já é pequeno e que a medida que o filtro se adapta, esse sinal começa a diminuir rapidamente a sua amplitude e tende à zero ao final da simulação.

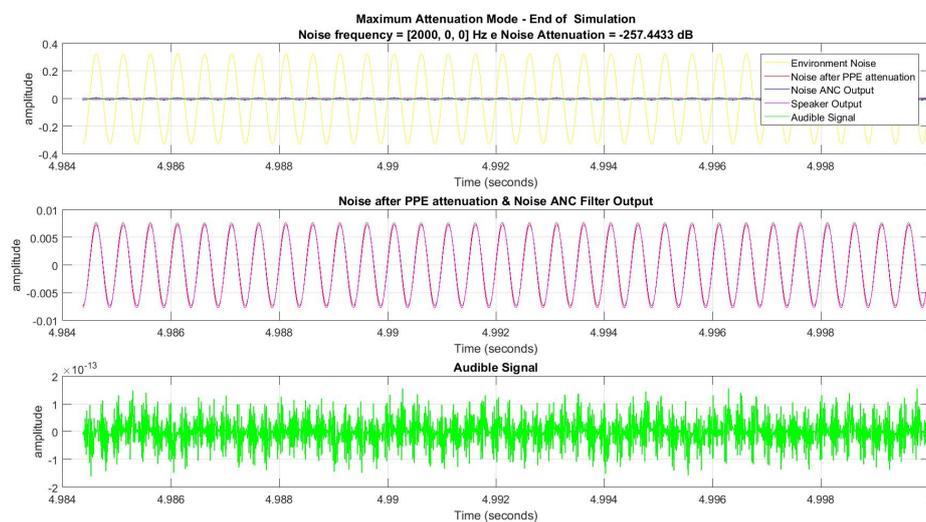


Figura 28 – Modo de Máxima Atenuação: Final da Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz

Fonte: O Autor (2018).

Note que no final da simulação o sinal audível já é muito pequeno e a sua amplitude é da ordem de 10^{-13} . Compare com a atenuação de -257.44 dB obtida.

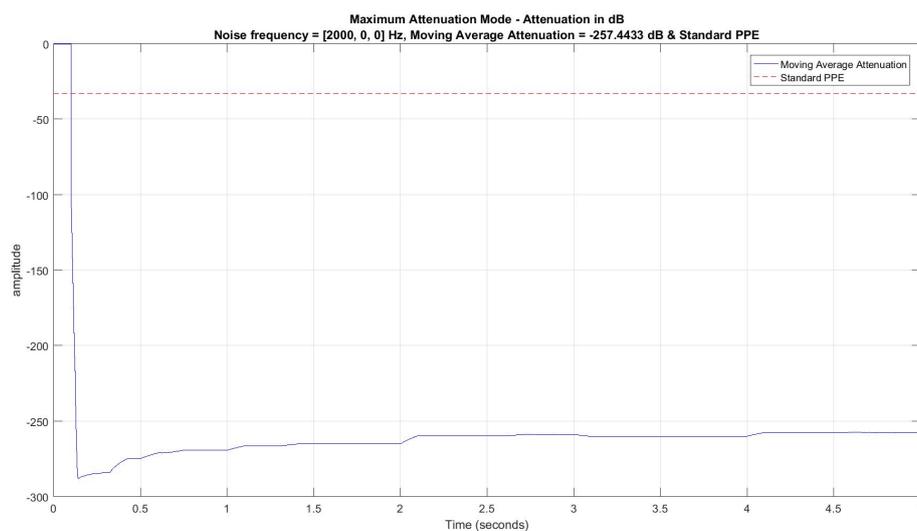


Figura 29 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz
Fonte: O Autor (2018).

Para a determinação do Nível de Redução de Ruído (NRR) através da simulação foi utilizado como sinal de ruído a soma de 3 senoides de frequências 250, 2000 e 8000 Hz testadas na norma e modelado o EPI com a atenuação de 21dB. O resultado do final da simulação é apresentado na Figura 30.

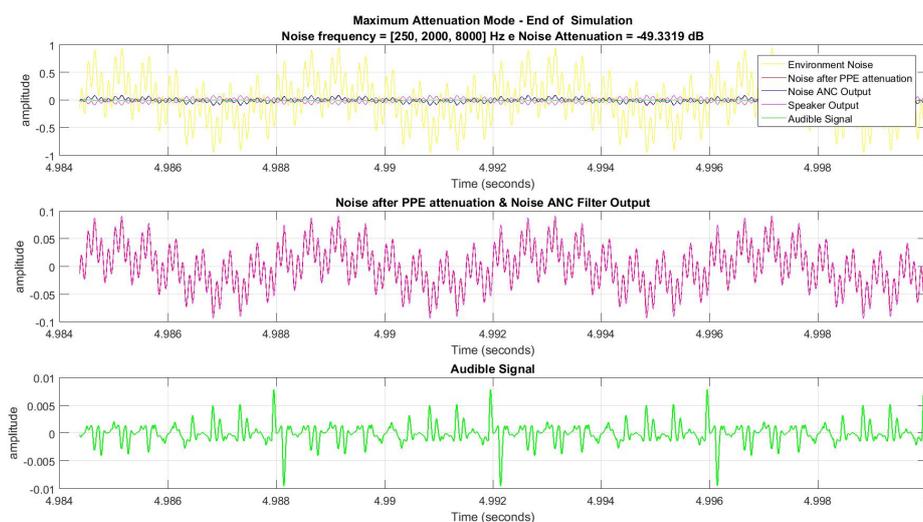


Figura 30 – Modo de Máxima Atenuação: Final da Simulação de Ruído Padrão de Frequências 250, 2000 e 8000 Hz

Fonte: O Autor (2018).

O resultado de todas as simulações do Modo de Máxima Atenuação é apresentado na Tabela 5. Podemos perceber que o protetor auricular eletrônico superou em muito o objetivo específico de elevar o nível de proteção em 6 dB para todas as frequências testadas.

Tabela 5 – Resultado das Simulações do Modo de Atenuação Máxima com Sinais Padrões

Frequência do Ruído	Atenuação Nominal do EPI	Atenuação Simulada	Diferença
125 Hz	12 dB	190,5	178,5
250 Hz	16 dB	260,3	244,3
500 Hz	24 dB	262,2	238,2
1000 Hz	32 dB	263,7	231,7
2000 Hz	33 dB	257,4	224,4
4000 Hz	38 dB	255,0	217,0
8000 Hz	30 dB	241,0	211,0
12000 Hz	21 dB ¹	225,4	204,4
16000 Hz	21 dB ¹	227,3	206,3
20000 Hz	21 dB ¹	221,4	200,4
NRR ²	21 dB	49,3	28,3

Fonte: O Autor (2018).

Pelos resultados obtidos podemos perceber que a Atenuação da Metodologia de Proteção Auricular NLMS é bastante dependente em relação ao sinal de entrada de ruído. A atenuação cai drasticamente com o aumento do espectro de frequências do ruído, como demonstrado na simulação de NRR.

Podemos analisar a atenuação em relação à frequência do sinal de ruído. Essa é apresentada no gráfico da Figura 31.

¹ Não existe valor apresentado no certificado do equipamento e utilizada Atenuação Nominal Total.

² Metodologia de simulação mais aproximada com o teste realizado na certificação.

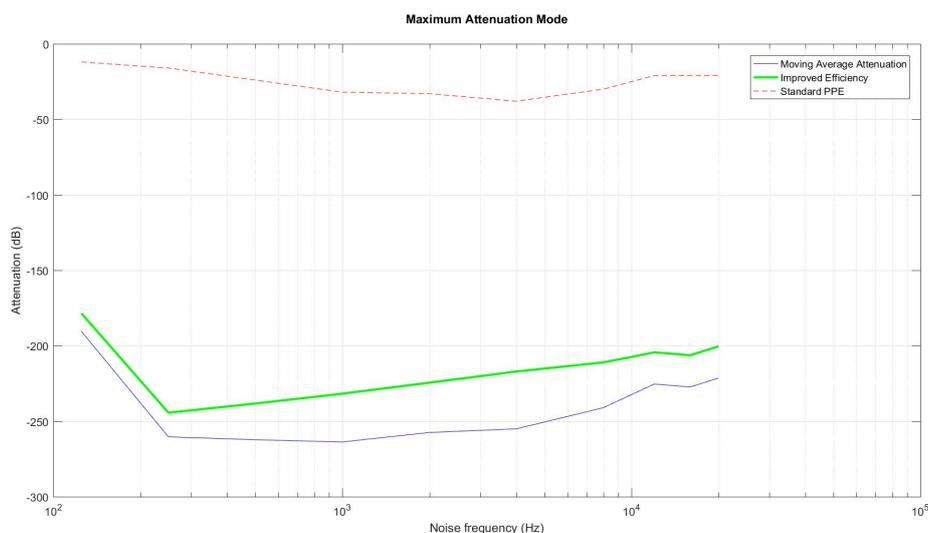


Figura 31 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação vs Frequência do Ruído Padrão

Fonte: O Autor (2018).

6.2 Simulação e Resultados do Modo de Máxima Atenuação com Sinais Reais

O segundo conjunto de simulações validou o Modo de Atenuação Máxima com sinais reais. Para isso foram utilizados 3 ruídos provenientes de arquivos de áudio no formato wave e com frequência de amostragem igual a do sistema de proteção auricular eletrônica. O primeiro arquivo de áudio é o som de um carro ligando, o segundo o trote de um cavalo e o terceiro o áudio de tráfego de uma rua com buzinas de diferentes tons. As 6 Figuras abaixo (32, 33, 34, 35, 36 e 37) representam as simulações completas e os gráficos das atenuações dos sinais reais.

