CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UniCEUB

CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

CAIO DE BEM CORRÊA

ANÁLISE DA TRANSMISSÃO SEM FIO DO ÁUDIO DE UM INSTRUMENTO MUSICAL

Orientador: Prof. Ms.C. Francisco Javier De Obaldía Díaz

Brasília

dezembro, 2012

CAIO DE BEM CORRÊA

ANÁLISE DA TRANSMISSÃO SEM FIO DO ÁUDIO DE UM INSTRUMENTO MUSICAL

Trabalho apresentado ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) como pré-requisito para a obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação.
Orientador: Prof. **Ms.C. Francisco Javier De Obaldía Díaz**

Brasília

dezembro, 2012

CAIO DE BEM CORRÊA

ANÁLISE DA TRANSMISSÃO SEM FIO DO ÁUDIO DE UM INSTRUMENTO MUSICAL

Trabalho apresentado ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) como pré-requisito para a obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação.
Orientador: Prof. **Ms.C. Francisco Javier De Obaldía Díaz**

Este Trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro de Computação, e aprovado em sua forma final pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas -FATECS.

_____
Prof. Abiezer Amarilia Fernandes
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

_____
Francisco Javier De Obaldía Díaz
Mestre em Engenharia Elétrica

_____
Prof. Luciano Henrique Duque
Mestre em Engenharia Elétrica
UniCEUB

_____
Prof. Ms.C. Luís Cláudio Lopes de Araújo
UniCEUB

_____
Prof. Ms.C. Roberto Schaefer de Azevedo
UniCEUB

Dedico esta monografia, aos meus pais José de Ribamar e Ana, que sempre me apoiaram em todos os momentos e se esforçaram para eu chegar até aqui. Aos meus irmãos Thaís e Bruno e a minha namorada Mariel. Aos meus avós Gladys, Maria da Graça e Gerêncio por todo o apoio e incentivo. E a todos os meus amigos que me apoiaram e me ajudaram na elaboração desse projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus. Agradeço a toda minha família, avós, tios e tias, primos e agregados. Agradeço também a todos que contribuíram de alguma forma com esse projeto e a todos que me auxiliaram no decorrer do curso de engenharia. Especialmente os seguintes:

José de Ribamar (Pai)
Ana Corrêa (Mãe)
Mariel Lopes
Guilherme de Bem
Prof. Javier
Prof. Luciano
Prof. Flávio Klein
Matheus Assis
Lucas Mesquita
Emerson da Hora
José Carlos
Jefferson Santos
Filipe Galiza
Flávio Lenzi
Lucas Rehem
Diogo Holanda
Bruno Queiróz
Raphael Palmer
Felipe Canut
Tiago Romualdo

“Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas.”

Steve Jobs

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS x
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS xi
RESUMO xii
ABSTRACT xiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 14
1.1 Objetivo Geral do Trabalho 15
1.2 Objetivos Específicos 15
1.3 Metodologia 15
1.4 Justificativa e Importância do Trabalho 16
1.5 Escopo do Trabalho 16
1.6 Resultados Esperados 16
1.7 Estrutura do Trabalho 17
CAPÍTULO 2 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA 18
CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL TEÓRICO E BASES METODOLÓGICAS 20
3.1 O Som 20
3.2 Movimento Harmônico Simples 21
3.3 A sensação sonora 22
3.4 Corpos Sonoros 23
3.5 Instrumentos Musicais 23
3.6 Violão 23
3.7 Guitarra Elétrica 24
3.8 Amplificadores 27
3.9 Movimentos Vibratórios Complexos - Teorema de Fourier 28

3.10 Transmissão FM 35

3.11Fatores que degradam a transmissão e recepção 42

3.12 GarageBand e Audacity 48

3.13 Formatos AIF e WAVE 49

3.14 MatLab 50

3.15 Teste T de Student 50

CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS 54

4.1 Descrição Geral do Modelo Proposto 54

4.2 Gravações das Amostras 55

4.3 Desenvolvimento das ferramentas para análise. 60

4.4 Análise Inicial 64

4.5 Relação Sinal Ruído 69

4.6 Análise dos Harmônicos 71

4.7 Avaliação Global do Modelo 74

CAPÍTULO 5 - ANÁLISES E CONCLUSÃO 76

5.1 Conclusões 76

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros 77

GLOSSÁRIO 78

REFERÊNCIAS 79

APÊNDICE A - Códigos criados no MatLab 81

APÊNDICE B - Resultados 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Características da onda.....21
Figura 3.2 - Movimento Harmônico Simples.....22
Figura 3.3 - Estrutura de um Violão.....24
Figura 3.4 - Estrutura de uma Guitarra.....25
Figura 3.5 - Funcionamento de um captador.....26
Figura 3.6 - Variação dos Harmônicos fundamentais na guitarra. 27
Figura 3.7 - A senóide e seus parâmetros. 29
Figura 3.8 - Mesma nota em instrumentos diferentes.....30
Fiigura 3.9 - Processo para obtenção da Transformada Discreta de Fourier .34
Figura 3.10 - Transmissor FM.....35
Figura 3.11 - Estúdio 1.....36
Figura 3.12 - Estúdio 2.....36
Figura 3.13 - Esquema de Transmissor FM.....38
Figura 3.14 - Esquema de Receptor FM.....42
Figura 3.15 - Interferência na Demodulação FM 43
Figura 3.16 - Ruído na Comunicação em função da frequência.....44
Figura 3.17 - Formas de representação de um Filtro.....45
Figura 3.18 - Tipos de Filtros.....46
Figura 3.19 - Filtro passa banda.....47
Figura 3.20 - Butterworth.....48
Figura 4.1 - Topologia do projeto.....54
Figura 4.2 – Diagrama do Projeto.....55
Figura 4.3 - Cabo (Monster Cable Prolink Standard 100 12ft 3,65m) 56
Figura 4.4 - Transmissor FM.....57

Figura 4.5 - Receptor (Sony Walkman).....57

Figura 4.6 - Interface p10/USB (Guitar Link).....57

Figura 4.7 - Duplicador de Sinal p10 58

Figura 4.8 - Topologia da captura do sinal produzido pela Guitarra 58

Figura 4.9 - GarageBand 59

Figura 4.10 - Manipulação no Audacity 60

Figura 4.11 - Criação do Filtro passa-banda.....62

Figura 4.12 - CABO1 vs FM1 no domínio do Tempo.....62

Figura 4.13 - Filtro Smooth [30] 63

Figura 4.14 - Comparação do sinal FM com o Cabo no domínio do Tempo...64

Figura 4.15 - Comparação do sinal FM com o Cabo no domínio da Frequência 65

Figura 4.16 - Comparação do sinal FM com o sinal FM filtrado no domínio da Frequência.....66

Figura 4.17 - Aplicação dos Filtros no CABO1 67

Figura 4.18 - Aplicação dos Filtros no FM1 67

Figura 4.19 - Aplicação do Filtro no CABO1 Ampliada 68

Figura 4.20 - Aplicação do Filtro no FM1 Ampliada 68

Figura 4.21 - Análise de Frequências pelo Audacity 1.....72

Figura 4.22 - Análise de Frequências pelo Audacity 2.....73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Custos com o transmissor FM 19

Tabela 2.2 - Custos com o transmissor Proficional..... 19

Tabela 3.1 - Rádios em Brasília (Wikipedia, 2012)..... 37

Tabela 4.1 - Softwares Utilizados 55

Tabela 4.2 - Equipamentos para a gravação 56

Tabela 4.3 - Relação Sinal Ruído [dB]..... 69

Tabela 4.4 - Teste F..... 70

Tabela 4.5 - Teste T..... 70

Tabela 4.6 - Harmônicos da Corda Lá transmitidos pelo cabo. (Hz) 71

Tabela 4.7 - Harmônicos da Corda Lá transmitidos pela FM. (Hz) 71

Tabela 4.8 - Intensidades dos Harmônicos da Corda Lá transmitidos pelo Cabo. (dB) 73

Tabela 4.9 - Intensidades dos Harmônicos da Corda Lá transmitidos pela FM. (dB)..... 74

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FM	Modulação em Frequência
UHF	Ultra High Frequencies (Frequências Ultra Altas)
FFT	Transformada Rápida de Fourier
DFT	Transformada Discreta de Fourier
dB	Decibel
Hz	Hertz
SNR	Signal to Noise Ratio (Relação Sinal Ruído)
DC	Corrente contínua
AF	Frequência de áudio
RF	Rádio frequência
RMS	Valor quadrático médio
USB	Universal serial bus

RESUMO

É muito comum o uso de transmissores sem fio em instrumentos musicais, a liberdade para a execução do instrumento possibilita ao músico uma maior mobilidade e influencia na sua performance artística no palco. Porém, transmissores profissionais que utilizam uma transmissão em UHF são pouco acessíveis pelo seu alto custo. Ao pesquisar alternativas aos transmissores profissionais, são encontrados diversos transmissores FM automotivos adaptados para o uso em instrumentos musicais. Tais transmissores utilizam a banda comercial de rádio FM para transmitir o áudio e, portanto podem ser mais vulneráveis à interferência e ruído. Este projeto consiste na comparação de um sinal produzido por uma guitarra e transmitido via FM com o mesmo sinal transmitido via cabo. O sinal emitido da guitarra é dividido por um duplicador de sinal, transmitido por um lado com o cabo e pelo outro lado é transmitido via FM por um transmissor automotivo. Os sinais são recebidos em dois computadores aonde são feitas as gravações das amostras. Depois de coletadas as amostras, as mesmas passam por um processo de análise. Na análise do sinal, são utilizados diversos conceitos adquiridos ao longo do curso de Engenharia de Computação como a Transformada Discreta de Fourier, Relação Sinal Ruído, Teste de hipóteses t entre outros conceitos. A partir desta análise é definido se o sinal se degrada consideravelmente, assim poderemos descartar ou não a utilização do transmissor FM para esse fim.

Palavras Chave: Captura do áudio, Análise de sinais, Transmissão FM, Transmissão via Cabo, Modulação de onda, MatLab, Filtro passa banda, Guitarra Elétrica, GarageBand, Audacity, Transformada Rápida de Fourier, Harmônicos, Relação Sinal Ruído.

ABSTRACT

It is very common to use wireless transmitters in musical instruments, the freedom to play the instrument allows the musician greater mobility and influences in his artistic performance on stage. However, professionals transmitters, that use UHF transmission, are not easily accessible due to its high cost. When researching alternatives to professional transmitters, many automotive FM transmitters are found adapted for use in musical instruments. These transmitters use commercial FM radio band to transmit audio and therefore may be more vulnerable to interference and noise. This project consists of comparing a signal produced by a guitar and transmitted by FM with the same signal transmitted by cable. The output signal of the guitar is divided by a signal doubler. In one side of the doubler the signal is transmitted by the cable and in the other side is transmitted by an automotive FM transmitter. The signals are received on two computers where the samples are recorded. Then the samples undergo a process of analysis. To perform the signal analysis several concepts acquired during the course of Computer Engineering are used, like the Discrete Fourier Transform, Signal to Noise ratio, Student's t-test among other concepts. With this analysis it will be set if the signal degrades considerably so we can conclude in discarding or use the FM transmitter for this purpose.

Keywords: audio capture, signal analysis, FM transmission, cable transmission, wave modulation, MatLab, band pass filter, Electric Guitar, GarageBand, Audacity, Fast Fourier Transform, Harmonics, Signal to Noise ratio.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Este projeto analisa a qualidade do sinal de áudio de uma guitarra transmitido via FM comparando-o com a transmissão do sinal via cabo. A partir dessa comparação chega-se a uma conclusão que determina se a utilização de um transmissor com as mesmas características é indicada em algumas situações e quais seriam elas.

A transmissão FM é uma transmissão sem fio muito utilizada há algum tempo. É uma transmissão onde o sinal de áudio modula a frequência da onda portadora. Uma rádio FM sincroniza ou captura a portadora de FM e recusa qualquer outro sinal que não seja identificado, incluindo a maioria dos ruídos e de outras estações de FM com sinal mais fraco que estejam na mesma frequência. A banda de FM inteira ocupa 20 MHz, entre 88 e 108 MHz, um espaço enorme se comparado à banda AM, que ocupa pouco mais de um mega-hertz. Cada estação de FM possui um espectro de 200kHz, largura capaz de transportar um sinal que se estende quase até 100 kHz. Essa largura de banda visa melhorar a relação sinal ruído e acrescentar outros sinais subportadores adicionais. (Gomes, 2004)

A modulação é um processo que permite que ondas de rádio possam transportar a informação em frequência de áudio (voz e música). Tal processo é um sistema onde entram dois sinais e é produzido apenas um sinal na saída. Um dos sinais que entram é o sinal da informação a ser transmitida, que é chamado de sinal modulante. O outro sinal de entrada é um sinal que vai transportar a informação a ser transmitida, seu nome é sinal de portadora. O sinal resultante da modulação é chamado de sinal modulado (sinal de rádio frequência). Na modulação FM a frequência da portadora varia de acordo com o sinal modulante. Nesse método a amplitude da portadora é mantida constante. (Departamento acadêmico de Eletrônica UTFPR, 2007)

A proposta do projeto é avaliar a qualidade deste transmissor FM de baixo custo utilizado para transmitir sinal gerado por uma guitarra elétrica, e assim determinar se o mesmo pode ser utilizado como alternativa para a transmissão do áudio do instrumento sem perdas significativas na qualidade do sinal.

1.1 Objetivo Geral do Trabalho

Analisar o sinal de áudio produzido por uma guitarra e enviado através de uma transmissão sem fio (FM). Também, tem-se objetivo de verificar se as alterações e perdas de qualidade do sinal afetam na qualidade do áudio que chega ao amplificador. Para isso é realizada uma comparação de um mesmo sinal transmitido via meio sem fio e via meio guiado.

1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral do Trabalho é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa;
- Estudar os softwares Audacity e MatLab e as suas ferramentas que poderão ser utilizadas;
- Realizar a gravação das amostras de áudio das transmissões;
- Desenvolver os códigos em MatLab que auxiliaram na análise das amostras;
- Executar os códigos para obter os resultados;
- Analisar os resultados e elaborar a conclusão.

1.3 Metodologia

Para chegar ao objetivo do projeto, serão utilizados os seguintes métodos:

É feita uma pesquisa bibliográfica a fim do melhor entendimento do som, do funcionamento da guitarra, da transmissão FM, da digitalização de sinais e como são realizadas as medições da qualidade do sinal.

São selecionados os equipamentos necessários para a captura do som pelo computador para a coleta das amostras dos sinais transmitidos pelo cabo e pela FM.

A partir daí é definido o local de gravação das amostras a serem analisadas e qual a frequência que será utilizada na transmissão a fim de reduzir as possíveis interferências no sinal.

Escolhem-se então os softwares para a gravação e o manuseio dos sinais de áudio, visando sempre evitar a perda de qualidade do som. É feita então a gravação das amostras de áudio no computador.

Com o MatLab é feita a análise utilizando métodos pré-definidos. E com os resultados que avaliam qualitativamente o sinal transmitido é feita uma comparação dos dois canais e, então, se conclui o transmissor que pode ser uma alternativa na transmissão do sinal da guitarra e em quais ambientes e situações a sua utilização seria indicada, atingindo assim o objetivo do projeto.

1.4 Justificativa e Importância do Trabalho

Os sistemas de transmissão sem fio para instrumentos musicais são relativamente caros, partindo aproximadamente de 500 reais em seus modelos mais baratos. Músicos de renda mais baixa tem mais dificuldade e acabam por não optar pelo transmissor sem fio, pois um cabo de transmissão de áudio comum utilizado na maioria dos instrumentos parte do preço de 20 reais.

Tendo visto essa dificuldade de obtenção de um transmissor sem fio por parte de músicos de baixa renda, algumas empresas têm adaptado transmissores FM, destinados à transmissão do áudio de mp3 players para rádios, para a transmissão sem fio do áudio gerado pelos instrumentos. Tal alternativa é mais barata em relação aos transmissores profissionais, mas a sua qualidade é questionável. Assim, o trabalho aqui proposto busca implementar a transmissão sem fio para esta aplicação, avaliar os fatores que degradam a mesma, assim como avaliar a qualidade da transmissão. O projeto utiliza os recursos mais acessíveis possíveis, ou seja, reaproveita alguns eletrônicos já disponíveis em casa, como um rádio e até um transmissor FM automotivo.