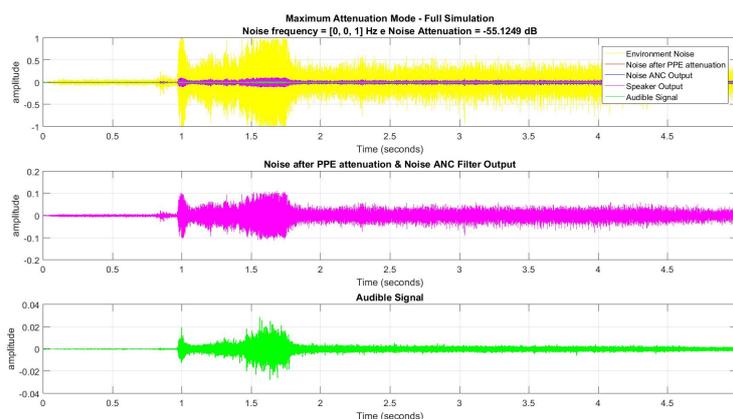


Figura 32 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Real Carro

Fonte: O Autor (2018).

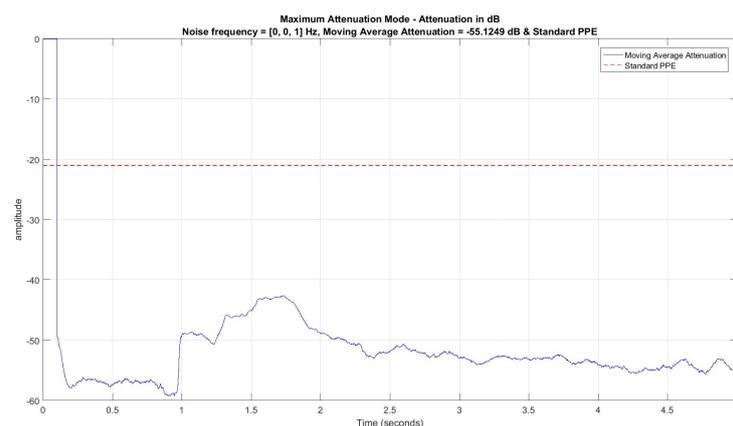


Figura 33 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Real Carro

Fonte: O Autor (2018).

Note que a Atenuação acompanha a variação de amplitude do ruído, reforçando o conceito de sua dependência intrínseca com a entrada.

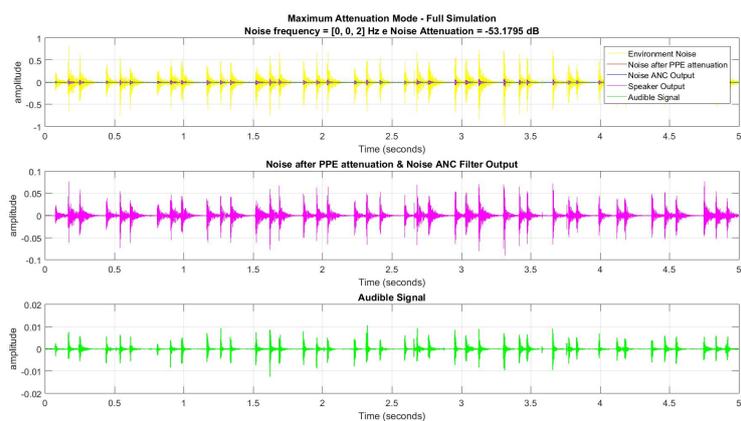


Figura 34 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Real Cavalo

Fonte: O Autor (2018).

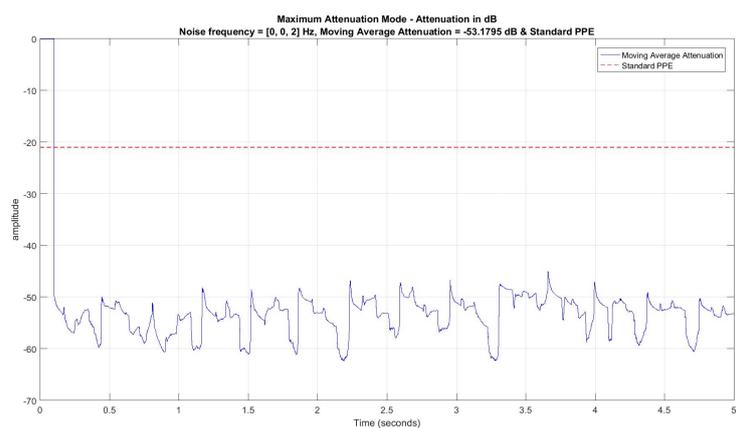


Figura 35 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Real Cavalo

Fonte: O Autor (2018).

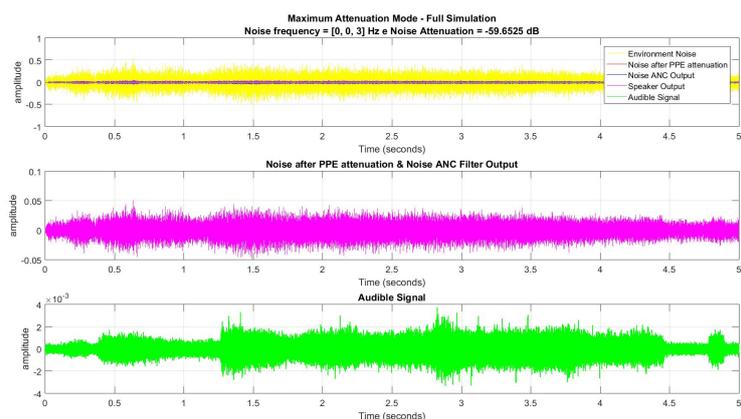


Figura 36 – Modo de Máxima Atenuação: Simulação completa de Ruído Real Tráfego

Fonte: O Autor (2018).

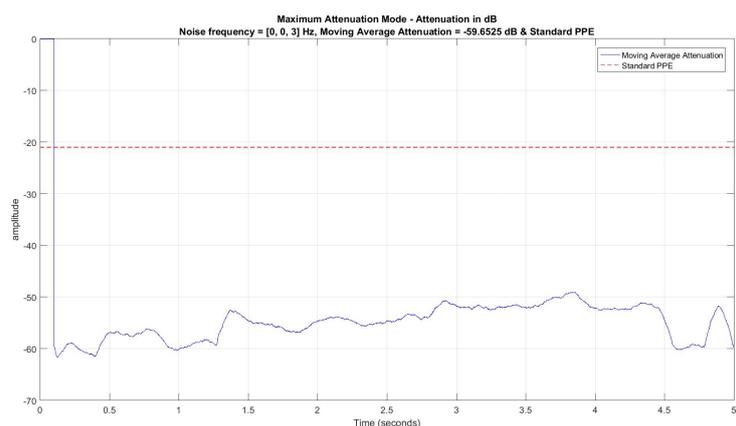


Figura 37 – Modo de Máxima Atenuação: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Real Tráfego

Fonte: O Autor (2018).

Os resultados obtidos com as simulações com áudios reais podem ser resumidas pela Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Resultado das Simulações do Modo de Atenuação Máxima com Sinais Reais

Ruído Real	Atenuação Nominal do EPI	Atenuação Simulada	Diferença
Carro	21 dB ¹	55,1	34,1
Cavalo	21 dB ¹	53,2	32,2
Tráfego	21 dB ¹	59,7	38,7

Fonte: O Autor (2018).

A partir da Tabela de resultados (6) percebemos que a metodologia conseguiu atingir níveis de atenuação de ruídos acima de 50 dB, o que é superior em comparação aos objetivos especificados.

6.3 Simulação e Resultados do Modo de Alta Fidelidade com Sinais Padrões

O terceiro conjunto de simulações validou o Modo de Alta Fidelidade com sinais conhecidos. Da mesma forma que foram realizadas as simulações do primeiro conjunto, utilizou-se sinais padrões na entrada de microfone externo. Na entrada de Line_In foi utilizado um padrão com 3 senoidais de frequências 532, 1540 e 3250 Hz, representando um áudio na banda de voz. As Figuras 38, 39, 40 e 41 demonstram os gráficos dos resultados encontrados na simulação de ruído de 2000 Hz, onde a primeira mostra a visão geral da simulação, a segunda o início da simulação, a terceira o final da simulação e a última o gráfico de atenuação durante todo o intervalo simulado. No eixo x de todos os gráficos é representado o tempo transcorrido e no eixo y as amplitudes dos diversos sinais analisados. Os sinais representados são:

- *Environment Noise*: representa o sinal capturado pelo microfone externo;
- *High Fidelity Signal*: representa o sinal de alta fidelidade capturado na entrada de Line_In;
- *Noise after PPE attenuation*: representa o ruído após a atenuação do EPI;

¹ Utilizada Atenuação Nominal Total do EPI.

- *Noise ANC Output*: representa o sinal de saída do Filtro ANC NLMS de Ruído;
- *Signal ANC Output*: representa o sinal de saída do Filtro ANC NLMS de Sinal;
- *Speaker Output*: representa o sinal de saída do autofalante;
- *Audible Signal*: representa o sinal resultante dentro da concha acústica do protetor e que será ouvido pelo usuário;

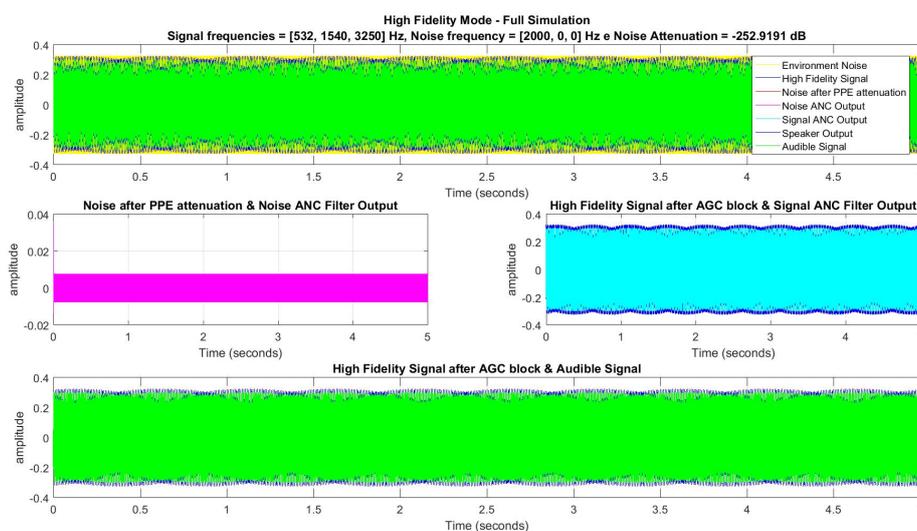


Figura 38 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz

Fonte: O Autor (2018).

Note que no início da simulação o sinal de saída do filtro de ruído consegue fazer a adaptação de forma muito rápida, levando menos de 2 milissegundos para atingir erros pequenos. Isso se deve ao fato de que o filtro implementado tem ordem baixa, igual a 2, e sua adaptação ocorre em poucos ciclos.

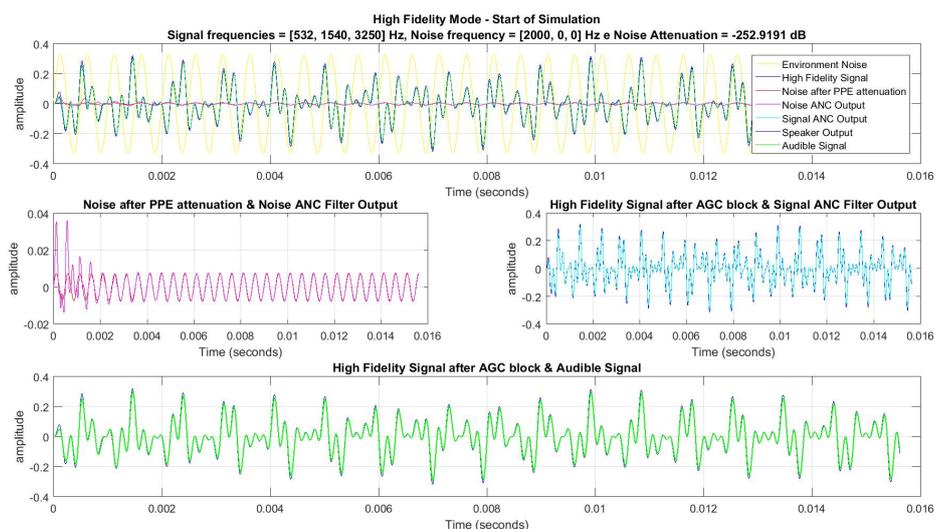


Figura 39 – Modo de Alta Fidelidade: Início da Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz
 Fonte: O Autor (2018).

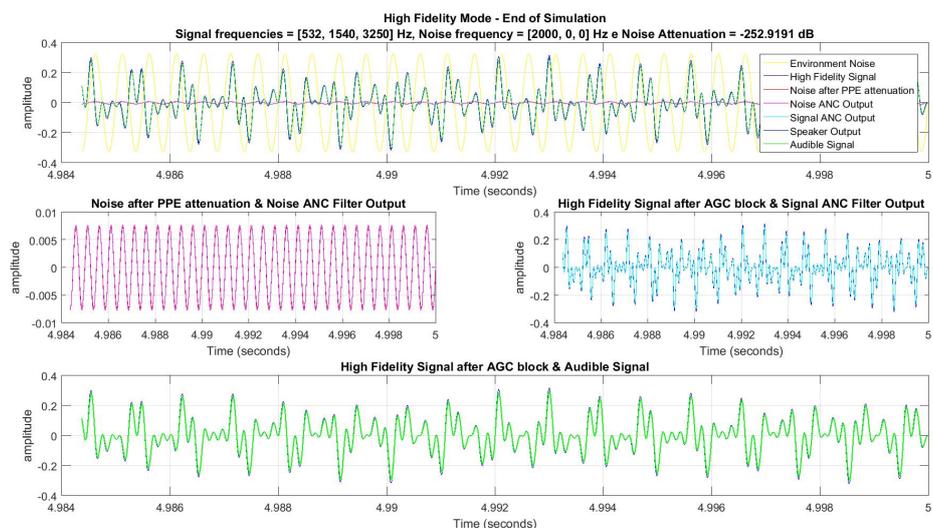


Figura 40 – Modo de Alta Fidelidade: Final da Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz
 Fonte: O Autor (2018).

Note que ao final da simulação a saída do ANC de Ruído já se adaptou

conforme o ruído que passou pelo EPI, que a saída do ANC se adaptou ao sinal de alta fidelidade e, por fim, que o sinal audível é praticamente igual ao sinal de alta fidelidade.

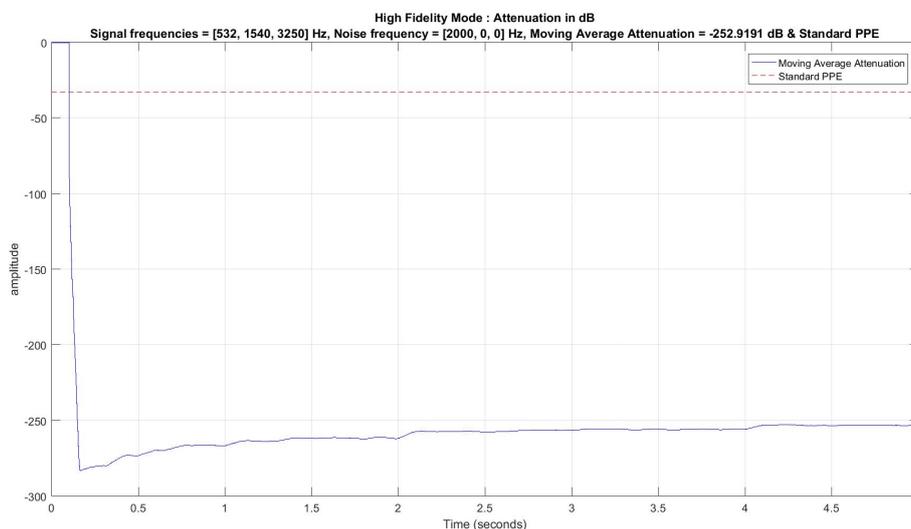


Figura 41 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Ruído Padrão de Frequência 2000 Hz

Fonte: O Autor (2018).

O resultado de todas as simulações do Modo de Alta Fidelidade é apresentado na Tabela 7. Podemos perceber que o protetor auricular eletrônico superou em muito o objetivo específico de elevar o nível de proteção em 6 dB para todas as frequências testadas. Também foi atingido o objetivo específico de proporcionar ao usuário um canal de áudio de alta fidelidade que possibilite a reprodução de mensagens provenientes de sistemas externos.

Tabela 7 – Resultado das Simulações do Modo de Alta Fidelidade com Ruídos Padrões e Sinal de 532, 1540 e 3450 Hz

Frequência do Ruído	Atenuação Nominal do EPI	Atenuação Simulada	Diferença
125 Hz	12 dB	134,2	122,2
250 Hz	16 dB	257,8	241,8
500 Hz	24 dB	259,6	235,6
1000 Hz	32 dB	260,4	228,4
2000 Hz	33 dB	252,9	219,9
4000 Hz	38 dB	251,0	213,0
8000 Hz	30 dB	240,0	210,0
12000 Hz	21 dB ¹	225,2	204,2
16000 Hz	21 dB ¹	227,1	206,1
20000 Hz	21 dB ¹	221,5	200,5
NRR ²	21 dB	44,2	23,2

Fonte: O Autor (2018).

Da mesma forma que variamos o ruído padrão, foram realizadas simulações variando o sinal de alta fidelidade e mantendo um ruído padrão de frequências 250, 2000 e 8000 Hz. O resultado dessas simulações do Modo de Alta Fidelidade é apresentado na Tabela 8.

¹ Não existe valor apresentado no certificado do equipamento e utilizada Atenuação Nominal Total.

² Metodologia de simulação mais aproximada com o teste realizado na certificação.