1.5 Escopo do Trabalho

Este projeto visa analisar a qualidade do sinal de áudio de uma guitarra transmitido via FM e compará-lo com a transmissão do sinal via cabo. Concluindo a partir dessa comparação se a utilização de um transmissor com as mesmas características é indicada para algumas situações e quais seriam elas.

1.6 Resultados Esperados

Espera-se que, a partir da análise dos sinais de áudio gravados no computador, possa-se determinar se a transmissão sem fio via FM é uma boa alternativa para o músico, ou seja, se não há uma perda significativa da qualidade do sinal. Para isso será feita também uma comparação do sinal transmitido pelo

método de transmissão sem fio com o via cabo além de testes de escuta para fins de comparação. Essa comparação se dará por meio de uma avaliação da qualidade do canal utilizando o cabo e em seguida o rádio com modulação FM.

1.7 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre os conceitos da transmissão FM e sobre o projeto, metodologia utilizada no projeto, objetivos e estrutura da monografia.

O Capítulo 2 apresenta a contextualização do problema.

O Capítulo 3 apresenta o referencial teórico e metodologias úteis na fundamentação do desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a descrição completa do hardware e software utilizados para a elaboração do projeto, bem como suas especificações. Apresenta também os resultados obtidos e a análise dos mesmos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões a partir dos estudos realizados sobre os sinais transmitidos.

CAPÍTULO 2 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A performance no palco de uma banda é analisada pelo público, não só pela qualidade de suas músicas e da sua execução, mas também pela sua presença de palco. Da mesma forma a habilidade de transmitir ao público empolgação e a mensagem de certa música e do estilo musical adotado pela banda, também estão associados ao desempenho. Além disso, também consiste na habilidade de executar o instrumento enquanto interage com a plateia. Tudo isso é importante no sucesso e reconhecimento do músico como um bom instrumentista e artista. (Heyerdahl, 2012)

Dada essa necessidade, músicos têm utilizado sistemas de transmissão sem fio em seus instrumentos. Tais sistemas de transmissão sem fio permitem uma maior liberdade de movimento ao músico dando-lhe a oportunidade de melhorar o impacto visual e a emoção do espetáculo. Outros artistas têm acompanhado essa tendência, expandindo a operação sem fio a muitos tipos de instrumentos – elétricos, eletrônicos e acústicos. A crescente utilização da amplificação em instrumentos acústicos, como saxofones, também incentiva a sua utilização com sistemas sem fio.

Os sistemas de transmissão sem fio para instrumentos musicais são relativamente caros, partindo aproximadamente de 500 reais em seus modelos mais baratos. Músicos de renda mais baixa tem mais dificuldade e acabam por não optar pelo transmissor sem fio, pois um cabo de transmissão de áudio comum utilizado na maioria dos instrumentos parte do preço de 20 reais.

Tendo visto essa dificuldade de obtenção de um transmissor sem fio por parte de músicos de baixa renda, algumas empresas têm adaptado transmissores FM, destinados à transmissão do áudio de mp3 *players* para rádios, para a transmissão sem fio do áudio gerado pelos instrumentos. Tal alternativa é mais barata em relação aos transmissores profissionais, mas a sua qualidade é questionável. As tabelas 2.1 e 2.2 a seguir apresentam os custos dos equipamentos para cada alternativa de transmissão. Pode-se observar que a transmissão FM se torna bastante atrativa devido o seu preço.

Tabela 2.1 - Custos com o transmissor FM

Equipamento	Preço (R$)
Transmissor (Wireless Fm transmitter)	134,90
Receptor(Rádio Sony Icf-304 Am-fm Portatil)	74,99
Adaptador p10/p2	5,00
Total	214,89

Tabela 2.2 - Custos com o transmissor Proficional

Equipamento	Preço (R$)
Kit com Transmissor e Receptor (Transmissor Audio-Technica ATW 601 AG)	1085,40
Total	1085,40

Esse projeto tem o objetivo de implementar essa solução de transmissão sem fio do áudio, analisar, qualitativamente e quantitativamente, essa transmissão a partir de um instrumento como uma guitarra através de um transmissor FM, e realizar a comparação desse sinal com outras alternativas de transmissão do áudio como o cabo.

CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL TEÓRICO E BASES METODOLÓGICAS

Neste capítulo são apresentadas todas as bases metodológicas para a resolução do problema apresentado no capítulo anterior. Tanto como o funcionamento da guitarra elétrica, desde a criação da onda, da captação até a transmissão sem fio dela ao amplificador, o funcionamento de amplificador em uma onda criada pela guitarra e o funcionamento do transmissor e receptor sem fio.

3.1 O Som

O som é a matéria prima de toda música, sendo assim analisaremos em primeiro lugar suas condições de existência e em seguida as leis que o regem.

Para se obter som é necessário que um corpo (corpo sonoro) realize um movimento chamado de movimento vibratório. Este movimento pode ser obtido por diversos procedimentos, como será visto ao tratar dos instrumentos musicais em especial a Guitarra elétrica. O movimento vibratório é uma condição necessária, mas não única para obtenção do som; é necessária a presença de dois outros fatores: Um meio de transmissão, normalmente o ar, no qual se formam e se propagam as ondas (ondas sonoras) produzidas pelo movimento vibratório do corpo sonoro, e um sujeito receptor que capte as ondas transmitidas pelo meio e as transforme em sensação sonora, o ouvido por exemplo. Podemos então definir o som como uma sensação experimentada quando chegam ao ouvido as ondas produzidas por determinados movimentos vibratórios. Uma onda sonora é formada por ondas senoidais, a Figura 3.1 mostra as propriedades da senóide. (Olazábal, 1993)

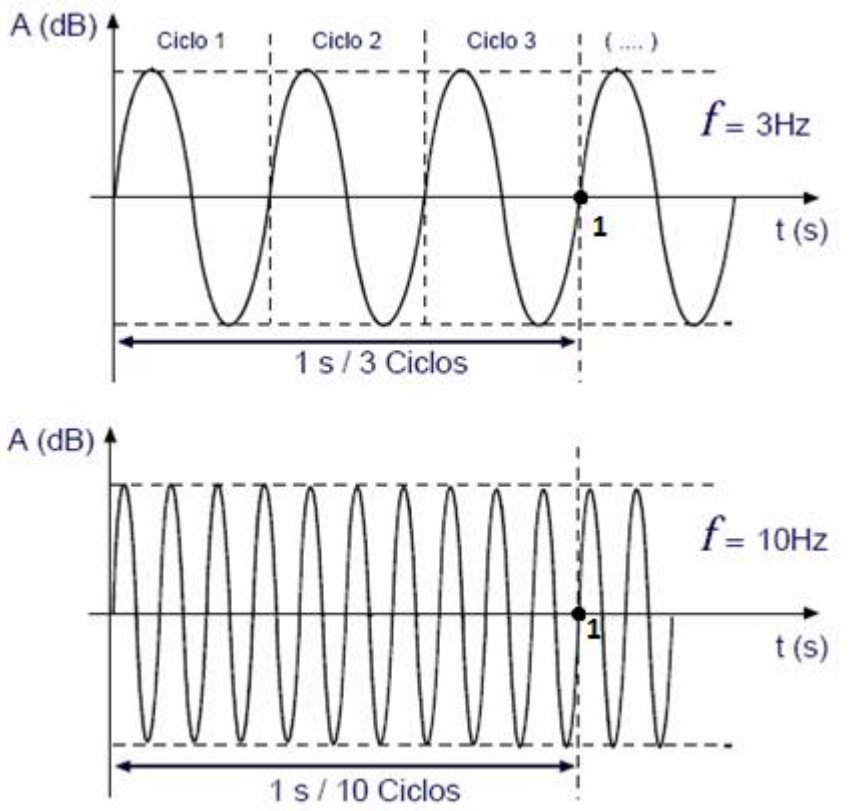


Figura 3.1 - Características da onda

Fonte: (Orta, 2012)

3.2 Movimento Harmônico Simples

O movimento harmônico simples é um dos movimentos vibratórios mais importantes, básicos e comuns. Seu entendimento é necessário para a compreensão do movimento de vibração das cordas da guitarra. Nele a aceleração, e, portanto, também a força resultante, são ambas proporcionais e opostas ao deslocamento a partir da posição de equilíbrio. (Olazábal, 1993)

O tempo que leva para um objeto deslocado executar um ciclo completo de movimento oscilatório é denominado período T. O inverso do período é a frequência f, que é o número de ciclos por unidade de tempo; $f = 1/T$. A unidade de frequência é o Hertz (Hz). A figura 3.2 a seguir exemplifica o movimento harmônico simples em um sistema massa-mola.

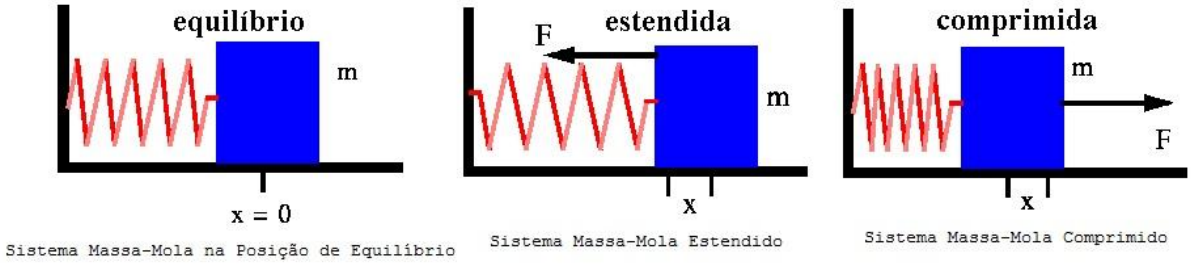


Figura 3.2 - Movimento Harmônico Simples

Fonte: (Departamento de Física CCEN - Universidade Federal da Paraíba)

À medida que afastamos o bloco de massa *m* da posição de equilíbrio, a força restauradora aumenta (considerando o valor de X crescendo positivamente à direita do ponto de equilíbrio), se empurramos o bloco de massa *m* em sentido negativo em relação à posição X=0, uma força de sentido contrário e proporcional ao deslocamento X surgirá tentando manter o bloco na posição de equilíbrio. (Departamento de Física CCEN - Universidade Federal da Paraíba)

3.3 A sensação sonora

Para analisar melhor a qualidade do som transmitido precisamos entender algumas das características do som. As principais qualidades que normalmente são distinguidas no som, ou melhor, as sensações sonoras são três: altura, intensidade e timbre. A altura do som é a qualidade que expressamos ao dizer quando um som é agudo ou grave. Depende principalmente da frequência do movimento vibratório que o origina, correspondendo os sons agudos às frequências altas e os sons graves às frequências baixas. O ouvido humano seleciona as vibrações aptas para serem transformadas em som. As frequências dos sons que podem ser captados pelo ouvido variam de aproximadamente 16Hz até 20.000Hz. Estes limites variam de pessoa para pessoa. Os sons cujas frequências ultrapassam os 12.000 Hz são raros na prática musical. (Olazábal, 1993)

A intensidade do som é a qualidade que expressamos ao dizer se um som é mais forte ou fraco que outro. Depende principalmente da amplitude do movimento vibratório que a origina.

O timbre é a qualidade que permite diferenciar sons de mesma altura e intensidade, mas com fontes distintas. Dependendo do grau de complexidade do movimento vibratório que dá origem ao som. O conjunto das sensações sonoras

produzidas pelos harmônicos produzirá a sensação de timbre do som que compõem. (Olazábal, 1993)

3.4 Corpos Sonoros

São chamados de corpos sonoros aqueles que mediante excitação adequada vibram a fim de produzir sons. Quando as moléculas que formam um corpo sonoro são deslocadas de sua posição de equilíbrio, se originam devido às forças elásticas, movimentos compensatórios que tendem a devolver sua posição inicial, produzindo assim as vibrações. (Olazábal, 1993)

3.5 Instrumentos Musicais

Como o projeto envolve a análise de um sinal emitido por um instrumento musical, torna-se necessário o conhecimento do que é um instrumento musical e principalmente como funciona uma guitarra, instrumento que é utilizado no projeto.

Três são as fontes de som dos instrumentos musicais, vibrações acústicas, mecânicas e elásticas. Na maioria dos instrumentos musicais a produção do som depende do comportamento coletivo de alguns corpos sonoros, os quais podem ser forte ou fracamente acoplados. Esse acoplamento pode levar um instrumento a se comportar como um sistema de vibração complexa, ainda que seus elementos individuais sejam vibradores simples. (Fletcher & Rossing, 1998)

As cordas, feitas de aço, latão, tripa ou nylon, são presas pelas extremidades do instrumento, geralmente sobre um corpo de madeira. As cordas, quando vibradas, produzem os sons, em conjunto com a acústica e o corpo do instrumento. (Banda Sinfônica do CSVP, 2005)

3.6 Violão

O violão é um instrumento de cordas formado basicamente por um corpo e um braço como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 - Estrutura de um Violão

Fonte: (Autor)

O corpo do violão pode ser construído de vários tipos de madeira, é oco e chato. O braço, também de madeira, possui trastes. As cordas do violão, que produzem o som do instrumento, geralmente são de nylon e aço. Ao serem dedilhadas as cordas, o som é produzido pela vibração conjunta das cordas, do ar dentro do corpo do violão e do próprio corpo do violão. (Wikipedia)

3.7 Guitarra Elétrica

A guitarra elétrica, ou apenas guitarra, é um instrumento originado do violão. O violão perdeu seu espaço em orquestras devido à dificuldade de se destacar devido ao seu baixo volume. A partir dessa dificuldade, muitas pessoas buscaram maneiras de amplificar o som desse tipo de instrumento. Com isso nasceu a guitarra elétrica, um instrumento com quase as mesmas características do violão, porém com captação do som por captadores magnéticos, como mostra a Figura 3.4. (Wikipedia)

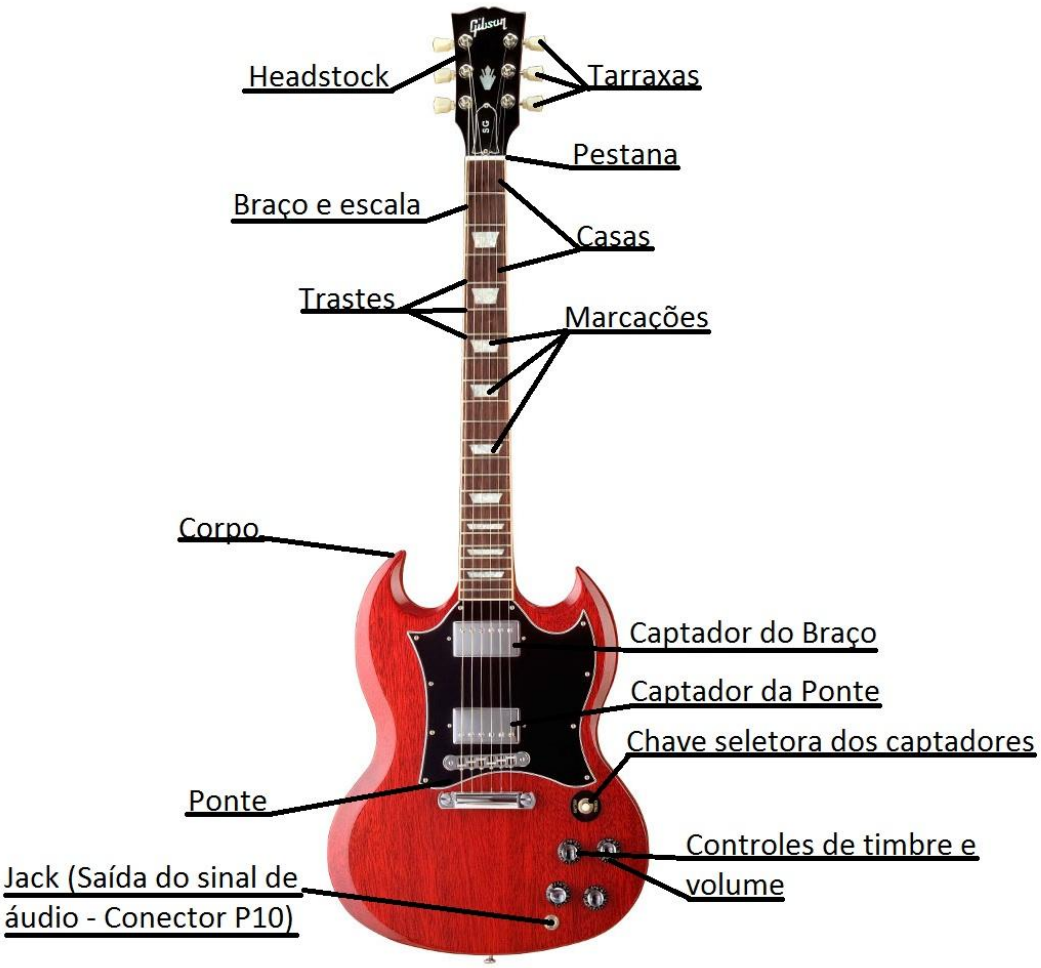


Figura 3.4 - Estrutura de uma Guitarra

Fonte: (Autor)