Tabela 8 – Resultado das Simulações do Modo de Alta Fidelidade com Sinais Padrões e Ruído de 250, 2000 e 8000 Hz

Frequência do Sinal	Atenuação Nominal do EPI	Atenuação Simulada	Diferença
132 Hz	21 dB	48,7	27,7
234 Hz	21 dB	48,5	27,5
532 Hz	21 dB	48,2	27,2
1540 Hz	21 dB	47,1	26,1
3250 Hz	21 dB	45,2	24,2
6470 Hz	21 dB	46,7	25,7
11430 Hz	21 dB	48,8	27,8
18390 Hz	21 dB	48,6	27,6
532, 1540 e 3250	21 dB	44,2	23,2

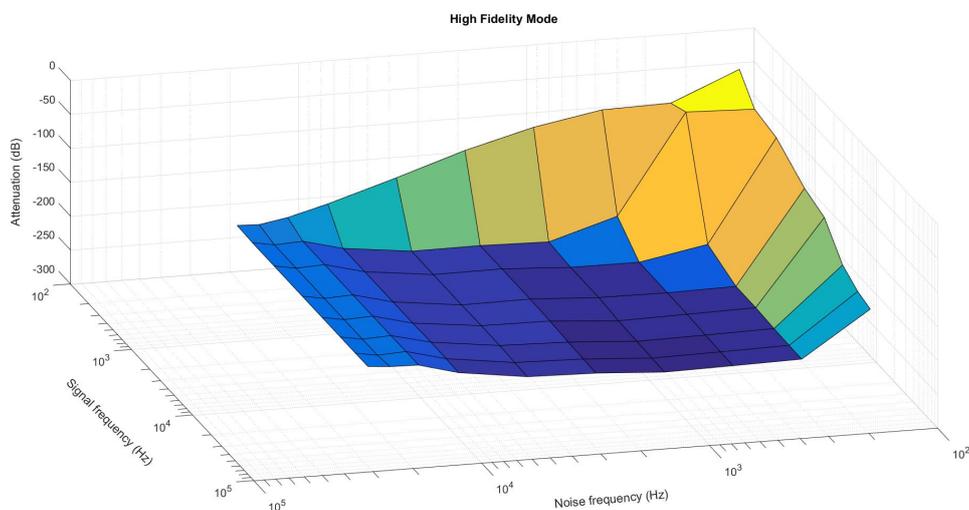
Fonte: O Autor (2018).

As últimas simulações do Modo de Alta Fidelidade com ruído e sinais padrões foram para analisar o comportamento do sistema de proteção auricular eletrônico variando as duas entradas ao mesmo tempo. Os resultados das simulações geraram um gráfico de superfície de atenuação apresentado na Figura 42 abaixo:

¹ Não existe valor apresentado no certificado do equipamento e utilizada Atenuação Nominal Total.

² Metodologia de simulação mais aproximada com o teste realizado na certificação.

Figura 42 – Gráfico de Superfície da Atenuação no Modo de Alta Fidelidade



Fonte: O Autor (2018).

6.4 Simulação e Resultados do Modo de Alta Fidelidade com Sinais Reais

O quarto conjunto de simulações validou o Modo de Alta Fidelidade com sinais reais. Para isso, além dos sinais já apresentados no segundo conjunto de simulações, foram utilizados mais 3 sinais provenientes de arquivos de áudio no formato wave e com frequência de amostragem igual ao do sistema de proteção auricular eletrônica. O quarto arquivo de áudio é o som de um homem falando, o quinto e o sexto sinais são músicas. As 6 Figuras abaixo (43, 44, 45, 46, 47 e 48) representam as simulações completas e os gráficos das atenuações dos sinais reais.

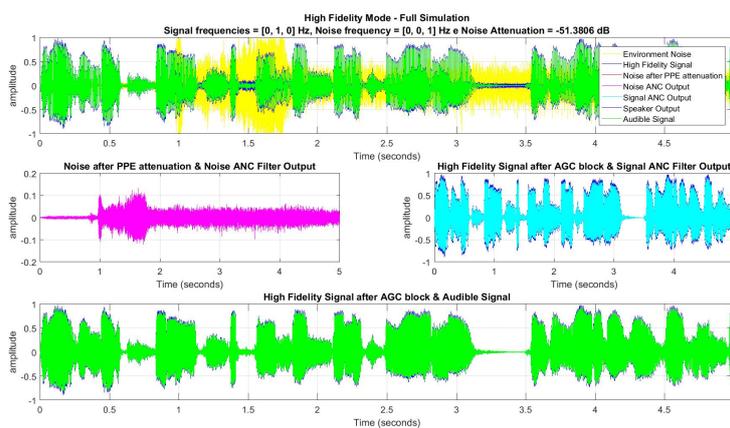


Figura 43 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Carro e Voz
 Fonte: O Autor (2018).

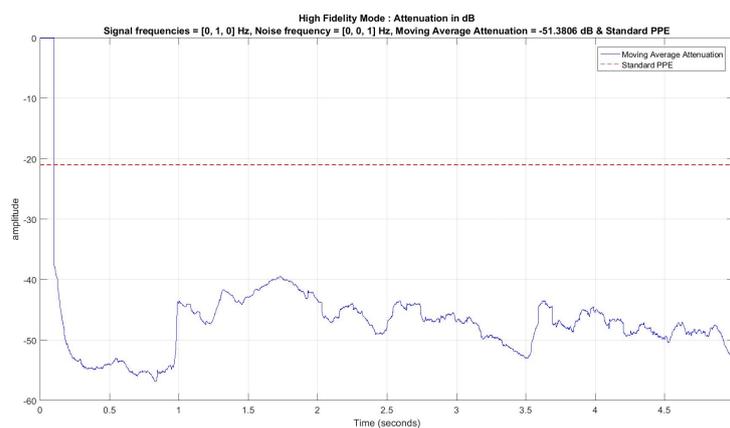


Figura 44 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Carro e Voz
 Fonte: O Autor (2018).

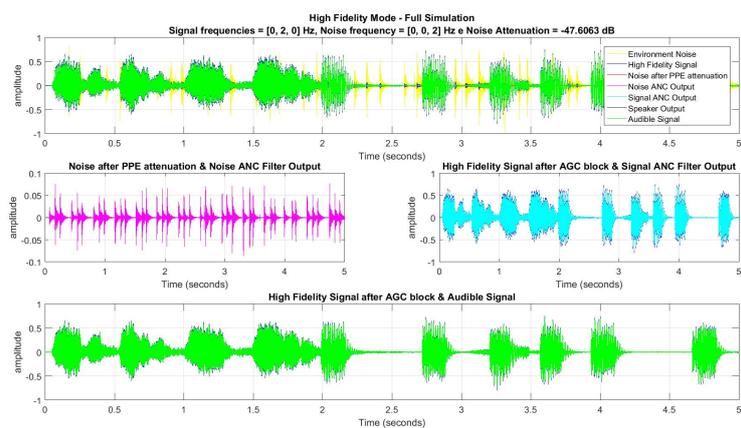


Figura 45 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Cavalo e Música 01
 Fonte: O Autor (2018).

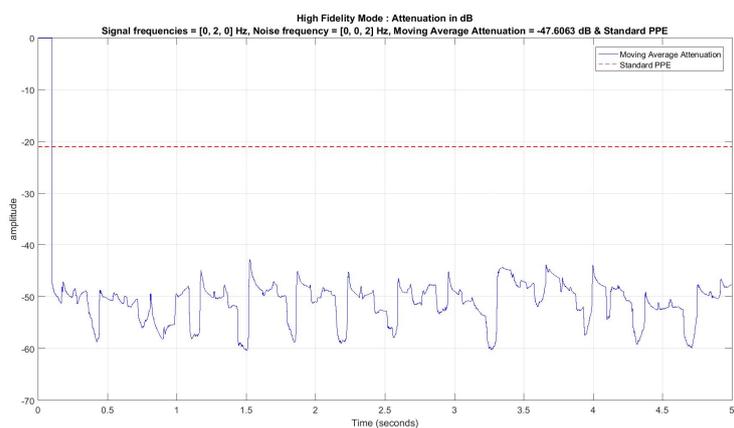


Figura 46 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Cavalo e Música 01
 Fonte: O Autor (2018).

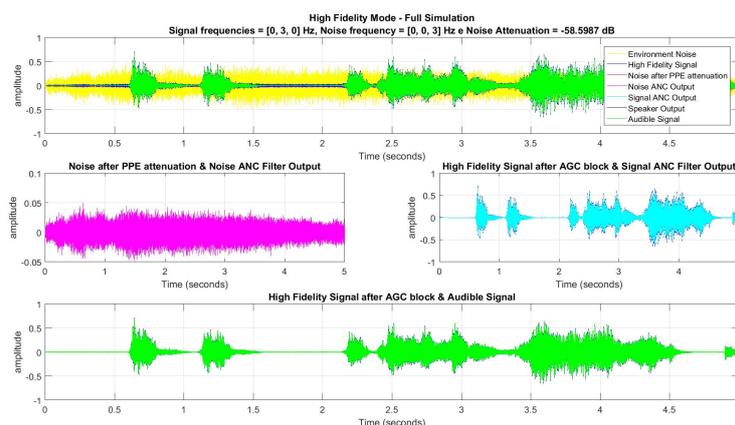


Figura 47 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação completa de Tráfego e Música 02
 Fonte: O Autor (2018).

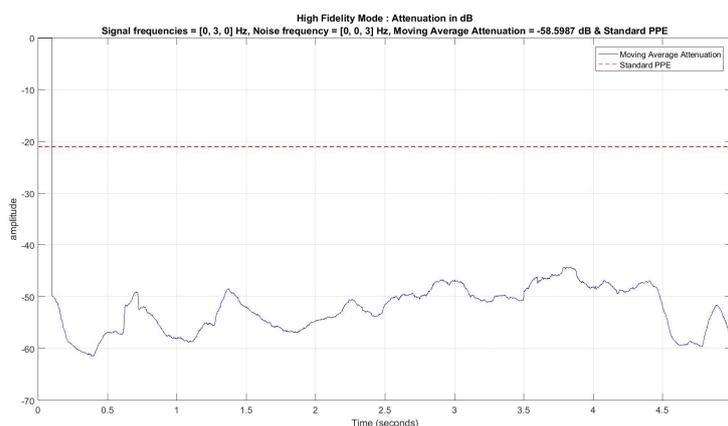


Figura 48 – Modo de Alta Fidelidade: Atenuação obtida na Simulação de Tráfego e Música 02
 Fonte: O Autor (2018).