Os modelos mais populares e comuns de guitarra são os de corpo sólido, porém existem guitarras com o corpo oco ou semi-oco. Para produzir som, uma guitarra elétrica sente as vibrações das cordas eletronicamente e emite um sinal eletrônico para um amplificador e um alto-falante. Os sensores ficam em captadores magnéticos, montados sob as cordas, no corpo da guitarra. Os tipos de captadores mais comuns são os single coils e os Humbuckers. A Figura 3.5 ilustra o funcionamento de um captador single coil. (Brain, 2008)

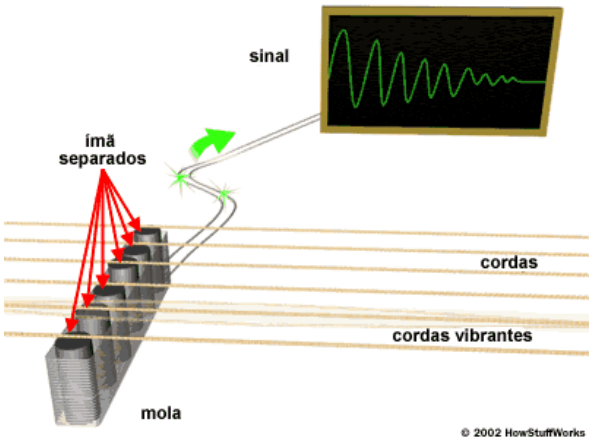


Figura 3.5 - Funcionamento de um captador

Fonte: (Brain, 2008)

Em qualquer captador magnético, como o da Figura 3.5, uma corda da guitarra vibra no campo magnético de um imã fixo dentro do captador que induz uma tensão alternada ao longo da sua bobina. No entanto, as bobinas de arame também exercem o papel de antena, logo são sensíveis à interferência eletromagnética, causada por campos magnéticos da fiação da rede elétrica e aparelhos elétricos, como transformadores, motores, e telas de computador. Captadores da guitarra reproduzem este ruído, o que pode ser bastante audível, soando como um zumbido constante ou ruído. (Brain, 2008)

Um captador humbucker tem duas bobinas enroladas em direções opostas, uma no sentido horário e outra no sentido contrário. Os imãs nas duas bobinas estão dispostos em sentidos opostos, de modo que o movimento das cordas induza tensões nas bobinas na mesma direção. A interferência eletromagnética, por outro lado, induz tensões em direções opostas ao longo das bobinas porque só é sensível à direção de enrolamento. Quando os sinais de ambas as bobinas são somadas em conjunto, geralmente ligando as bobinas em série, as duas tensões de ruído se cancelam, enquanto que as tensões de sinal se adicionam melhorando drasticamente a relação sinal/ruído.(Wikipedia, Humbucker, 2012)

Para a realização do projeto há disponibilidade de duas guitarras, uma Gibson Les Paul Jr. com um captador de bobina simples e uma Gibson SG Standard com dois captadores Humbucker. Com base nos conceitos apresentados foi escolhida a Gibson SG para ser utilizada nas gravações das amostras de áudio do projeto.

A guitarra elétrica produz notas com frequências fundamentais de 82,412 Hz

até 1174,624 Hz como ilustra a Figura 3.6.

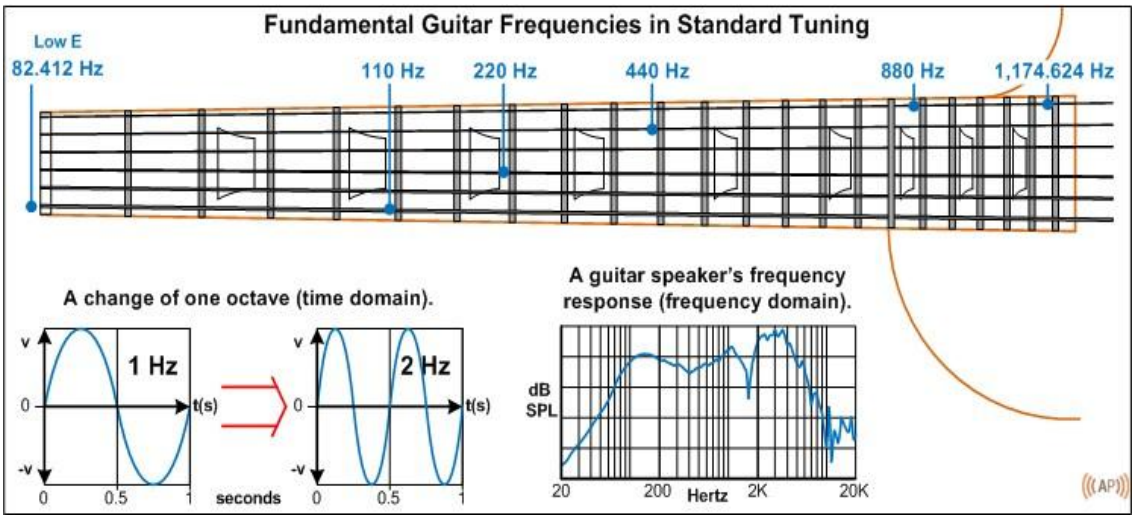


Figura 3.6 - Variação dos Harmônicos fundamentais na guitarra.

Fonte: (Ultimate-Guitar.com, 2011)

3.8 Amplificadores

O amplificador muitas vezes é considerado como parte do instrumento. A maioria das guitarras elétricas é completamente passiva, ou seja, elas não consomem eletricidade e você não precisa ligá-las numa fonte de energia. A vibração das cordas produz um sinal na mola do captador e é o sinal sem amplificação que vai da guitarra para o amplificador. A função do amplificador é fazer com que o sinal da guitarra seja ouvido, aumentando-o o suficiente para fazer um alto-falante funcionar. (Brain, 2008)

Um amplificador normal tem no mínimo três partes: o pré-amplificador, o amplificador elétrico e o alto-falante. Alguns amplificadores também têm efeitos e circuitos ressonantes entre o pré-amplificador e o amplificador elétrico. (Brain, 2008)

A tarefa do pré-amplificador é aumentar o sinal da guitarra para que ele impulsione o amplificador elétrico. Pelo fato de a guitarra elétrica ser passiva, o seu sinal não tem força o suficiente para impulsionar diretamente o amplificador elétrico. (Brain, 2008)

3.9 Movimentos Vibratórios Complexos - Teorema de Fourier

Os sons analisados pelo projeto são produzidos por movimentos vibratórios complexos. O teorema de Fourier relaciona os movimentos vibratórios, com qualquer que seja sua complexidade, com movimentos harmônicos simples.

O Teorema de Fourier define que um movimento vibratório qualquer, de período T e frequência n, é sempre expressado como uma soma de movimentos harmônicos simples cujos períodos serão T, T/2, T/3, T/4 e etc.. Logo com frequências n, 2n, 3n, 4n e etc.. Portanto, seja qual for a forma de uma curva periódica, essa pode ser decomposta num número variável de senóides (sons puros). (Olazábal, 1993)

Cada som puro se chamará harmônico, sendo fundamental o primeiro harmônico de período T e frequência, depois virá o segundo harmônico, daí o terceiro e assim por diante. (Olazábal, 1993)

3.9.1 A física e a percepção do som

Como descrito anteriormente, uma onda sonora é um tipo de onda mecânica. A onda sonora produz áreas de altas e baixas pressões do ar, que movem o tímpano de modo que um ser humano é capaz de ouvi-la. A percepção desta é o som. Para cada um dos elementos capazes de descrever uma onda fisicamente tem-se uma sensação de como esta característica se manifesta. (Ogasawara, 2008)

A forma mais simples de uma onda sonora é a senoidal, ou seja, periódica. A onda senoidal e seus parâmetros estão representados na Figura 3.7 a seguir.

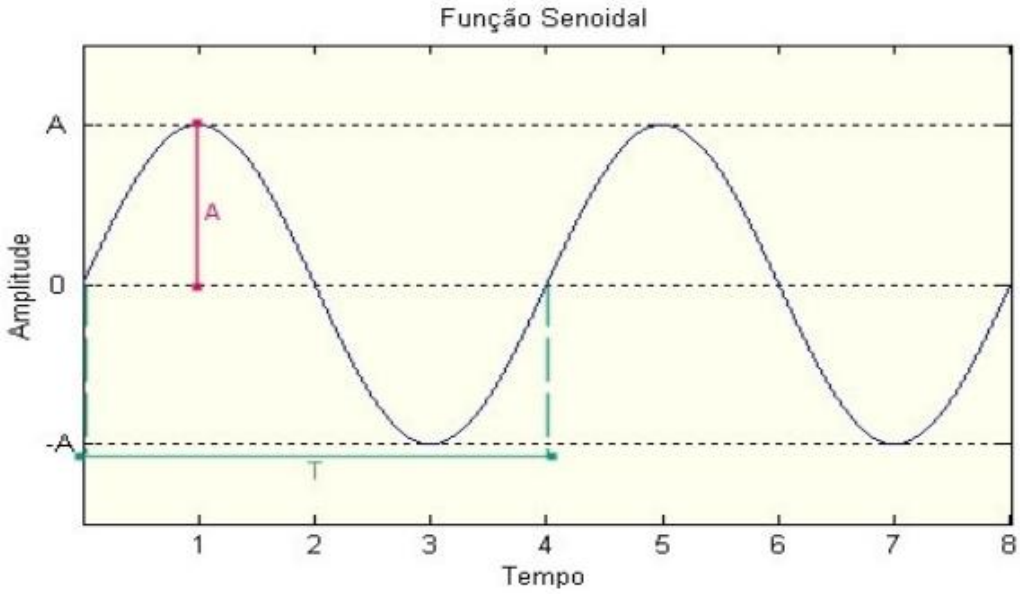


Figura 3.7 - A senóide e seus parâmetros.

Fonte: (Ogasawara, 2008)

A função de uma senóide é do tipo:

$$x(t) = A.sen(2\pi ft + \varphi) \tag{3.1}$$

Sendo:

A – Amplitude, que corresponde ao máximo valor de deslocamento positivo.

f – Frequência, que deriva do período T da onda, sendo o número de ciclos por unidade de tempo, medido em Hertz (Hz).

φ – Fase, que determina a posição inicial da onda, medida em radianos.

Tais parâmetros, como explicado anteriormente são responsáveis por caracterizar as sensações ao ouvir um som. A amplitude está relacionada com a intensidade de um som. Quanto maior a amplitude, maior o deslocamento do ar, assim é maior a intensidade percebida pelos tímpanos. Já a frequência é relacionada com a altura de um som.

Na música ocidental, com a qual somos mais familiarizados, convenciona-se que alguns valores de frequência são equivalentes às notas musicais. Isto é fundamental para o estudo que é desenvolvido no projeto.

Um aspecto importante na caracterização de um som de um instrumento musical é o timbre. A mesma frequência emitida por um violão soa diferente quando emitida por um piano. Como mostra a Figura 3.8 a seguir.

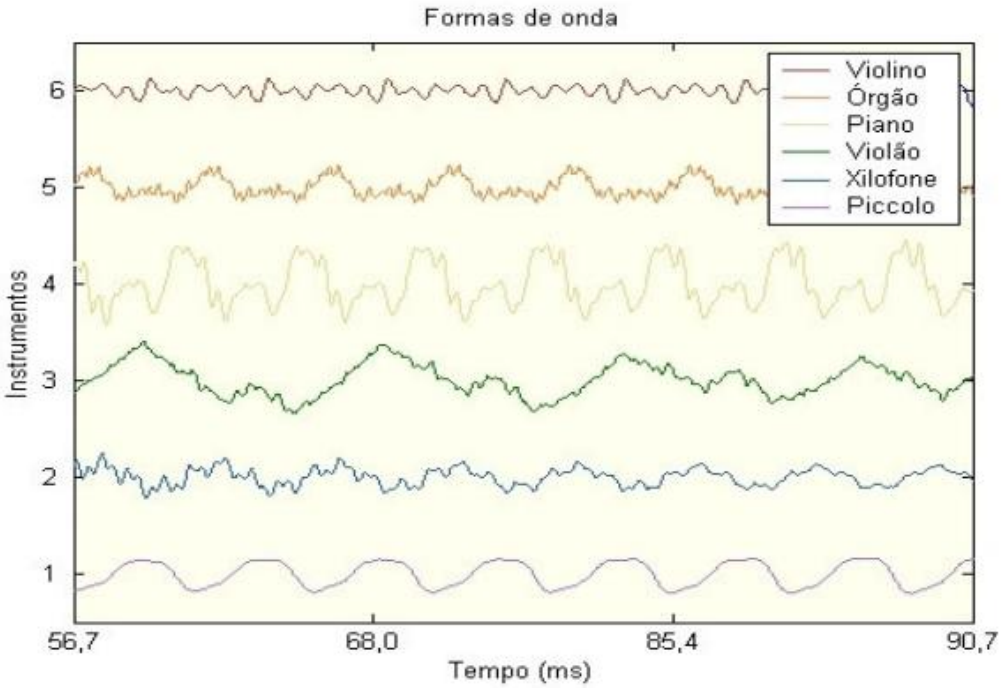


Figura 3.8 - Mesma nota em instrumentos diferentes.

Fonte: (Ogasawara, 2008)

Tal diferença ocorre, pois o som dos instrumentos não é perfeitamente periódico. As amplitudes e o tempo de duração de cada um dos harmônicos presentes no som podem variar independentemente. A combinação dessas duas propriedades é o timbre.

Toda forma de onda pode ser considerada como um somatório de inúmeras senóides, de diferentes amplitudes e frequências. Logo, a forma de onda de um instrumento musical pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$S(t) = A_1 sen(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 sen(2\pi f_2 t + \varphi_2) + A_3 sen(2\pi f_3 t + \varphi_3) + \cdots \qquad (3.2)$$

Conclui-se que, para um som não monótono, existem dois tipos de intensidade. Um dos tipos é a intensidade individual, a amplitude de cada uma das componentes do sinal (A_1, A_2, A_3 e etc). O outro tipo é a intensidade geral do sinal,

que é calculada a partir de todas as amplitudes relativas às frequências que compõem aquele som. (Ogasawara, 2008)

3.9.2 Transformada Rápida de Fourier

Um som, considerado harmônico é aquele onde as frequências das componentes são múltiplos inteiros da frequência fundamental. Essas componentes então são chamadas de harmônicos. Assim, quando se extrai o espectro de frequência de um som harmônico, têm-se intervalos constantes de tamanho f_0.