Note que a Atenuação acompanha a variação de amplitude do ruído real, reforçando o conceito de sua dependência intrínseca com a entrada e a adaptação do filtro ocorre de forma rápida para conseguir atingir esses níveis de atenuação.

Os resultados obtidos com as simulações com áudios reais podem ser resumidas pela Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Resultado das Simulações do Modo de Alta Fidelidade com Sinais Reais

Ruído Real	Sinal Real	Atenuação Nominal do EPI	Atenuação Simulada	Diferença
Carro	Voz	21 dB ¹	51,4	30,4
Cavalo	Voz	21 dB ¹	50,1	29,1
Tráfego	Voz	21 dB ¹	56,6	35,6
Carro	Música 01	21 dB ¹	53,0	32,0
Cavalo	Música 01	21 dB ¹	47,6	26,6
Tráfego	Música 01	21 dB ¹	58,7	37,7
Carro	Música 02	21 dB ¹	53,8	32,8
Cavalo	Música 02	21 dB ¹	52,4	31,4
Tráfego	Música 02	21 dB ¹	58,6	37,6

Fonte: O Autor (2018).

6.5 Simulação e Resultados do Modo de Banda de Voz com Sinais Padrões

O quinto conjunto de simulações validou o Modo de Banda de Voz com sinais conhecidos. Da mesma forma que foram realizadas as simulações do primeiro e terceiro conjuntos, utilizou-se sinais padrões na entrada de microfone externo e onde agora o sistema decide através do filtro o que deve ser considerado sinal e ruído. As Figuras 49, 50, 51 e 52 demonstram os gráficos dos resultados encontrados na simulação de ruído de 8000 Hz e um sinal de 1540 Hz, onde a primeira mostra a visão geral da simulação, a segunda o início da simulação, a terceira o final da simulação e a última o gráfico de atenuação durante todo o intervalo simulado. No eixo x de todos os gráficos é representado o tempo transcorrido e no eixo y as amplitudes dos diversos sinais analisados. Os sinais representados são:

- *Environment Noise*: representa o sinal capturado pelo microfone externo;
- *BandPass Signal*: representa o sinal da banda de voz filtrado pelo Passa-banda;
- *Stopband Signal*: representa o sinal das bandas laterais filtradas pelo Rejeita-banda;

¹ Utilizada Atenuação Nominal Total do EPI.

- *Noise after PPE attenuation*: representa o ruído após a atenuação do EPI;
- *Noise ANC Output*: representa o sinal de saída do Filtro ANC NLMS de Ruído;
- *Signal ANC Output*: representa o sinal de saída do Filtro ANC NLMS de Sinal;
- *Speaker Output*: representa o sinal de saída do autofalante;
- *Audible Signal*: representa o sinal resultante dentro da concha acústica do protetor e que será ouvido pelo usuário;

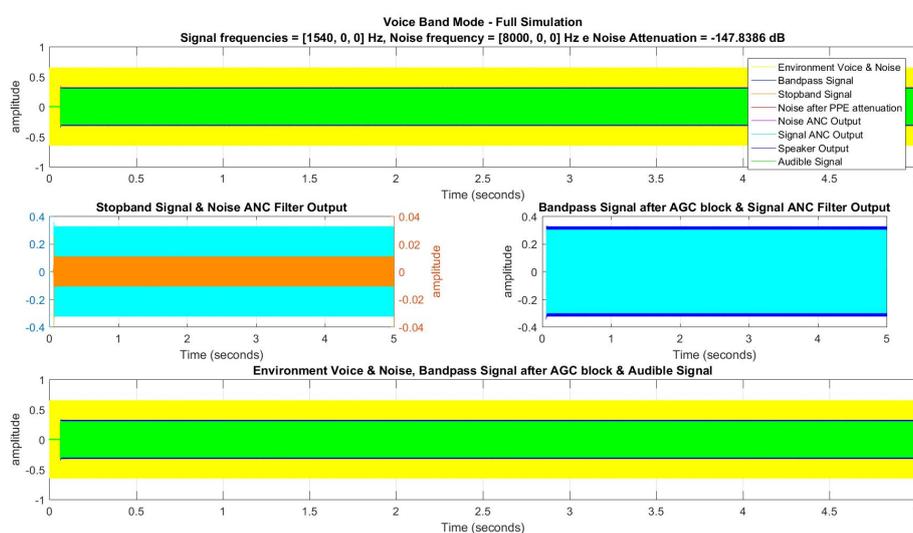


Figura 49 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz

Fonte: O Autor (2018).

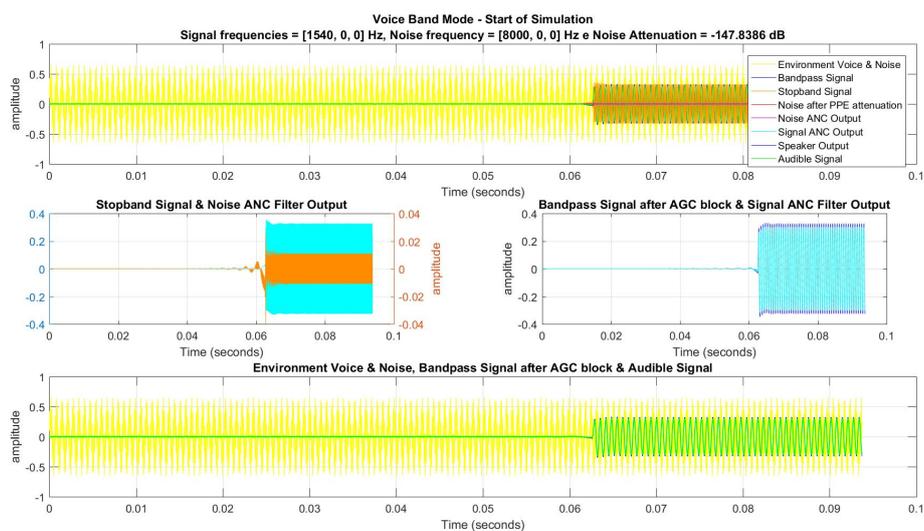


Figura 50 – Modo de Banda de Voz: Início da Simulação de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz

Fonte: O Autor (2018).

Note que no início da simulação os filtros passa-banda e rejeita-banda levam pouco mais de 60 milissegundos para começar efetivamente o processo de filtragem. Isso se deve ao fato de que a ordem dos filtros é elevada e essa é uma característica transitente e que só ocorre ao ligarmos o sistema. Em regime permanente os filtros estão sempre ativos e não necessitam deste retardo.

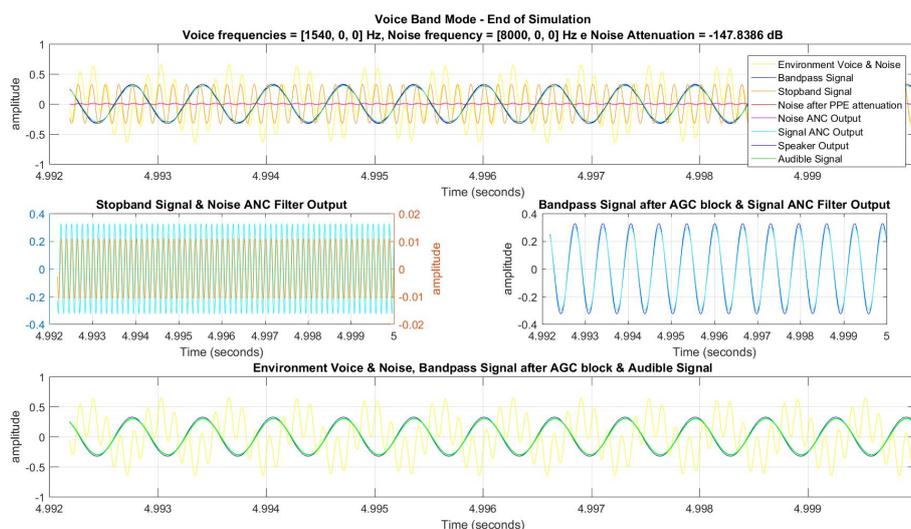


Figura 51 – Modo de Banda de Voz: Final da Simulação de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz

Fonte: O Autor (2018).

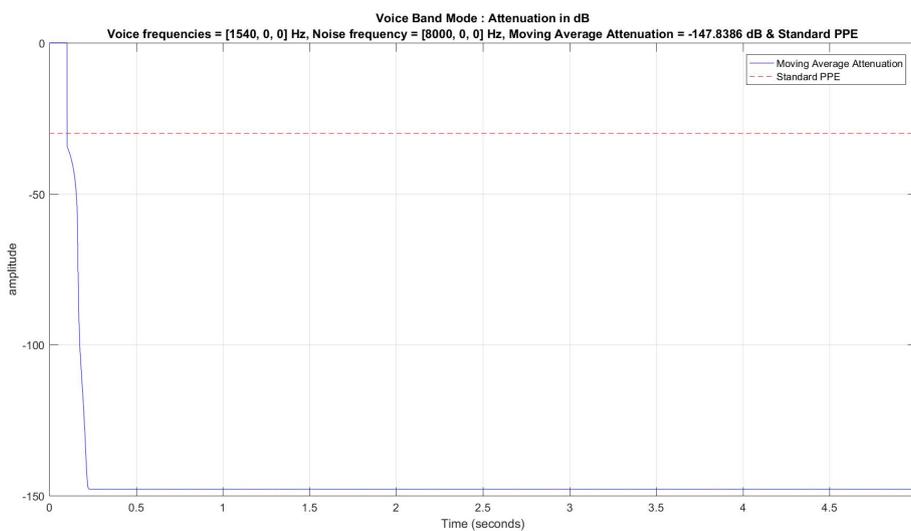


Figura 52 – Modo de Banda de Voz: Atenuação obtida na Simulação de Ruído de 8000 Hz e um Sinal de 1540 Hz

Fonte: O Autor (2018).

O resultado de todas as simulações do Modo de Banda de Voz é apresen-

tado na Tabela 10. Importante salientar que é considerado com sinal somente as frequências dentro da banda de voz e ruído as bandas laterais, sendo assim existem vários pontos onde a atenuação é não aplicável (NA). Podemos perceber que o protetor auricular eletrônico superou em muito o objetivo específico de elevar o nível de proteção em 6 dB para todas as frequências testadas. Também foi atingido o objetivo específico de possibilitar que o usuário perceba o áudio ambiente relativo a banda de voz, eliminando as bandas laterais de baixa e alta frequências.

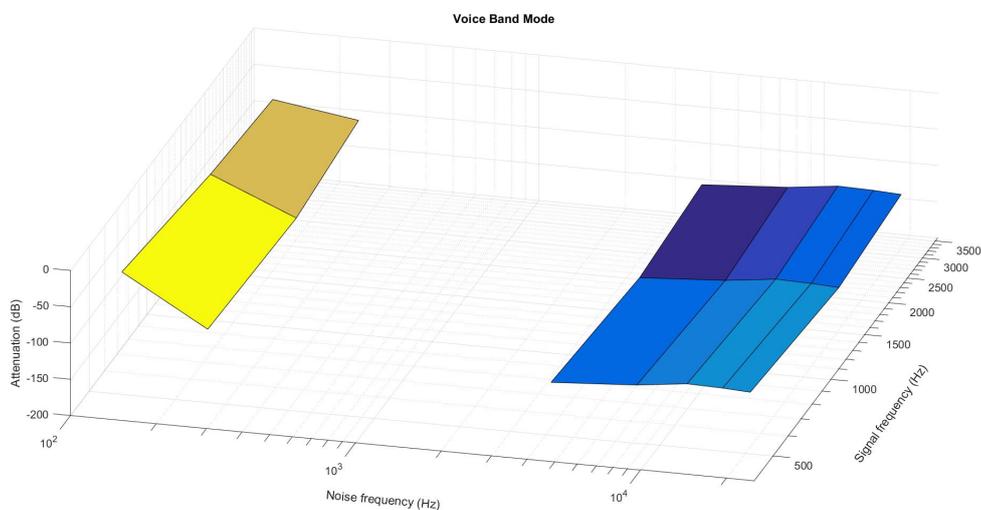
Tabela 10 – Resultado das Simulações do Modo de Banda de Voz com Sinais Padrão

		Frequência do Ruído										
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	12000	16000	20000	
Frequência do Sinal	132	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	234	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	532	41,9	109,7	NA	NA	NA	137,8	130,3	122,0	123,2	125,3	
	1540	69,1	118,2	NA	NA	NA	155,4	147,8	139,6	140,8	142,9	
	3250	79,7	97,3	NA	NA	NA	140,9	133,3	125,1	126,2	128,3	
	6470	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	11430	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	18390	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte: O Autor (2018).

O mesmo resultado pode ser expresso pelo gráfico de superfície de atenuação apresentado na Figura 53 abaixo:

Figura 53 – Gráfico de Superfície da Atenuação no Modo de Banda de Voz



Fonte: O Autor (2018).

6.6 Simulação e Resultados do Modo de Banda de Voz com Sinais Reais

O sexto conjunto de simulações validou o Modo de Banda de Voz com sinais reais. Da mesma forma que foram realizadas as simulações do segundo e quarto conjuntos, foram utilizados os 6 sinais provenientes de arquivos de áudio no formato wave e com frequência de amostragem igual ao do sistema de proteção auricular eletrônica. As 6 Figuras abaixo (43, 44, 45, 46, 47 e 48) representam as simulações completas com sinais reais.

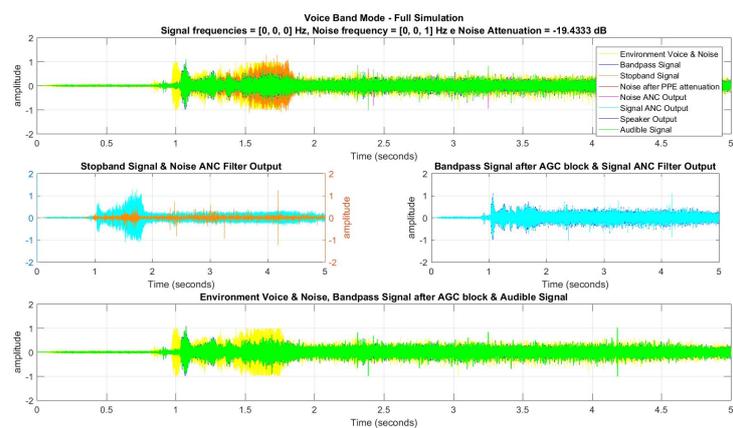


Figura 54 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Carro
 Fonte: O Autor (2018).

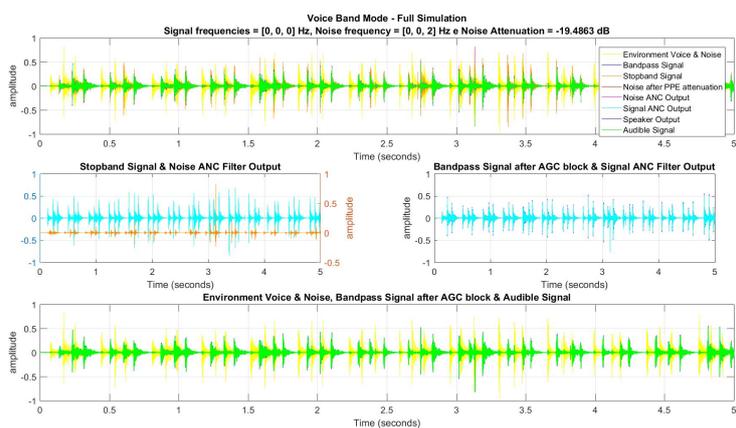


Figura 55 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Cavalo
 Fonte: O Autor (2018).

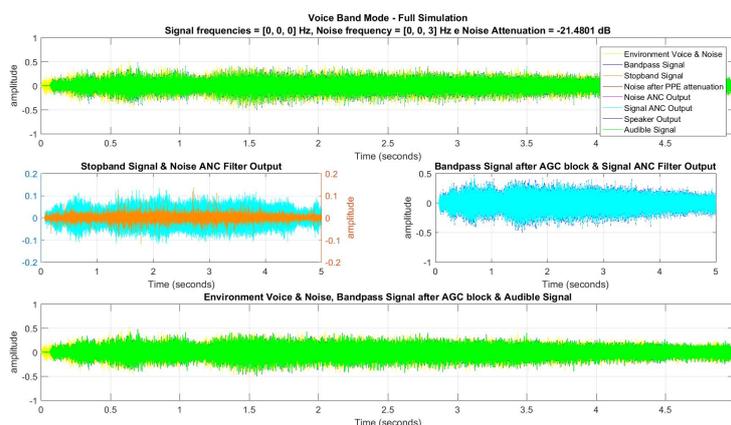


Figura 56 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Tráfego
 Fonte: O Autor (2018).

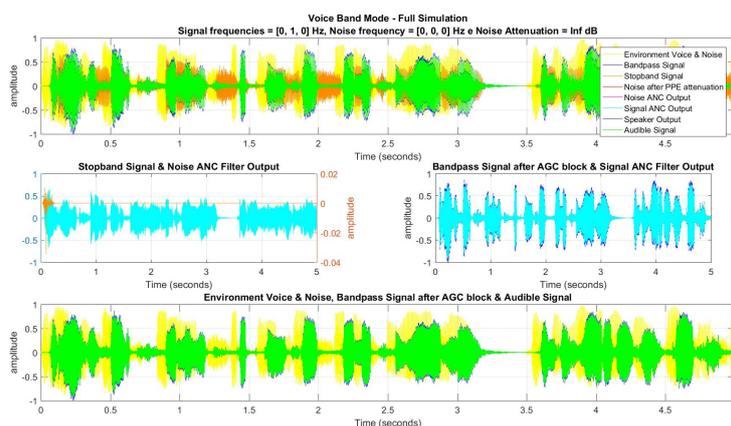


Figura 57 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Voz
 Fonte: O Autor (2018).

Note que na simulação completa de Voz, o sinal audível está atrasado em relação à entrada. Isso se deve ao atraso do filtro passa-banda e sua ordem elevada. Ao mesmo tempo, podemos perceber que o sinal de saída possui uma amplitude um pouco menor na comparação com a entrada, isso ocorre devido ao fato que foram filtradas as altas frequências do sinal resultante pelo filtro de rejeita-banda.

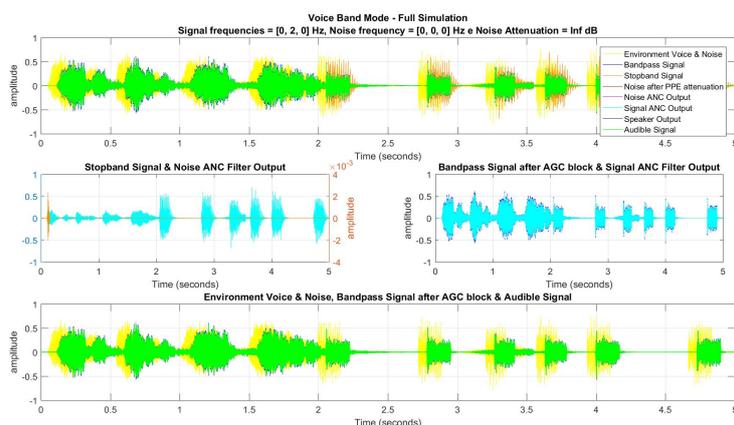


Figura 58 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Música 01
Fonte: O Autor (2018).