Um sinal periódico qualquer $X_p(t)$ com período $T > 0$ para $\forall\, t$, ou seja, $x_p(t) = x_p(t \pm T)$ pode ser decomposto em ondas senoidais a partir da série trigonométrica de Fourier, isto é,

$$x_p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k\, cos(k\omega_0 t) + b_k sen(k\omega_0 t)] \tag{3.3}$$

Sendo

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \tag{3.4}$$

a frequência angular e T o período. Os coeficientes de Fourier, a_k e b_k são obtidos através de:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x_p(t) \cos(k\omega_0 t)\, dt \tag{3.5}$$

e

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x_p(t) \operatorname{sen}(k\omega_0 t)\, dt \tag{3.6}$$

Escrevendo a equação (3.3) na forma exponencial, temos:

$$x_p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \tag{3.7}$$

sendo

$$a_k = \frac{1}{T}\int_0^T x_p(t)\, e^{-jk\omega_0 t} dt \tag{3.8}$$

os coeficiente complexos da Série de Fourier que multiplicam cada termo da expansão. O coeficiente a_0 é o valor DC ou componente contínua de $x_p(t)$ que representa o valor médio de $x_p(t)$ em um período, seu valor é fornecido por: (Ferreira, 2006)

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T x_p(t) dt \tag{3.9}$$

A Série de Fourier é usada na análise de sinais periódicos no tempo. A série de um sinal periódico permite a análise da sua composição harmônica. Para um sinal aperiódico $x(t)$ a resposta em frequência é obtida através da Transformada de Fourier. A representação da transformada de Fourier de um sinal de tempo envolve uma integral de frequência, como é mostrado por (Haykin & Veen, 2001)

$$x(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \tag{3.10}$$

em que

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \tag{3.11}$$

sendo $x(t)$um sinal do tempo, contínuo e aperiódico. O resultado da transformada, $X(\omega)$, é um sinal no domínio da frequência, contínuo e aperiódico.

Para sinais periódicos discretos $x[n]$, sou seja, $x(n) = x(n \pm N)$ com período N, é usada a Série de Fourier discreta,

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\Omega_0 n} \tag{3.12}$$

Sendo

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{N} \tag{3.13}$$

a frequência angular e N o período. Os coeficientes a_k, para todo e qualquer k (com $k = 0, 1, 2 \ldots N-1$), podem ser considerados como uma sequência periódica, com período N, da qual é possível extrair apenas N termos para se obter a representação completa por série de Fourier de $x[n]$. Portanto, para sinais discretos, a equação (3.3) e os coeficientes a_k podem ser escritos respectivamente como: (Ferreira, 2006)

$$x[n] = \sum_{n=<N>} X[k] e^{jk\Omega_0 n} \tag{3.14}$$

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=<N>} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} \tag{3.15}$$

A série de Fourier discreta é aplicada à análise de sinais periódicos discretos no tempo. Para sinais aperiódicos discretos no tempo a resposta em frequência é obtida através da DFT (Transformada Discreta de Fourier). Sabendo que em sinais aperiódicos $x[n] = 0$ para $\forall\ |n| \leq N$ e considerando que $X(k) = a_k$, conclui-se que a DFT é obtida pela mesma expressão que fornece os coeficientes da Série Discreta de Fourier, ou seja,

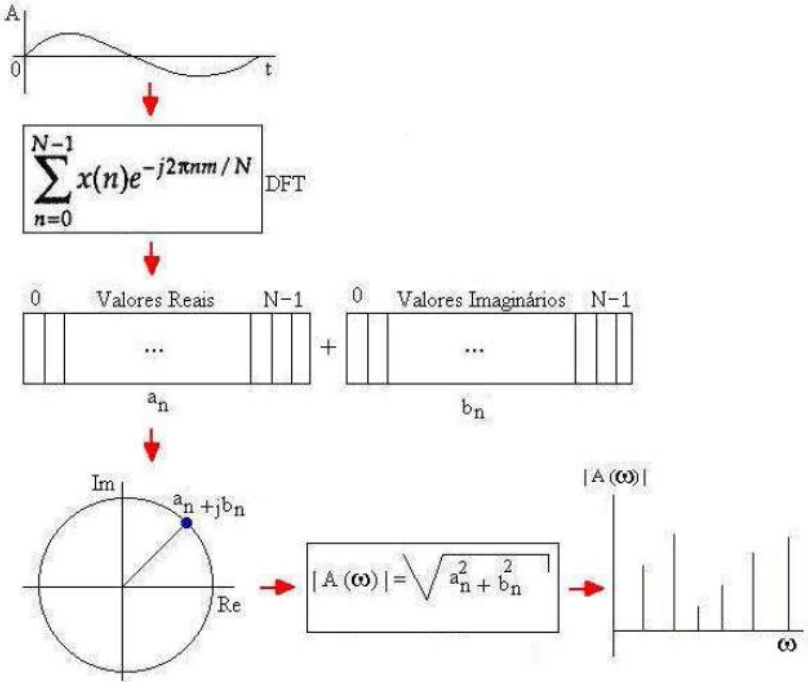
$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=<N>} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} = \frac{1}{N} \sum_{n=<N>} x[n] e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \tag{3.16}$$

uma função discreta e aperiódica, enquanto que $X[k]$ é uma função complexa, discreta e periódica, com Ω variando entre 0 e 2π. Fazendo $W_N = e^{-\frac{j2\pi}{N}}$, tem-se:

$$DFT\{x[n]\} = X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \tag{3.17}$$

onde W_N^{kn} é denominado fator de giro da DFT. Os fatores de giro definem pontos sob o circulo unitário no plano complexo z e são igualmente distribuídos em torno do círculo e incrementados de uma frequência definida por F_s/N, em que F_s é a frequência (ou taxa) de amostragem e N o numero de amostras. (Ferreira, 2006)

A FFT (Transformada Rápida de Fourier) é um método computacional que calcula a DFT mais rapidamente. O MatLab, utilizado nesse projeto para a análise do sinal, possui uma função FFT que realiza a transformada rápida de Fourier a partir de um sinal armazenado em um vetor. Assim, é possível transformar os sinais de áudio amostrados no tempo para o domínio da frequência.



Fiigura 3.9 - Processo para obtenção da Transformada Discreta de Fourier
Fonte: (Ferreira, 2006)

Na Figura 3.9, um sinal no domínio do tempo é submetido à expressão da transformada discreta de Fourier, que resulta num vetor com valores complexos que está representado na figura também em uma circunferência no plano complexo. Por fim as amplitudes das componentes espectrais do sinal são obtidas a partir do módulo, ou valor absoluto deste vetor complexo. (Ferreira, 2006)

3.10 Transmissão FM

3.10.1 Transmissor FM

Este projeto tem o objetivo de avaliar o sinal que é gerado pela guitarra e recebido em um amplificador ou computador, quando transmitido por um transmissor FM de baixa potência. No projeto é utilizado um transmissor FM automotivo (Figura 3.10) para transmitir o sinal de áudio da guitarra para um receptor (rádio comum) ligado ao computador.

Figura 3.10 - Transmissor FM
Fonte: (Site Coisasuteis.net)

O transmissor de baixa potência foi escolhido, pois o mesmo é apresentado como alternativa a transmissores profissionais para instrumentos musicais. No site de compras Mercado Livre podem ser encontrados diversos anúncios, como por exemplo, o anúncio encontrado neste link: http://migre.me/chUur. Em anúncios como esse, diversos vendedores garantem que o sinal transmitido é de qualidade, porém apresentam algumas restrições com relação ao seu uso como a distância do receptor e o local de uso.

No anúncio citado acima, quando o vendedor apresenta as características do transmissor, o mesmo relata que a utilização do transmissor pode ser feita com uma distancia de até 70 metros do transmissor, porém com melhores resultados em até 20 metros. Porém, em texto logo abaixo, o vendedor cita que em seu laboratório de testes conseguiu “absoluta eficiência e total ausência de ruídos” com o instrumento a

até 10 metros do receptor. O projeto aqui trata da utilização do transmissor para treino, tendo a sua utilização recomendada para locais como estúdios e quartos. Nestes ambientes, devido à quantidade de móveis, equipamentos e instrumentos, o espaço livre para o guitarrista treinar não chega a mais de 4 metros. O que, a essa distância, teoricamente, retornaria em uma boa qualidade na transmissão do sinal. As figuras 3.11 e 3.12 abaixo são exemplos de estúdios para treino e gravação de música.

Figura 3.11 - Estúdio 1

Fonte: (RMS Rehearsal Studios)

Figura 3.12 - Estúdio 2

Fonte: (Estúdio 57)

Neste transmissor FM o sinal da guitarra passa pelo seguinte processo: O áudio da guitarra é convertido em um sinal FM utilizando a modulação em frequência e este sinal modulado é enviado por um transmissor de rádio-frequência em uma frequência específica, como um sinal de estação FM em seu último estágio. Assim, consegue-se sintonizar o sinal específico por um receptor comum FM, como um radinho de pilhas comum, reproduzindo assim, o áudio da guitarra como seria reproduzida uma estação de rádio comum. (LOGJAM ELETRONICS, 2012)

Uma decisão importante a respeito da utilização do transmissor é o local onde ele será usado. O seu uso não é indicado em centros de grandes cidades devido à grande quantidade de estações de rádio que podem interferir na recepção do sinal e a relativamente baixa potência de saída desse tipo de transmissor. A tabela 3.1 lista as estações de rádio FM de Brasília e suas respectivas frequências.

Tabela 3.1 - Rádios em Brasília **(Wikipedia, 2012)**

Frequência (MHz)	Nome da Rádio
87.75	TV Brasília (canal de áudio)
88.3	Mix Brasília
88.9	Super Rádio Boa Vontade
89.1	Rádio Canção Nova
89.9	Brasília Super Rádio
90.5	Band News FM
90.9	Mega FM
91.1	Força Aérea FM
91.7	Rádio Senado
92.3	Rádio Inovação FM
92.9	Boas Novas 92 FM
93.7	Antena 1
94.1	Rádio Iguatemi
94.5	Rádio Imaculada
95.3	CBN
95.7	Serra Dourada FM (Cristalina/GO)
96.1	Nacional FM
96.5	Rádio 96,5 FM
96.9	Rádio Câmara FM
97.5	Nova Brasil
98.1	Faixa Comunitária
98.3	Rádio Top FM
98.7	Verde Oliva FM
99.3	Rede Aleluia
99.7	Sara Brasil FM

100.1	Transamérica Pop
100.5	Rede Sucesso de Rádio
100.9	Cultura FM
101.3	Vida Fm Brasilia
101.7	Executiva FM
102.7	JK FM
103.1	Rádio Mais FM
103.3	Rádio Nova Aliança FM
104.1	FM 104 Brasília
104.7	Rádio Justiça
105.5	Clube FM
106.3	Jovem Pan FM
107.1	Atividade FM
107.9	Rádio Maria

A figura 3.13 mostra um esquema básico do funcionamento de um transmissor FM.

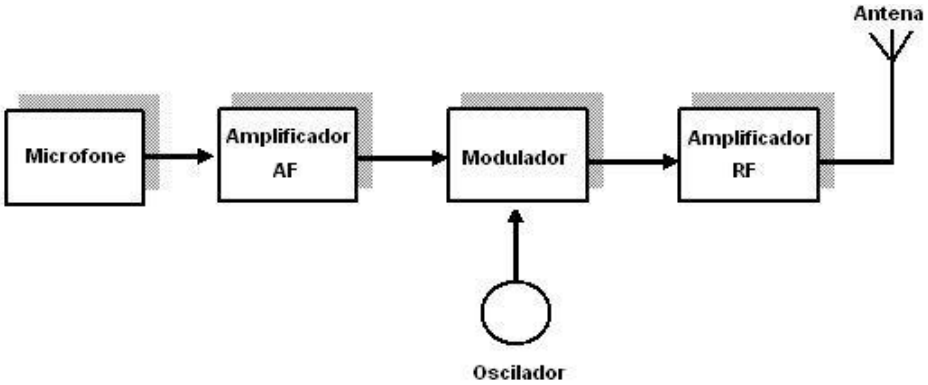


Figura 3.13 - Esquema de Transmissor FM

Fonte: (Leite & Marques, 2005)

O microfone (ou apenas entrada de áudio) é o instrumento que permite o recebimento ou geração dos sinais de áudio que serão transmitidos. O amplificador de frequência de áudio (AF) é um dispositivo que aumenta a amplitude do sinal de áudio que vem do microfone. No modulador acontece o processo de modulação FM utilizando a portadora gerada pelo oscilador. O sinal que sai do modulador vai para o amplificador de rádio frequência que aumenta a amplitude do sinal de rádio frequência, conservando a frequência, para assim poder ser enviado através do

canal de comunicação pela antena. A antena é o dispositivo condutor que emite o sinal eletromagnético para o ar. (Leite & Marques, 2005)

3.10.2 Modulação FM

Modulação é o processo através do qual a música ou outro sinal “inteligível” é adicionado às ondas de rádio produzidas por um transmissor. Um sinal de rádio quando não modulado é conhecido pelo nome de portadora. Por definição, a modulação é a variação de um parâmetro de uma onda portadora senoidal, de maneira linearmente proporcional ao valor instantâneo do sinal modulante ou informação. Ou seja, a portadora é a onda senoidal que, pela modulação de um dos seus parâmetros, permite a transposição espectral da informação (sinal modulante). A portadora possui três parâmetros: Amplitude, Frequência e Fase. Sendo assim, são possíveis três formas básicas de modulação: Modulação em Amplitude (AM), modulação em Frequência (FM) e modulação em fase (PM). (Campos, 2002)

Existe um método de modulação da portadora senoidal chamado de modulação de ângulo, no qual a fase ou a frequência da portadora varia de acordo com o sinal modulante. Nesse método a amplitude da portadora é mantida constante. (Departamento acadêmico de Eletrônica UTFPR, 2007)

A modulação de ângulo pode ser compreendida matematicamente segundo a fórmula:

$$s(t) = A_c.\cos[\theta(t)] \tag{3.18}$$

Onde a amplitude A_c é mantida constante e o ângulo $\theta(t)$ do cosseno varia conforme o sinal modulante $m(t)$. O ângulo $\theta(t)$ traduz uma posição angular que se relaciona com a frequência e a fase da portadora segundo (onde a frenquencia da portadora é f_c e a fase é φ_c.):

$$\theta(t) = 2.\pi.f_c.t + \varphi_c \tag{3.19}$$

A modulação FM (modulação em frequência) é um tipo de modulação angular na qual a frequência instantânea$f_i(t)$ da portadora varia conforme o sinal modulante $m(t)$, sendo expressa por:

$$f_i(t) = f_c + k_f.m(t) \tag{3.20}$$

Onde f_c é a frequência original da portadora sem ter sido modulada, k_fé a constante que representa a sensibilidade de frequência do modulador, expressa em hertz por volt (assume-se que $m(t)$ seja um sinal de tensão). (Departamento acadêmico de Eletrônica UTFPR, 2007)

Ao se integrar a frequência instantânea, obtém-se o ângulo do sinal modulado:

$$\theta_i(t) = 2.\pi.\int_0^t f_i(t).dt$$

$$\theta_i(t) = 2.\pi.f_c.t + 2.\pi.k_f\int_0^t m(t).dt \tag{3.21}$$

Por consequência, o sinal modulado em frequência é expresso no tempo por:

$$s(t) = A_c.\cos\left[2.\pi.f_c.t + 2.\pi.k_f\int_0^t m(t).dt\right] \tag{3.22}$$

Características

O sinal modulado em FM é definido por uma função não linear do sinal modulante. Ou seja, o espectro de frequência de um sinal FM não guarda relação direta com o espectro do sinal modulante. (Departamento Acadêmico de Eletrônica UTFPR, 2007)

Considerando um sinal modulante composto de uma única frequência que é expresso por $m(t) = A_m.\cos(2.\pi.f_m.t)$. A frequência instantânea do sinal de FM resultante será:

$$f_i(t) = f_c + k_f.A_m.\cos(2.\pi.f_m.t)$$
$$= f_c + \Delta f.\cos(2.\pi.f_m.t) \tag{3.23}$$

sendo $\Delta f = k_f . A_m$

Onde Δf é o desvio de frequência e representa a máxima variação possível para a frequência instantânea de um sinal FM a partir da frequência da portadora, f_c. Uma característica de um sinal FM é que o Δf é proporcional a Amplitude do sinal modulante e é independente da frequência de modulação. (Departamento Acadêmico de Eletrônica UTFPR, 2007)

A partir da expressão de f_i é possível obter o ângulo do sinal FM:

$$\theta(t) = 2.\pi.\int_0^1 f_i(t).dt$$

$$\theta(t) = 2.\pi.f_c.t + \frac{\Delta f}{f_m} sen(2.\pi.f_m.t) \tag{3.24}$$

A expressão $\Delta f / f_m$ é conhecida como índice de modulação do sinal FM e é chamado de β. Sendo assim,

$$\theta(t) = 2.\pi.f_c.t + \beta sen(2.\pi.f_m.t), \text{ sendo } \beta = \frac{\Delta f}{f_m} \tag{3.25}$$

O β representa o desvio de fase do sinal FM, ou seja, o máximo ângulo inicial possível para o ângulo $\theta(t)$.

Análise espectral de um sinal FM

A partir da análise tonal da modulação FM encontramos a seguinte expressão para o sinal modulado:

$$s(t) = A_c.\cos[2.\pi.f_c.t + \beta sen(2.\pi.f_m.t)] \tag{3.26}$$

Através da utilização de alguns conceitos matemáticos mais avançados, que não serão abordados, podemos expandir a expressão em um novo formato:

$$s(t) = A_c.\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta).\cos[2.\pi.(f_c + n.f_m).t] \tag{3.27}$$

O termo $J_n(\beta)$ corresponde a um tipo de função conhecida como função de Bessel. Em particular nesta aplicação, a função de Bessel é dependente do índice de modulação FM, β. Para maiores detalhes sobre as funções de Bessel e suas aplicações consultar o livro Telecomunicações: Transmissão e Recepção. (Gomes, 2004).

3.10.3 Receptor FM

É utilizado um receptor de rádio comum no projeto para receber o sinal transmitido e enviar o sinal para o computador. A figura 3.14 ilustra o funcionamento de um receptor FM.

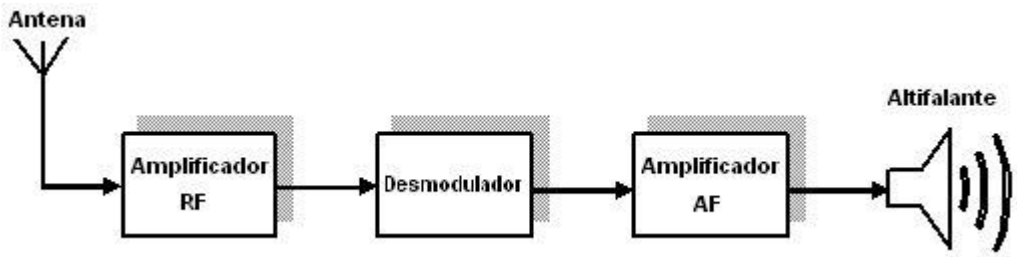


Figura 3.14 - Esquema de Receptor FM
Fonte: (Leite & Marques, 2005)

O sinal recebido pela antena é amplificado no amplificador de rádio frequência. Em seguida o sinal é demodulado no demodulador, ou seja, é extraído o sinal modulante do sinal recebido, realizando o processo inverso ao da modulação. Esse sinal é amplificado para ser reproduzido em um alto falante ou, no caso do projeto, no computador.

3.11Fatores que degradam a transmissão e recepção

Para alcançar os objetivos do projeto é preciso entender o que pode acontecer com o sinal de áudio ao ser transmitido pela FM, como a ocorrência de interferências e ruídos.

3.11.1 Interferência no Sinal FM

É importante entender a possível ocorrência de interferências no sinal FM. Considerando dois sinais $v_c(t)$ e $v_i(t)$ sendo captados por um receptor FM, onde

$v_c(t) = A_C\cos(\omega_0 t)$ é o sinal desejado e sem modulação, e $v_i(t) = A_i \cos((\omega_0 + \omega_i)\, t + \varphi_i)$ é o sinal de interferência, com frequência ligeiramente diferente do sinal desejado. Portanto, o sinal total recebido é a soma dos sinais, ou seja:

$$v(t) = A_c \cos(\omega_0 t) + A_i \cos((\omega_0 + \omega_i)\, t + \varphi_i) \tag{3.28}$$

E através de algumas manipulações algébricas, a equação acima pode ser reescrita como

$$v(t) = A_V \cos\big(\omega_0 t + \varphi_V(t)\big) \tag{3.29}$$

onde

$$A_V(t) = A_c\sqrt{1 + p^2 + 2\rho cos(\theta_i(t))} \tag{3.30}$$

$$\varphi_V(t) = tan^{-1}\left(\frac{\rho sen(\theta_i(t))}{1 + \rho cos(\theta_i(t))}\right) \tag{3.31}$$

$$\rho = \frac{A_i}{A_c} \tag{3.32}$$

$$\theta_i(t) = \omega_i t + \varphi_i \tag{3.33}$$

Se a interferência foi pequena, com $\rho \ll 1$, podemos considerar que

$$A_V(t) \cong A_c(1 + \rho \cos(\omega_i t + \varphi_i)) \tag{3.34}$$

e

$$\varphi_V(t) \cong \rho\, \mathrm{sen}(\omega_i t + \varphi_i) \tag{3.35}$$

A partir dessas equações apresentadas, podemos observar que a portadora é modulada em fase e amplitude, pelo sinal de interferência. Essa modulação em amplitude pode ser eliminada por um limitador de amplitude, porém a demodulação de fase ou frequência é contaminada pela interferência.

Conforme apresentado na Figura 3.15, vemos que a amplitude da interferência é constante com a frequência, e com valor ρna demodulação de fase. Entretanto, na demodulação em frequência, devidoà diferenciação, a amplitude da interferência cresce proporcionalmente com a freqüência, e com valor $\rho\omega_i\cdot$. (Barúqui, 2012)

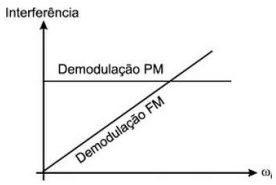


Figura 3.15 - Interferência na Demodulação FM

Fonte: (Barúqui, 2012)

3.11.2 Perda

No espaço livre as ondas de rádio se propagam em linha reta e sofrem atenuação geométrica, uma vez que sua propagação no espaço se dá na forma de esferas cada vez maiores. De acordo com a Recomendação ITU-R PN.252-2, a perda no espaço livre é calculada pela expressão:

$$Lbf = 20\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \tag{3.36}$$

em que Lbf é a perda no espaço livre [dB], d é a distância, λ é o comprimento de onda. Sendo que d e λ devem ser expressas na mesma unidade. (Miyoshi & Sanches, 2002)

A perda nesse caso pode também ser calculada utilizando a frequência f ao invés do comprimento de onda λ. (Miyoshi & Sanches, 2002)

$$Lbf = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) \tag{3.37}$$

3.11.3 Ruído

Ruídos são distorções impostas por características do meio físico e outras inseridas na transmissão pela interferência de sinais indesejáveis. A transmissão de sinais por ondas eletromagnéticas sofre a ação de vários tipos de ruído, tendo sido constatado que a maior incidência se dá na região das frequências mais altas do áudio. Como simboliza a figura 3.16 a seguir, num gráfico onde aparece a amplitude de ruído em função da frequência do sinal modulante. (Gomes, 2004)

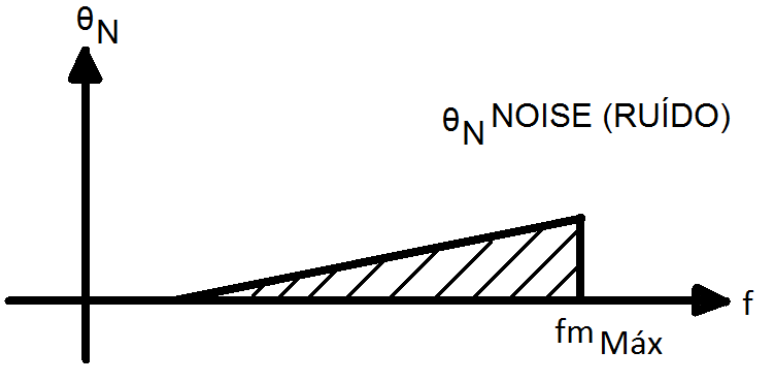


Figura 3.16 - Ruído na Comunicação em função da frequência
Fonte: (Adaptado de Gomes, 2004)

3.11.4 Medição

Neste tópico são apresentados alguns métodos utilizados no projeto que auxiliam a avaliação da qualidade do sinal gravado.

Filtros são utilizados geralmente na separação de sinais que foram combinados, modulados, por exemplo, ou na restauração de sinais que foram distorcidos de algum modo, como um ruído. De modo geral, o modo de implementar um filtro digital é pela convolução do sinal de entrada pela resposta ao impulso do filtro. Todo filtro linear pode ser implementado desta maneira. (Janeczko, 2009)

O filtro altera o espectro de frequências do sinal de entrada $V_i(j\omega)$ de acordo com a sua função de transferência $T(j\omega)$, dando origem a uma saída $V_0(j\omega)$:

$$|V_0(j\omega)| = |T(j\omega)||V_i(j\omega)| \tag{3.38}$$

Como está apresentado na figura 3.17, os filtros digitais podem ser representados por três respostas diferentes, pela resposta ao impulso, degrau e em frequência. Cada resposta traz informações completas sobre o filtro de formas diferentes, e descrevem como o filtro reage sob circunstâncias diferentes. (Ynoguti, 2010)

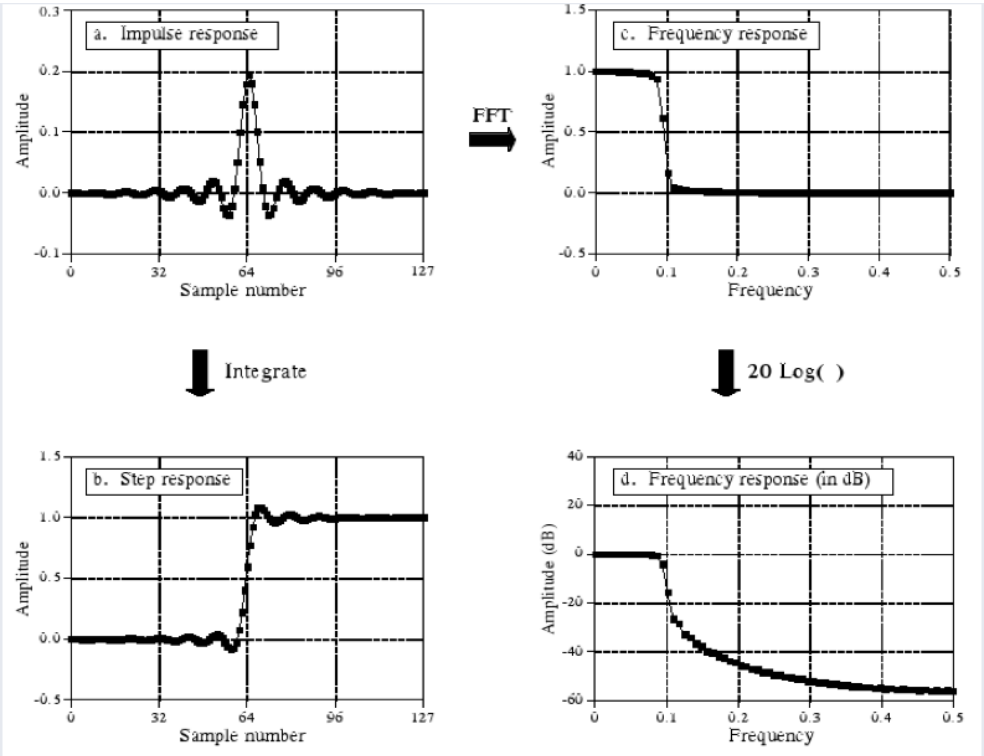


Figura 3.17 - Formas de representação de um Filtro

Fonte: (Ynoguti, 2010)

Resposta em frequência é a análise do comportamento de um sistema quanto ao seu ganho numa certa faixa de frequência. Pode ser representada de duas formas: em uma escala de amplitude linear, para melhor visualização do ripple na banda de passagem e em escala de amplitude logarítmica, para melhor verificar a atenuação da banda de rejeição. O gráfico onde é analisada a resposta em frequência de uma rede é geralmente chamado de curva de Bode. A curva de Bode consiste de um diagrama com uma escala linear de ganho na ordenada (em decibéis (dB) ou em Volt por Volt (V/V)) e uma escala de frequência na abscissa (em Hertz (Hz)). (Ynoguti, 2010)

Os filtros fazem essencialmente uma seleção de frequências, deixando passar as que estão dentro de uma determinada faixa, rejeitando as demais. São definidas três regiões importantes no espectro destes filtros. A banda de passagem corresponde àquelas frequências que devem passar pelo filtro inalteradas. A banda de bloqueio é a região do espectro que deve ser eliminada na saída do filtro. E a banda de transição é a região entre as duas anteriores. O ponto em que ocorre a divisão entre a banda de passagem e a banda de transição é chamada de frequência de corte.

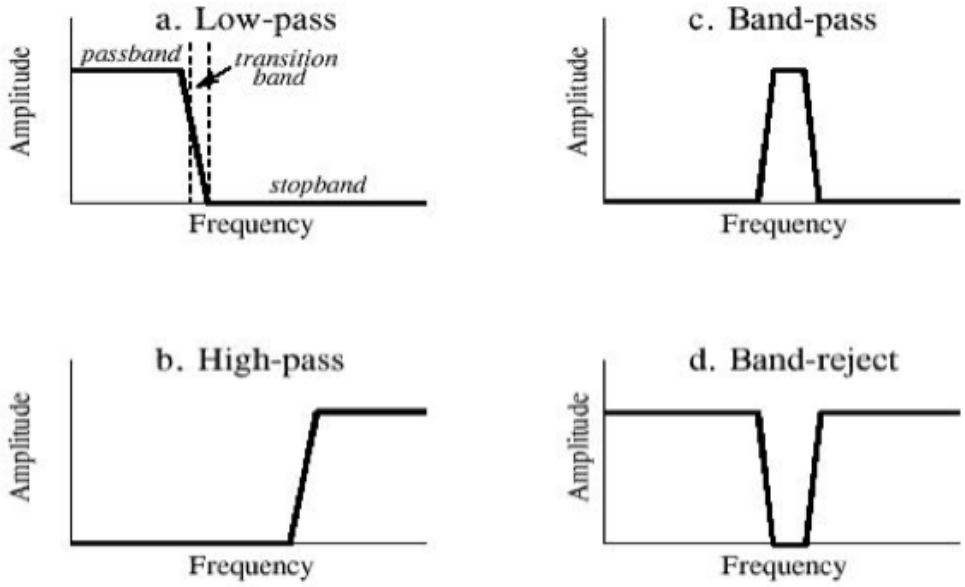


Figura 3.18 - Tipos de Filtros

Fonte: (Janeczko, 2009)

Filtros passa-faixa (ou passa-banda) são projetados a partir da convolução de um passa-baixas e um passa-altas, como mostra a figura 3.19 a seguir.

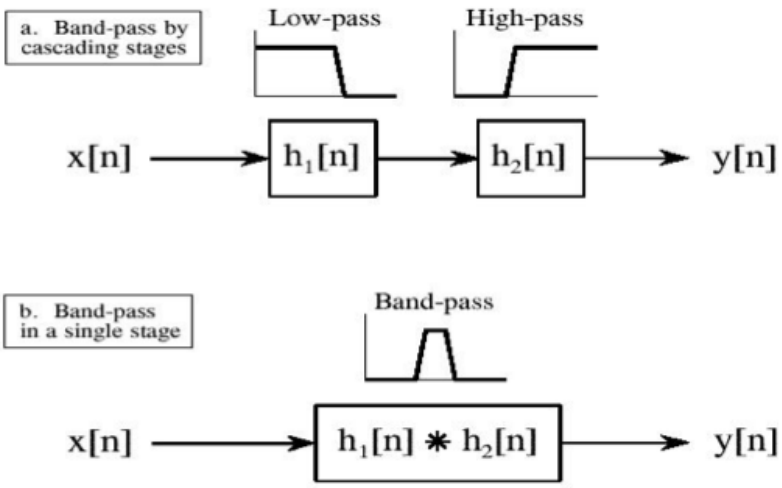


Figura 3.19 - Filtro passa banda

Fonte: (Janeczko, 2009)

Um filtro ideal teria que possuir uma banda passante totalmente plana (sem atenuação) e atenuaria completamente tudo que estiver fora dessa banda. Ou seja, teoricamente, a transição para fora da faixa seria instantânea em frequência, porém, nenhum filtro passa-faixa é ideal. O filtro não atenua todas as frequências fora da banda e existe uma região fora da faixa desejada em que as frequências são atenuadas, porém não rejeitadas. Esta região é conhecida como o roll-off do filtro, expresso em dB de atenuação por oitava de frequência. O projeto de um filtro tenta deixar o *roll-off* o mais seletivo possível afim de que o filtro trabalhe o mais próximo do desejado. Mas o *roll-off* mais seletivo implica em uma banda passante menos plana, produzindo o *ripple.* (Janeczko, 2009)

O filtro Butterworth é o filtro utilizado no projeto. Ele é desenvolvido de modo a ter uma resposta em frequência mais plana possível na banda passante. O filtro Butterworth de ordem 2 varia sua resposta em frequência em -12dB. Os filtros Butterworth possuem uma queda na sua magnitude como uma função linear com ω. A Figura 3.20 é a curva de bode de um filtro butterworth.