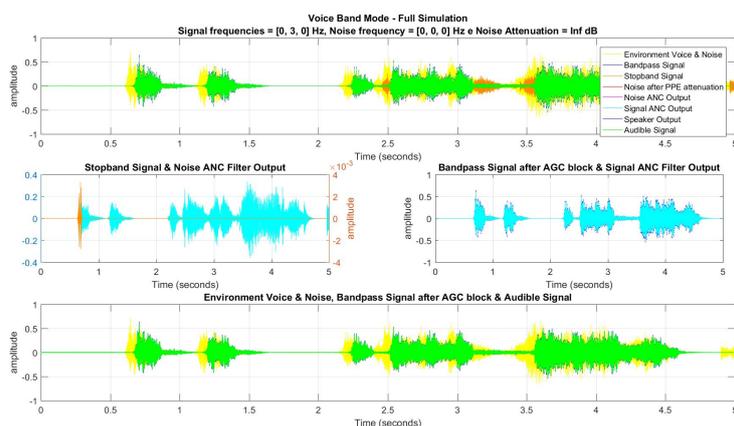


Figura 59 – Modo de Banda de Voz: Simulação completa de Música 02
Fonte: O Autor (2018).

Devido ao fato de não conseguirmos identificar claramente qual é a parcela de ruído e de sinal na entrada e na saída do sistema, não foi possível implementar um método de cálculo da atenuação para os sinais reais. O que podemos afirmar é que pelos gráficos do sinal audível comparados com o sinal da entrada, existe um atraso entre os sinais e parte das altas frequências foram absorvidas. Durante as simulações foram reproduzidas as saídas do sistema utilizando o comando `sound()` do MatLab, e no áudio percebe-se a filtragem do som resultante.

6.7 Simulação e Resultados do Controle Automático de Ganho e Detector de Ruídos Impulsivos

O último conjunto de simulações validou o funcionamento do Controle Automático de Ganho e do Detector de Ruídos Impulsivos. A simulação do Controle Automático de Ganho é apresentada na Figura 60, onde utilizamos o Modo de Alta Fidelidade, um sinal de frequência de 532 Hz e amplitude variável em Line_In, e um ruído de frequência de 8000 Hz no microfone externo. Pelo gráfico percebemos que o sinal audível foi limitado, mesmo enquanto a entrada continua a variar acima do limite. O gráfico das potências de entrada e saída do AGC comprovam a limitação em potência, bem como a variação automática do seu ganho. Podemos então concluir que a metodologia implementada para o AGC atende o seu propósito.

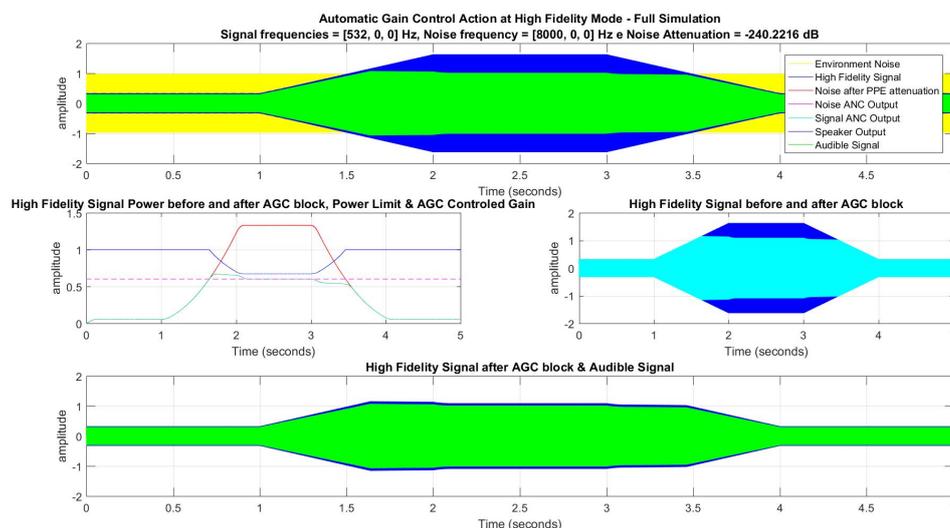


Figura 60 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação do funcionamento do AGC
Fonte: O Autor (2018).

Foram realizadas duas simulações do Detector de Ruídos Impulsivos. Em ambas foi utilizado o Modo de Alta Fidelidade, com um sinal de frequência 532 Hz na entrada de Line_In e o áudio de tráfego como ruído ambiente. Na primeira simulação, no instante de tempo de 1 segundo, o ruído ambiente foi amplificado em 5 vezes por um intervalo de tempo de 12,5 milissegundos e assim simulando

um sinal impulsivo de grande potência sonora. A Figura 61 mostra o resultado desta simulação, onde o bloco Detector de Ruídos Impulsivos identifica a presença de um ruído de alta potência sonora e chaveia o modo de operação do protetor auricular eletrônico para o Modo de Máxima Atenuação. Após o intervalo de 2 segundos, como especificado no objetivo, o sistema retorna ao modo de operação originalmente selecionado.

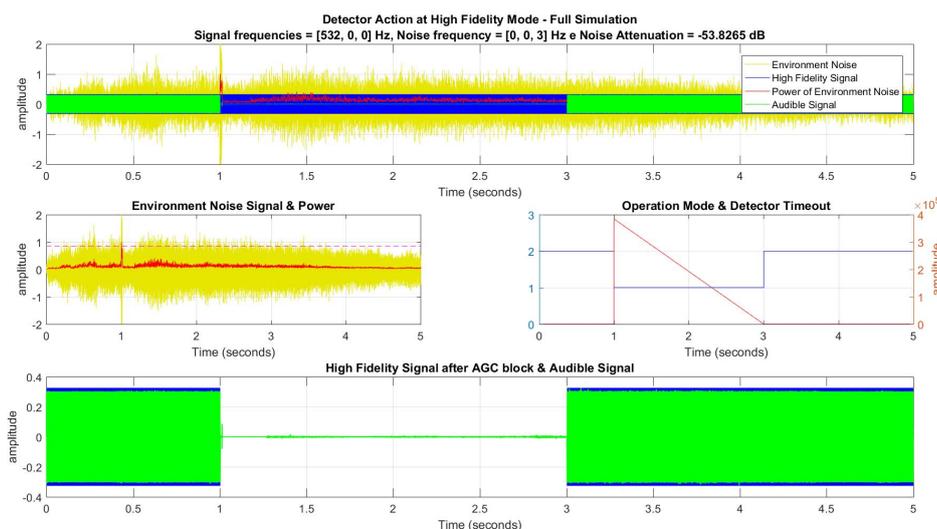


Figura 61 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação 01 do funcionamento do Detector de Ruídos Impulsivos

Fonte: O Autor (2018).

Note que o som audível após o ruído impulsivo é atenuado ao máximo, e que é cortada a entrada de Line_In, evidenciando a troca de modo de operação.

Na segunda simulação do Detector de Ruídos Impulsivos, além do ruído impulsivo em 1 segundo, é gerado um novo ruído no tempo de 2 segundos para evidenciar o prolongamento do tempo de guarda do Detector de Ruídos Impulsivos. Ao identificar o segundo ruído impulsivo, o tempo de guarda é novamente carregado com o valor de 2 segundos e assim o tempo total em que o Detector agiu é maior, restaurando o modo de operação original somente no instante de 4 segundos. Essa simulação é apresentada na Figura 62.

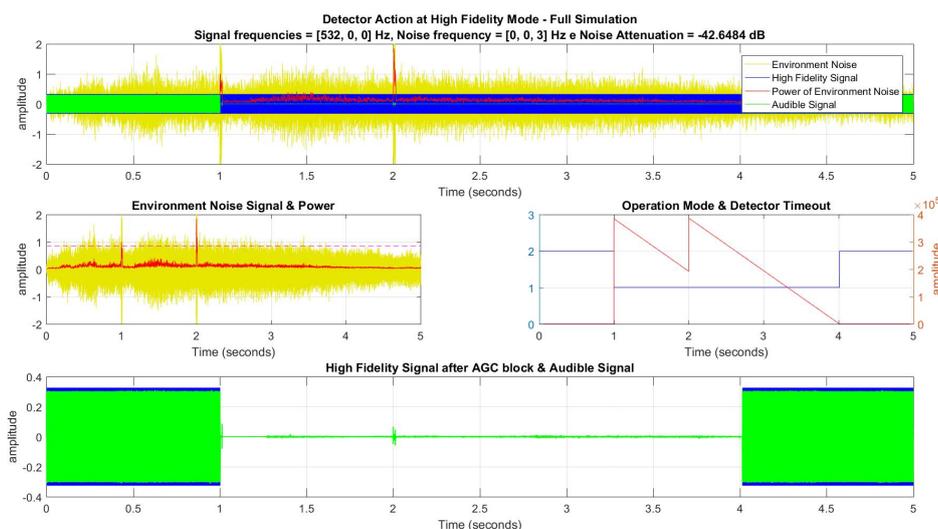


Figura 62 – Modo de Alta Fidelidade: Simulação 02 do funcionamento do Detector de Ruídos Impulsivos

Fonte: O Autor (2018).

Outro ponto importante a ser ressaltado é que o segundo ruído impulsivo foi atenuado de maneira efetiva pelo sistema, visto que no sinal audível a sua presença mostra-se com uma amplitude muito inferior do que a original. A atenuação neste intervalo de tempo é de 42,6 dB.