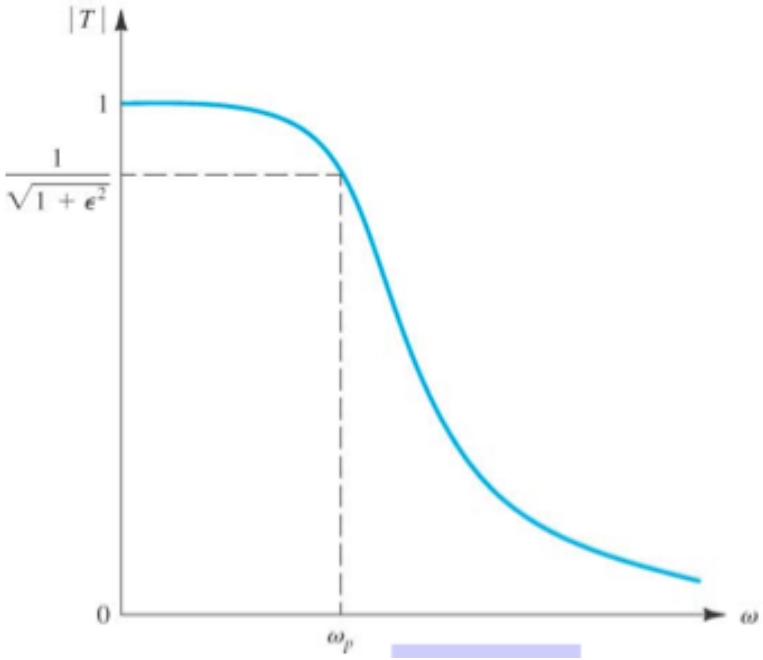


Figura 3.20 - Butterworth

Fonte: (Janeczko, 2009)

O filtro utilizado no projeto foi desenvolvido utilizando a ferramenta *Filter Design and Analysis tool* do software *MatLab*. O FDAtool é uma interface de usuário dedicada ao design e análise rápida de filtros. Foi desenvolvido um filtro passa-banda Butterworth selecionando as especificações do filtro a fim de manter no sinal apenas as frequências que poderiam ter saído do instrumento. Esse filtro foi exportado para o MatLab para ser feita a análise do sinal.

Para uma melhor avaliação da transmissão FM utilizada no projeto, utiliza-se métodos de avaliação qualitativa como a relação sinal ruído. A relação sinal-ruído é uma medida que compara o nível de um sinal ao nível do seu ruído de fundo. É definido como a divisão da potência do sinal pela potência do ruído. Quanto maior a relação sinal ruído, melhor é a qualidade do sinal.

$$SNR = \frac{RMS(x)}{RMS(n)} \tag{3.39}$$

3.12 GarageBand e Audacity

O GarageBand é um software, desenvolvido pela Apple, que entre diversas outras funções grava e toca múltiplas faixas de áudio. É possível melhorar

gravações feitas por ele com o uso de diversos efeitos incluindo distorção, eco entre outros. O GarageBand oferece a habilidade de gravar áudio na resolução 16-bits ou 24 bits.

Para a gravação específica de guitarra, o GarageBand possui uma grande variedade de amplificadores simulados e pedais de efeitos. Estes imitam hardwares populares de marcas famosas para guitarristas como a Marshall e a Orange. E a guitarra pode ser ligada ao computador com a utilização de interfaces USB.

Para a gravação das amostras analisadas no projeto foi utilizado o GarageBand.

O Audacity é um software gratuito para gravação e edição de áudio. Está presente nas plataformas Windows, Linux, Mac OS X entre outras. Nesse projeto é utilizado o Audacity 2.0.2 no sistema operacional Mac OS X 10.8.2 (Mountain Lion). É um software desenvolvido por um grupo de voluntários e distribuído sob a GNU General Public License (GLP). O software possui uma vasta lista de recursos, mas as utilizadas no projeto são as básicas de edição:

1. Importar e exportar arquivos WAV e AIFF.
2. Edição simples utilizando os comandos Cortar, Copiar, Colar e Delete.
3. Comando "Plot Spectrum" para análise de frequências

3.13 Formatos AIF e WAVE

Neste projeto são capturados pelo computador sinais de áudio produzidos pela guitarra. Esses sinais analógicos são convertidos para um arquivo digital de áudio chamado WAVE.

O arquivo WAVE (.wav) é um subconjunto da especificação RIFF para armazenamento de arquivos multimídia da Microsoft. Um arquivo RIFF começa com um header seguido de uma sequencia de blocos de dados. Um arquivo WAVE é geralmente apenas um RIFF com um único bloco de onda que consiste em dois sub-blocos – um bloco “ftm” que especifica o formato do dado e um bloco de dados contendo os dados em si. Esse modelo é chamado de “Modelo Canônico”. (Wilson, 2003)

AIFF é uma sigla para “Audio Interchange File Format” e significa formato de arquivo de intercâmbio de áudio. É um formato de arquivo desenvolvido para

armazenar dados de áudio. Foi desenvolvida pela Apple Computer, mas é baseada no IFF da Eletronic Arts. (TechTerms, 2011)

Um arquivo comum AIFF (.aif) contém dois canais de áudio sem compressão com um tamanho de amostragem de 16-bits, gravado a uma taxa de amostragem de 44.1 kHz. Conhecido também como um arquivo com “qualidade de CD”, ocupa aproximadamente 10 MB a cada minuto de áudio. É um formato muito parecido com o arquivo .WAV (que usa o mesmo tamanho e frequência de amostragem). O arquivo é bastante utilizado mesmo com a popularização de formatos de áudio que utilizam a compressão. Com o uso do AIFF, engenheiros de áudio podem garantir que a qualidade do áudio permanece, mesmo após processos de mixagem e masterização. (TechTerms, 2011)

3.14 MatLab

O MatLab é uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo para computação numérica, visualização, e programação. Com o uso do MatLab é possível analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos e aplicações. A linguagem, as ferramentas e as funções matemáticas prontas possibilitam chegar a resultados mais rápido do que em linguagens como o C/C++ ou o Java.

O MatLab é usado em uma grande variedade de aplicações, incluindo processamento de sinais, processamento de imagem e vídeo, sistemas de controle, finanças computacionais e biologia computacional.

É utilizada no projeto a toolbox de processamento de sinais chamada *Signal Processing Toolbox*. Essa “caixa de ferramentas” do MatLab fornece algoritmos para o processamento de sinais analógicos e digitais. Sendo possível visualizar os sinais nos domínios do tempo e da frequência, computar a FFT para análise espectral, desenvolver filtros FIR e IIR entre outras funções. A ferramenta *Filter Design & Analysis do Signal Processing Toolbox* é utilizada no projeto é a responsável pelo desenvolvimento de filtros para os sinais.

Neste projeto foi utilizado o MatLab na versão R2011b (7.13.0.564) 64bits e Toolbox Signal Processing versão 6.15.

3.15 Teste T de Student

Trata-se de uma técnica para se fazer inferência estatística. Ou seja, a partir de um teste de hipóteses, realizado com os dados amostrais, pode-se inferir sobre a

população. Esta técnica consiste na formulação de uma hipótese quanto ao valor do parâmetro populacional, e pelos elementos amostrais faz-se um teste que indicará a aceitação ou rejeição da hipótese formulada. (Klein, 2012)

Para a realização do teste são formuladas a chamada hipótese nula (H_0), que é a hipótese estatística a ser testada e a hipótese alternativa (H_1). A hipótese nula expressa uma igualdade, enquanto a hipótese alternativa é dada por uma desigualdade. A seguir seguem exemplos de formulações de hipóteses:

- H_0: m = 1,65 m
  H_1: m ≠ 1,65 m (Teste bicaudal)
- H_0: m = 1,65 m
  H_1: m < 1,65 m (Teste unicaudal à esquerda)
- H_0: m = 1,65 m
  H_1: m > 1,65 m (Teste unicaudal à direita)

Existem dois tipos de erro ao testar uma hipótese estatística. Pode-se rejeitar uma hipótese quando ela é, de fato, verdadeira, ou aceitar uma hipótese quando ela é, de fato, falsa. A rejeição de uma hipótese verdadeira é chamada "erro tipo I". A aceitação de uma hipótese falsa constitui um "erro tipo II". No teste de hipóteses com base em frequência estatística a significância de um teste é a probabilidade máxima de rejeitar acidentalmente uma hipótese nula verdadeira. O nível de significância de um resultado é também chamado de α. (Klein, 2012) São seguidos os seguintes passos para a realização do teste de significância.

1. Enunciar as hipóteses H_0 e H_1;
2. Fixa-se o limite do erro α, e identifica-se a variável do teste;
3. Com o auxílio de uma planilha Excel, considerando α e a variável do teste, determina-se a região crítica (RC) e a região de aceitação (RA) para H_0;
4. Com os elementos amostrais, calcula-se o valor da variável do teste;
5. Conclui-se pela aceitação ou rejeição de H_0 mediante comparação do valor obtido no 4º passo com RA e RC.

Primeiramente realizamos o teste de significância para a igualdade de duas variâncias (teste f):

1. Enunciam-se as duas hipóteses:
   H_0: $\sigma^2_{CABO} = \sigma^2_{FM}$
   H_1: $\sigma^2_{CABO} \neq \sigma^2_{FM}$
2. Fixa-se α. Escolher a variável "f" com (n_1 - 1) graus de liberdade no numerador, e (n_2 - 1) graus de liberdade no denominador.
3. Com o auxílio de uma planilha Excel, determinam-se RA e RC.
4. Com a o auxílio de uma planilha Excel calcula-se o valor da variável "Fcal" e "Fcrítico".
5. Assim, conclui-se:
   Se Fcal ≤ Fcrítico, aceita-se H_0. (Populações Homocedásticas)
   Se Fcal > Fcrítico, rejeita-se H_0. (Populações Heterocedásticas)

Em seguida realiza-se o teste de significância para a igualdade de duas médias (teste t): (Klein, 2012)

1. Enunciam-se as duas hipóteses:

$$H_0: \mu_{CABO} = \mu_{FM}$$

$$H_1: \mu_{CABO} \neq \mu_{FM}$$

2. Fixa-se α. Escolhe-se a variável "t" com (n_1 + n_2 - 2) graus de liberdade.
3. Com o auxílio de uma planilha Excel, determinam-se RA e RC.
4. Com a o auxílio de uma planilha Excel calcular-se o valor da variável "tcal" e "tcrítico".
5. Assim, conclui-se:

   Se -tcrítico ≤ tcal ≤ tcrítico, aceita-se H_0.

   Se tcal < -tcrítico ou tcal > tcrítico, rejeita-se H_0.

O teste t é utilizado no projeto nas relações sinal/ruído obtidas das amostras gravadas.

CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo é descrito como foi realizada a gravação dos sinais de áudio da guitarra e como foram feitos os códigos em MatLab, que são utilizados nas análises e comparação dos dois meios de transmissão. Neste capítulo também são apresentados os resultados obtidos com os códigos e ferramentas e as análises feitas.

4.1 Descrição Geral do Modelo Proposto

O desenvolvimento do projeto é constituído basicamente das seguintes etapas:

1. Gravação de amostras do sinal de áudio
2. Análise das amostras
3. Interpretação dos resultados das análises
4. Conclusão

Etapas que são ilustradas na Figura 4.1 a seguir.

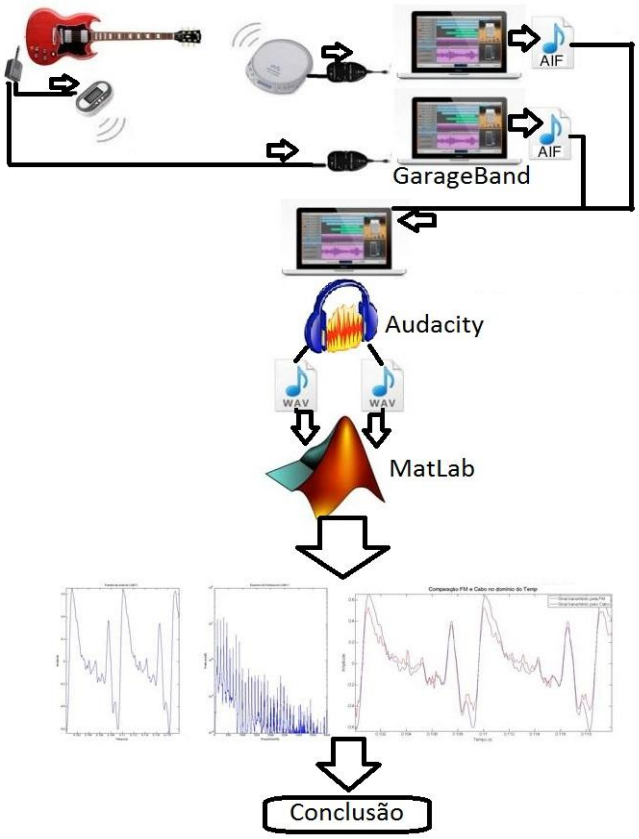


Figura 4.1 - Topologia do projeto

Fonte: (Autor)

O diagrama da figura 4.2 a seguir apresenta uma explicação geral das etapas do projeto.

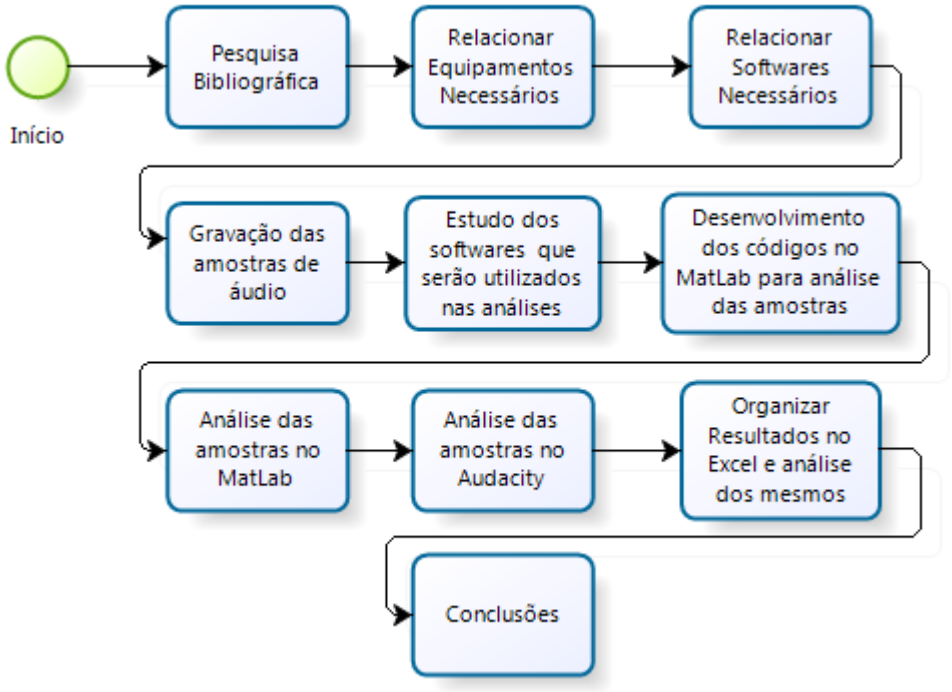


Figura 4.2 – Diagrama do Projeto

Fonte: (Autor)

Os softwares que são utilizados neste projeto encontram-se descritos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Softwares Utilizados

Plataforma (SO)	Software
Mac OS X 10.8.2	GarageBand 6.0.5 (428.5)
Mac OS X 10.8.2	Audacity 2.0.2
Mac OS X 10.8.2	MatLab R2011b (7.13.0.564) 64bits
Windows 7	Excel 2010

4.2 Gravações das Amostras

Devido a dificuldades de sincronização das amostras, foi determinado que não fossem gravadas apenas duas amostras (ex. FM.wav e CABO.wav), mas sim várias amostras para cada tipo de transmissão (ex. FM1.wav, FM2.wav... FMn.wav

assim como CABO1.wav, CABO2.wav... CABOn.wav). Assim, tais amostras são analisadas para alcançar o objetivo do projeto.

Para coletar as amostras são necessários os equipamentos descritos na Tabela 4.2 a seguir. As Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 mostram fotos reais dos equipamentos utilizados na gravação. E a Figura 4.8 mostra como foram organizados.

Tabela 4.2 - Equipamentos para a gravação

Equipamento	Quantidade
Guitarra Gibson SG	1
Transmissor FM	1
Cabo p10	1
Duplicador p10	1
Receptor FM	1
Computador	2
Interface P10/USB	2

Figura 4.3 - Cabo (Monster Cable Prolink Standard 100 12ft 3,65m)
Fonte: (Autor)

Figura 4.4 - Transmissor FM

Fonte: (Autor)

Figura 4.5 - Receptor (Sony Walkman)

Fonte: (Autor)

Figura 4.6 - Interface p10/USB (Guitar Link)

Fonte: (Autor)

Figura 4.7 - Duplicador de Sinal p10

Fonte: (Autor)

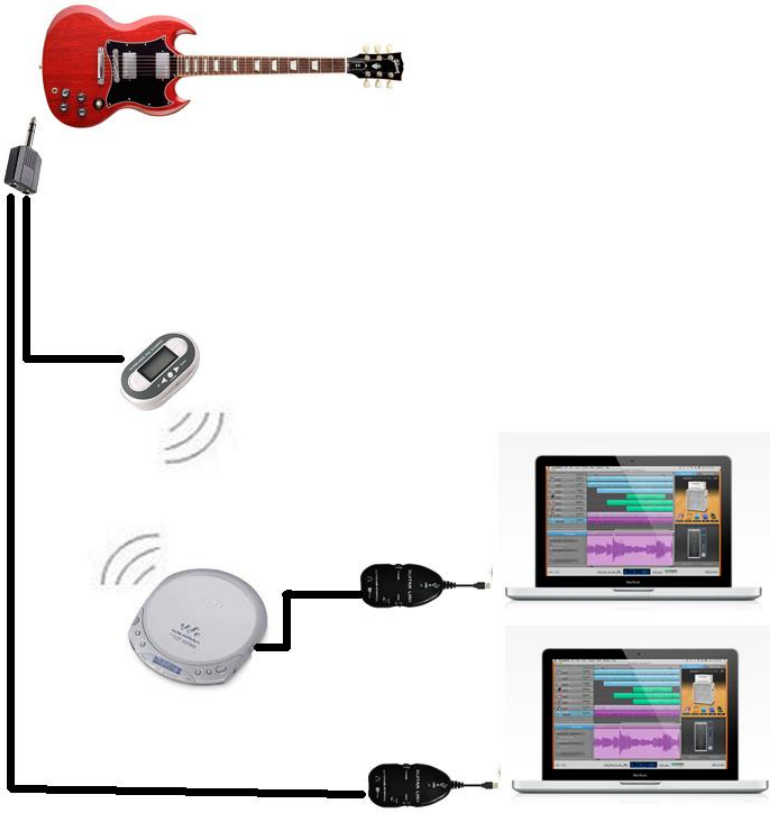


Figura 4.8 - Topologia da captura do sinal produzido pela Guitarra

Fonte: (Autor)

a) Produção e transmissão do sinal da guitarra

A partir da disposição dos componentes necessários para a captura do sinal produzido pela guitarra, como é mostrado na Figura 4.8, é reproduzida a corda Lá (quinta corda solta) repetidamente na guitarra, com auxilio de um metrônomo. O sinal gerado pelo instrumento passa por um duplicador. Por um lado, o sinal é transmitido por um cabo e pelo outro lado é transmitido pela FM por um transmissor

automotivo. O sinal é transmitido até a ponta final do cabo p10 e recebido pelo receptor FM, que estão ligados a dois computadores diferentes através de uma interface p10/USB. No momento da gravação o transmissor estava a 3 metros do receptor.

b) Captação da onda sonora pelos computadores:

Com a utilização das duas interfaces p10/ USB foi capturado o sinal da guitarra em dois computadores diferentes. Em um computador foi capturado o áudio transmitido diretamente da guitarra para o computador via cabo. No outro computador foi capturado o mesmo sinal, porém transmitido pelo dispositivo transmissor FM e captado por um receptor FM comum.

O software utilizado nos dois computadores para a captura do áudio gerado pela guitarra foi o software GarageBand do Mac OS X (Figura 4.9). As amostras foram coletadas no mesmo momento, capturando o mesmo sinal que saía do instrumento. Não foi aplicado qualquer tipo de filtro ou efeito no sinal gravado no momento da gravação pelo GarageBand. Após a gravação os arquivos são exportados em formato Lossless (aif).

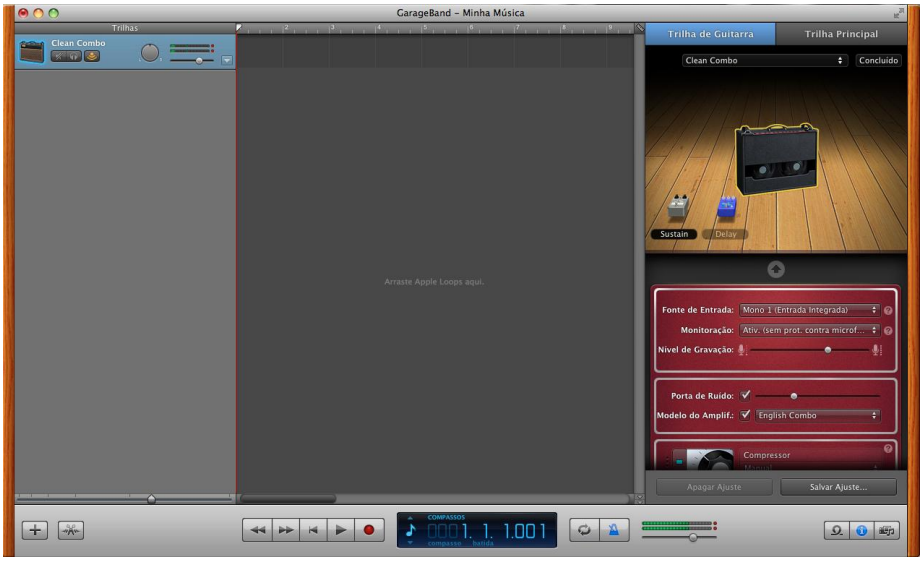


Figura 4.9 - GarageBand

Fonte: (Autor)

c) Manipulação das gravações:

Os arquivos de áudio então são importados e manipulados no software Audacity para separar corretamente as amostras. No Audacity também é verificada a

sincronização dos áudios gravados em FM com os gravados via cabo, para uma melhor análise posterior.

A figura 4.10 mostra apenas a tela principal do Audacity, os sinais na figura são apenas algumas amostras.

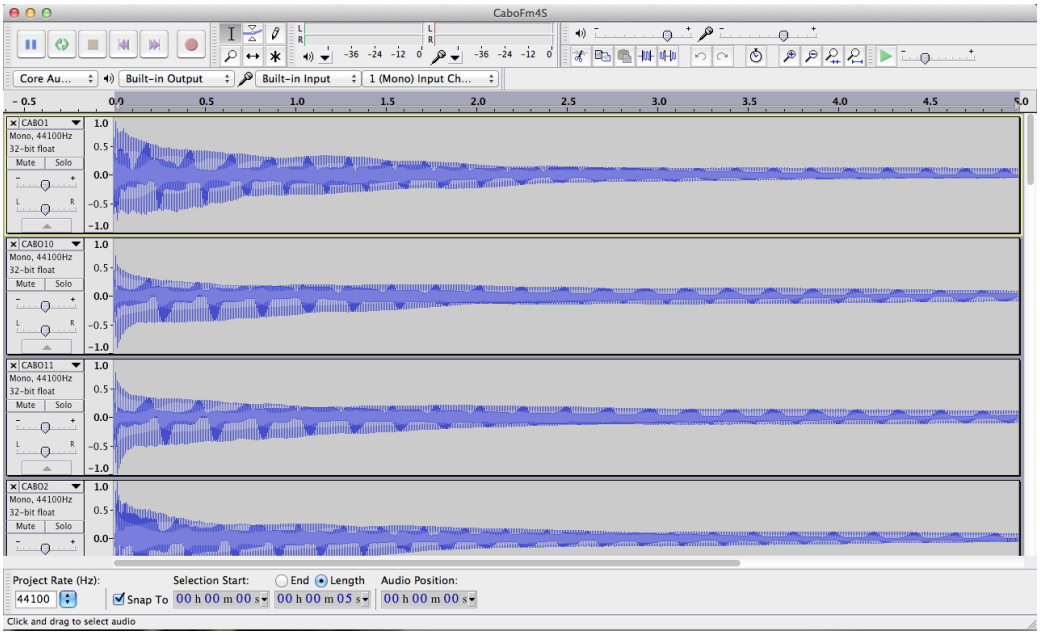


Figura 4.10 - Manipulação no Audacity

Fonte: (Autor)

São salvos 10 arquivos para cada tipo de transmissão. As amostras da transmissão via cabo são salvas com os nomes: “CABO1.wav, CABO2.wav, CABO3.wav, CABO4.wav, CABO5.wav, CABO6.wav, CABO7.wav, CABO8.wav, CABO9.wav e CABO10.wav”. E as amostras da transmissão via FM são salvas com os nomes: “FM1.wav, FM2.wav, FM3.wav, FM4.wav, FM5.wav, FM6.wav, FM7.wav, FM8.wav, FM9.wav e FM10.wav“

4.3 Desenvolvimento das ferramentas para análise.

Para serem realizadas as análises são desenvolvidos códigos no software MatLab que retornam os gráficos e valores necessários.

Primeiramente é feita uma análise das primeiras amostras CABO1 e FM1 para definir os métodos de análise posteriores. Dois códigos foram desenvolvidos a partir de uma função chamada *analyze.m*. Nos apêndices A.7 e A.8 encontram-se os

códigos que geram gráficos de comparação no domínio do tempo e frequência, respectivamente, das duas primeiras amostras (CABO1.wav e FM1.wav).

A Transformada Rápida de Fourier é um dos métodos utilizados no código dos apêndices A.7 e A.8. Porém, após vários testes, foram desenvolvidas outras funções para observar o comportamento das frequências dos harmônicos, utilizando novamente a Transformada Rápida de Fourier. Os códigos com os nomes FFTCABOs.m e FFTfms.m geram gráficos do espectro de frequência de todas as amostras e encontram-se no apêndice A.1 e A.2. Nesses códigos são gerados vários espectros onde podemos facilmente identificar os harmônicos presentes em cada sinal. O primeiro código gera especificamente os espectros de todas as dez amostras transmitidas via cabo e o FFTfms.m gera os mesmos espectros para as dez amostras transmitidas via FM.

Em seguida, para ser calculada a relação Sinal Ruído, é preciso desenvolver primeiramente um filtro passa-banda. Esse filtro tem o objetivo de restringir as frequências do sinal apenas para frequências dentro da banda gerada pela guitarra, conforme explica a Figura 3.6. Usando a ferramenta Filter Design & Analysis (fdatool) do MatLab, foi gerado o filtro passa-banda como mostra a figura 4.11. Foram comparados resultados de filtros Butterworth de ordem 2, 4 e 6 para a escolha do ideal para o projeto. A Figura 4.12 mostra uma comparação entre esses filtros.

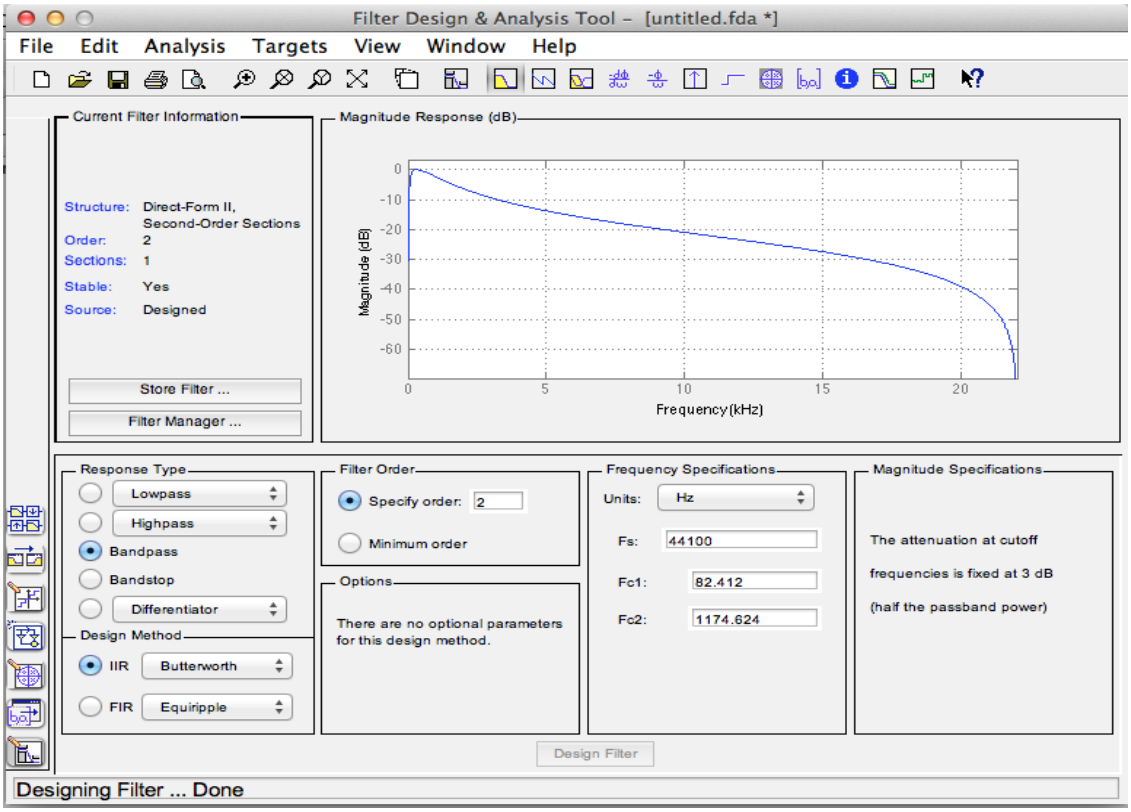


Figura 4.11 - Criação do Filtro passa-banda

Fonte: (Autor)

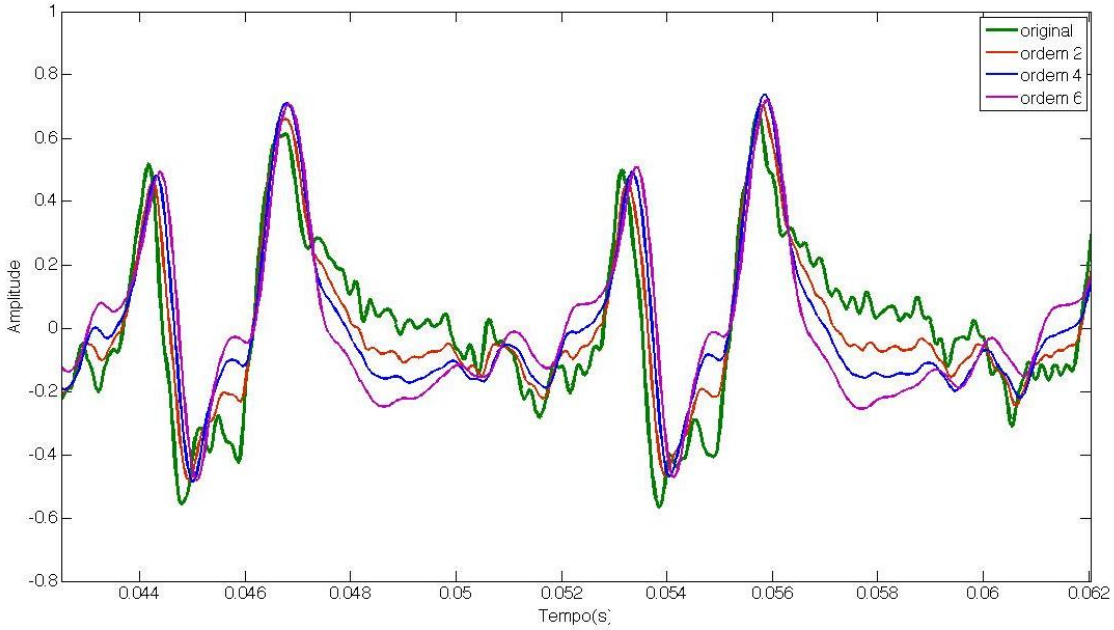


Figura 4.12 - CABO1 vs FM1 no domínio do Tempo

Fonte: (Autor)

A partir da comparação decide-se que será usado o filtro de ordem 2, a fim de não prejudicar a forma do onda do sinal no domínio do tempo.