Os blocos de AGC e do Detector de Ruídos Impulsivos funcionaram corretamente e, assim, a metodologia proposta atingiu o último objetivo específico de garantir a proteção do usuário contra ruídos de alta potência sonora e/ou impulsivos, como estipulados pela NR-15 (MTE, 2014).

6.8 Resultado Final da Metodologia de Proteção Auricular NLMS

As simulações do Modo de Atenuação Máxima comprovam a eficácia da Metodologia de Proteção Auricular NLMS em ambientes ruidosos, atingindo valores de atenuação no pior dos casos de 49,3 dB (ganho em relação ao EPI de 28,3 dB). Esse Modo de Operação cumpre o objetivo específico de elevar o nível de

proteção total do EPI em no mínimo 6 dB.

As simulações do Modo de Alta Fidelidade comprovam a eficácia da Metodologia de Proteção Auricular NLMS em ambientes ruidosos e possibilita que o usuário consiga escutar uma fonte externa de áudio através da entrada de Line_In. Esse Modo de Operação cumpre o objetivo específico de proporcionar ao usuário um canal de áudio de alta fidelidade que possibilite a reprodução de mensagens provenientes de sistemas externos.

As simulações do Modo de Banda de Voz comprovam a eficácia da Metodologia de Proteção Auricular NLMS em ambientes ruidosos e possibilita que o usuário consiga escutar parte do áudio externo referente à faixa de frequências da banda de voz. Esse Modo de Operação cumpre o objetivo específico de possibilitar que o usuário perceba o áudio ambiente relativo a banda de voz, eliminando as bandas laterais de baixa e alta frequências.

As simulações do Controle Automático de Ganho e Detector de Ruídos Impulsivos comprovam a eficácia da Metodologia de Proteção Auricular NLMS em ambientes ruidosos e garantem a proteção do sistema auditivo do usuário. Esse Modo de Operação cumpre o objetivo específico de garantir a proteção do usuário contra ruídos de alta potência sonora e/ou impulsivos, como estipulados pela NR-15(MTE, 2014).

Ao final de todas as simulações podemos concluir que foram alcançados todos os objetivos específicos propostos no Capítulo 2 e a metodologia proposta para o protetor auricular eletrônico foi aprovada.

6.9 Comparativo entre a Metodologia de Proteção Auricular NLMS e Abafadores de Mercado

Os resultados das simulações podem ser comparados com os níveis de atenuação obtidos nos certificados de abafadores de mercado. Como mencionado no Capítulo 5, foram escolhidos três modelos como base de comparação. A Tabela 11 apresenta o comparativo dos modos de operação da metodologia em relação aos modelos 3M Peltor X5A, 3M Peltor ProTac II e Honeywell Impact Pro.

Tabela 11 – Tabela Comparativa entre os Modos de Operação e Abafadores de Mercado

	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	NRR
Modo de Máxima Atenuação	190,5	260,3	262,2	263,7	257,4	255,0	241,0	49,3
Modo de Alta Fidelidade	134,2	257,8	259,6	260,4	252,9	251,0	240,0	44,2
Modo de Banda de Voz	69,1	118,2	NA	NA	NA	155,4	147,8	NA
3M Peltor X5A	20,0	28,0	39,0	43,0	38,0	37,0	35,0	29,0
3M Peltor ProTac II	14,0	22,0	32,0	33,0	33,0	35,0	36,0	25,0
Honeywell Impact Pro	22,6	26,9	32,0	37,1	33,8	35,6	38,0	33,0

Fonte: O Autor (2018).

Analisando a tabela comparativa identificamos que, para ruído periódicos e com frequências bem determinadas, a metodologia obtém resultados superiores aos certificados dos três modelos comparados. Isso se deve ao fato de que o filtro de cancelamento adaptativo de ruídos consegue fazer a predição com muita precisão e a cada ciclo de aprendizagem o erro tende à zero. Já na coluna de NRR, o método utilizado na estimativa de atenuação parece ser mais assertivo, visto que foi simulado um ruído com maior espectro de frequências e a aprendizagem do filtro começa a ser mais rigorosa. Mesmo assim, a metodologia consegue um ganho significativo no nível de atenuação comparado aos modelos de mercado.

Acredita-se que os ganhos obtidos pela nova metodologia, em relação aos outros protetores ativos, sejam provenientes de dois pontos importantes na concepção: o fato de a metodologia possuir um caráter de predição do ruído e a estimativa de erro levar em conta a influência numérica do sinal de entrada. Porém não podemos afirmar isso com certeza, pois em nenhum momento conseguimos a documentação do processo de cancelamento ativo dos demais protetores. Essa documentação está protegida por segredo industrial.

Devemos também levar em conta nesta comparação que os dados simulados são numéricos e com uma precisão que não pode ser obtida em uma implementação real. Os processadores de DSP possuem cálculos em ponto fixo, limitando assim a precisão de seus resultados, bem como, as não linearidades do sistema real não foram contempladas na obtenção destes resultados.

7 Conclusão

A dissertação apresentou as técnicas de cancelamento adaptativo de ruído e processamento digital de sinais aplicadas a protetores auriculares. Foi desenvolvida uma metodologia de proteção, dividida em quatro modos de operação distintos, que possibilita ao usuário de protetores auriculares diminuir a sensação de isolamento em relação ao ambiente externo. A eficácia da Metodologia de Proteção Auricular NLMS foi comprovada através de simulações de seu modelo matemático no software Matlab, atingindo em plenitude o objetivo geral e todos os seus objetivos específicos aqui descritos. Os resultados alcançados pelas simulações superaram as expectativas iniciais, mostrando que a metodologia proposta é bastante robusta. No comparativo com outros protetores auriculares de mercado, percebemos uma melhora considerável em seu nível de atenuação. Acredita-se que os ganhos obtidos devem-se às características de predição do ruído e nas melhorias implementadas na estimativa numérica do erro dos filtros.

Em trabalhos futuros, propõe-se a implementação de hardware e firmware da Metodologia de Proteção Auricular NLMS e baseada na já descrita topologia de circuito eletrônico do Capítulo 4. Com isso poderemos obter resultados experimentais do sistema proposto, bem como avaliar as influências e limitações que surgirão devido as quantizações numéricas em ponto fixo e funções de transferências dos componentes associados ao hardware. Outros pontos importantes a serem discutidos no futuro são o cancelamento adaptativo de ruídos randômicos, a implementação da metodologia no domínio frequência e a relação entre a ordem do filtro ANC e a eficiência do sistema.

Referências

- ANG YONG KHIANG KOH, H. P. L. L. Y. L. The performance of active noise-canceling headphones in different noise environments. *Elsevier Ltd.*, 2017. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/apacoustt>>.
- CAEPI. *Certificado de Aprovação de Equipamento de Proteção Individual*. 2017. Accessed: 2018-01-15. Disponível em: <[Availableat:http://caepi.mte.gov.br/internet/ConsultaCAInternet.aspx](http://caepi.mte.gov.br/internet/ConsultaCAInternet.aspx)>.
- CHEN CHENG YUAN CHANG, S. M. K. Y.-R. Active noise control and secondary path modeling algorithms for earphones. n. 978-1-5090-5992-8, p. 246 – 251, 2017.
- DIXIT, D. N. S. Lms adaptive filters for noise cancellation: A review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 7, n. 5, p. 2520–2529, 2017. ISSN 2088-8708. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1451965/>>.
- GIRISHA, S. L. P. G. K. Performance analysis of adaptive filters for noise cancellation in audio signal for hearing aid application. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, v. 5, n. 5, 2015. ISSN 2319-7064. Disponível em: <<http://www.ijsr.net>>.
- HIEU, L. N. T. T. V. B. N. D. M. H. P. C. D. Q. Fixed-point implementation and validation of multichannel wiener filter-based noise canceling algorithm. *IEEE*, n. 978-1-5090-1801-7/16 ©2016 IEEE, p. 158 – 163, 2016.
- JI CHUNRONG HUANG, D. Z. W. et al. Active noise control by a modified filtered-xlms algorithm with bandpass filters. 2017.
- LEE LU-EAN OOI, Y.-H. K. J.-H.; TEOH, C.-Y. Simulation for noise cancellation using lms adaptive filter. 2017. Disponível em: <<http://www.ijsr.net>>.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. *NR-06*: NR 6 – Equipamento de Proteção Individual - EPI. Brasília, BR, 2006.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. *NR-15*: NR 15 - Atividades e Operações Insalubres. Brasília, BR, 2014.
- MON THIRI THANDAR AUNG, C. H. L. A. Lms adaptive filters for noise cancellation: A review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 3, n. 11, 2016. ISSN 2395 -0056. Disponível em: <<http://www.irjet.net>>.

MOON, T.-G. C. S.-P. Feedback active noise control based voice enhancing ear-protection system. *J Electr Eng Technol.*, 2017. ISSN 1975-0102. Disponível em: <<http://www.jeet.or.kr>>.

PZT. *EC TYPE-EXAMINATION CERTIFICATE*. 2013. Accessed: 2018-07-12. Disponível em: <[Availableat:https://www.honeywellsafety.com/Products/Hearing/Hearing_Protection/Impact_Pro.aspx?site=/au](https://www.honeywellsafety.com/Products/Hearing/Hearing_Protection/Impact_Pro.aspx?site=/au)>.

WIDROW, B. et al. Adaptive noise cancelling: Principles and applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 63, n. 12, p. 1692–1716, 1975. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1451965/>>.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria Acadêmica
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: proacad@pucrs.br
Site: www.pucrs.br/proacad