Outro tipo de filtro utilizado para reduzir a presença de ruídos no sinal foi um filtro de média móvel chamado Smooth. A figura 4.13 a seguir mostra um sinal antes e após de passar por um tratamento de smooth.

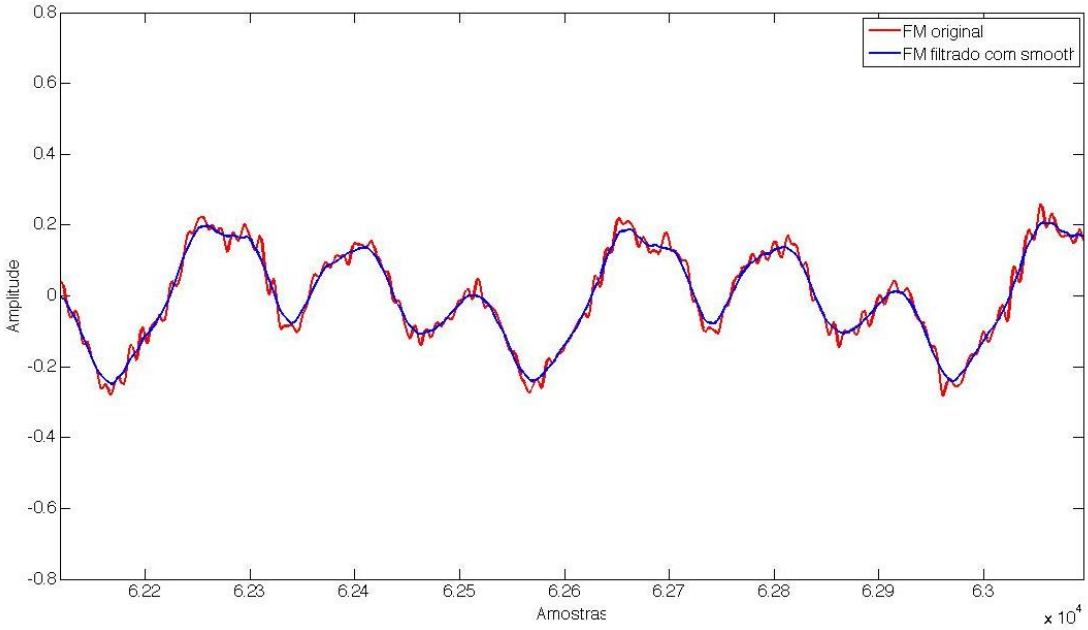


Figura 4.13 - Filtro Smooth [30]

Fonte: (Autor)

A partir da seleção desses filtros é escrito um código no software MatLab, a fim de aplicar os filtros para retirar o ruído de cada arquivo de áudio gravado e então plotar o áudio original, o áudio filtrado e o ruído extraído. Os códigos para extração do ruído nos arquivos FMn.wav e CABOn.wav podem ser encontrados nos apêndices A.5 e A.6.

Nos códigos dos apêndices A.5 e A.6 são feitas as seguintes operações:

- Armazenam-se as informações do sinal de áudio.
- Aplica-se o filtro passa banda desenvolvido com a fdatool no sinal original.
- Aplica-se o filtro smooth com parâmetro 30 no sinal filtrado anteriormente.
- Então é feita a extração do ruído diminuindo o sinal original do filtrado.
- Em seguida é feita a plotagem para a comparação dos sinais original, filtrado e o ruído.

Aproveitando os códigos dos apêndices A.5 e A.6 é escrito outro código para o cálculo da relação sinal ruído para cada amostra. Os códigos encontram-se no

apêndice A.3 e A.4. Em cada um deles é feita a filtragem dos sinais originais e a partir daí é retirado o ruído do sinal. Calcula-se então a relação sinal ruído a partir dos valores RMS do sinal original e do ruído.

4.4 Análise Inicial

Utilizando o código do apêndice A.7 (“CABO1 vs FM1 no domínio do Tempo”) foi feita uma plotagem dos sinais transmitidos via FM e via cabo. Assim podemos comparar os sinais no domínio do tempo, como mostra a Figura 4.14.

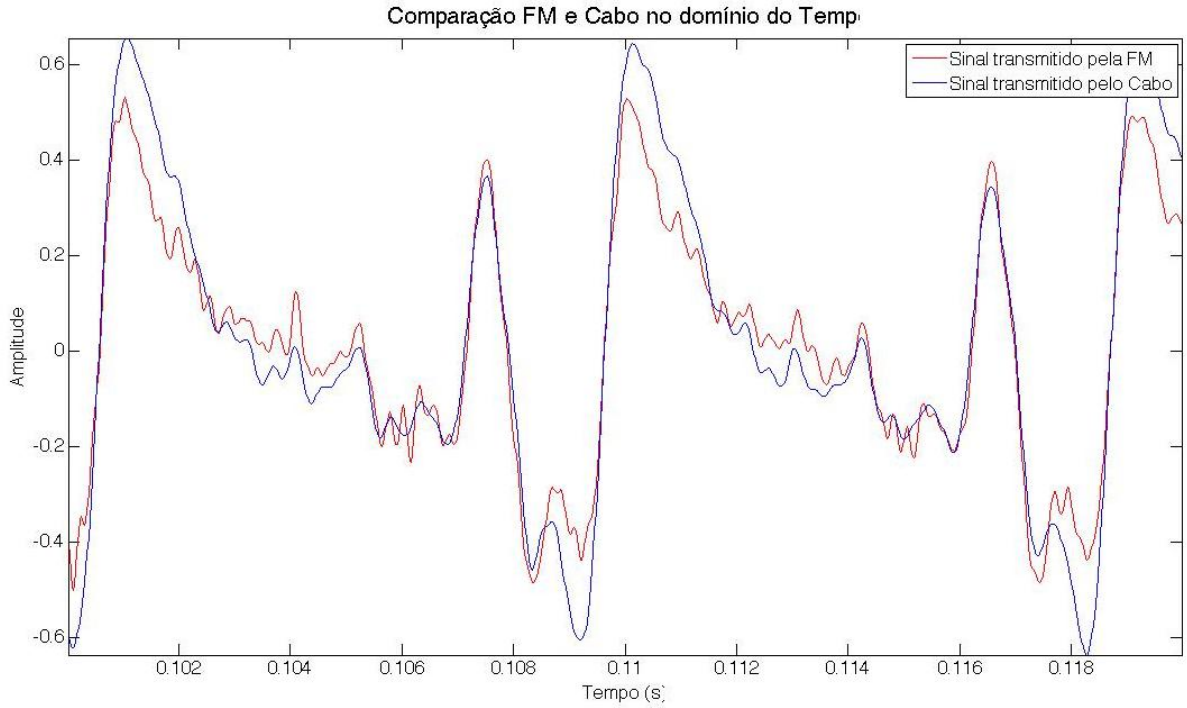


Figura 4.14 - Comparação do sinal FM com o Cabo no domínio do Tempo
Fonte: (Autor)

Observa-se na comparação que existe uma perda de amplitude no sinal em vermelho (transmitido via FM) em relação ao sinal em azul (transmitido via Cabo) . Nota-se também a clara presença de ruído na forma da onda em vermelho e que na onda em azul não se observa o ruído com tanta intensidade.

Em seguida, utilizando o código do apêndice A.8 (“CABO1 vs FM1 no domínio da Frequência”) é feita a plotagem dos sinais no domínio da frequência utilizando uma escala logarítmica no eixo Y. Pode-se observar os resultados do código na Figura 4.15.

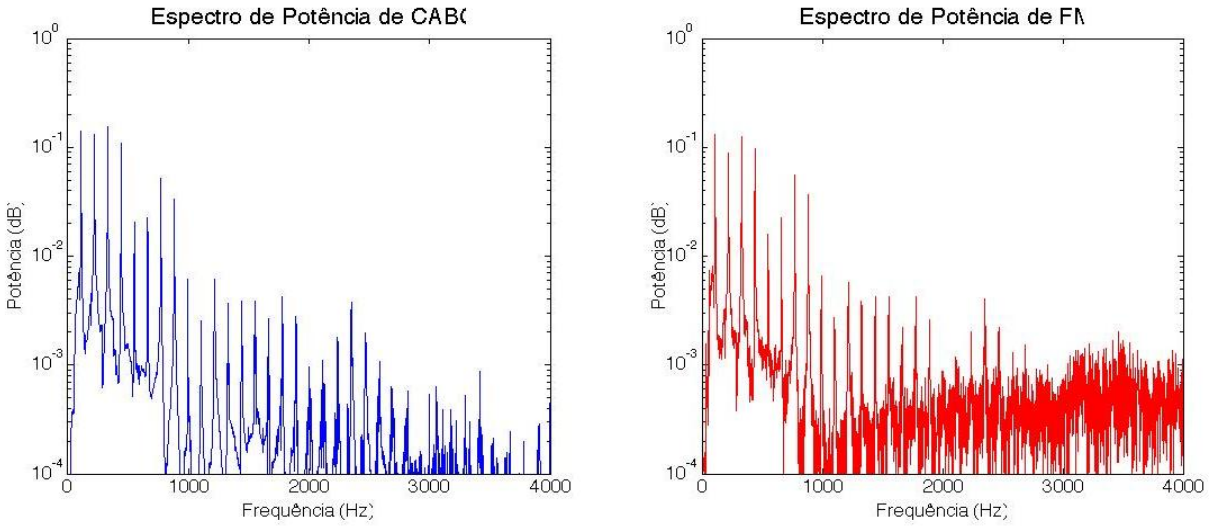


Figura 4.15 - Comparação do sinal FM com o Cabo no domínio da Frequência

Fonte: (Autor)

Observa-se na comparação no domínio da frequência que grande parte do ruído presente, tanto no sinal transmitido pela FM quanto o transmitido pelo cabo, encontra-se principalmente em frequências altas. Frequências que estão fora da banda de frequências produzida pela guitarra. A partir dessa análise podemos aplicar os filtros passa banda para retirar essas frequências indesejadas e o filtro smooth para reduzir o ruído.

Observa-se o resultado dessa aplicação de filtros na Figura 4.16. A Figura 4.16 foi obtida a partir da utilização do sinal de amostra *FM1.wav* e o sinal filtrado resultante do código do apêndice A.6 (“Filtros para retirar o Ruído no FM”) no código do apêndice A.8 (“CABO1 vs FM1 no domínio da Frequência”). Observa-se que uma parte significante do ruído foi removida do sinal.

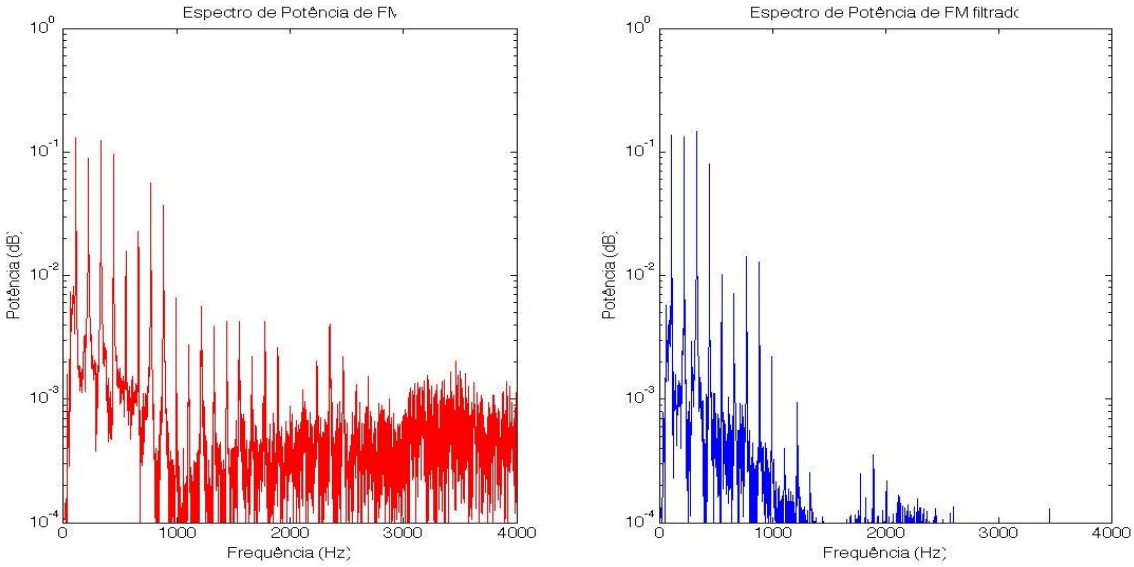


Figura 4.16 - Comparação do sinal FM com o sinal FM filtrado no domínio da Frequência.

Fonte: (Autor)

Utilizando os códigos dos apêndices A.5 e A.6, são aplicados os filtros passa banda e *smooth,* e em seguida são plotados gráficos no domínio do tempo comparando o sinal original com o sinal filtrado e o ruído. A partir dessas plotagens podemos observar novamente que o ruído é maior no sinal transmitido pela FM, como mostram as Figuras 4.17, 4.18 e em mais detalhes nas Figuras 4.19 e 4.20 a seguir.

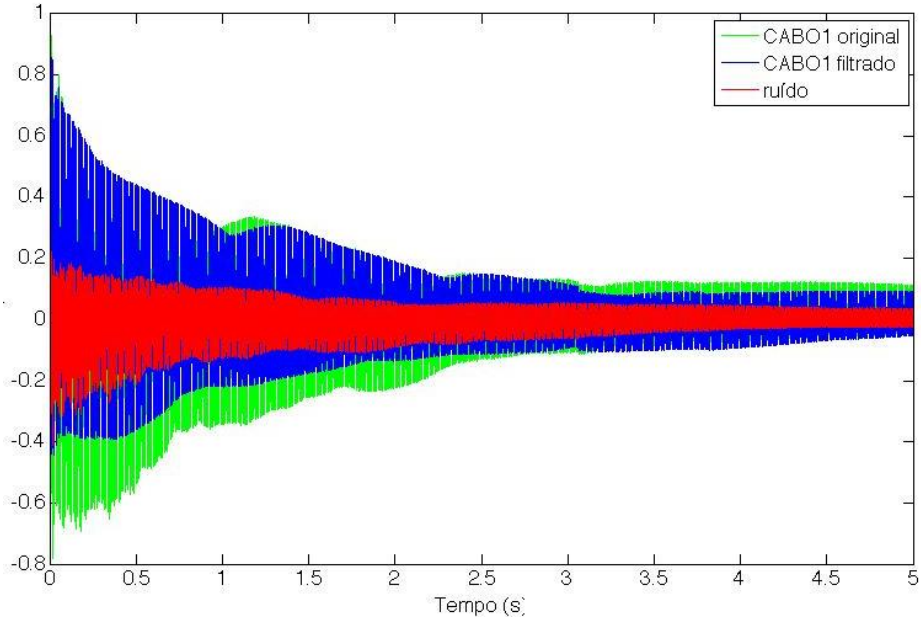


Figura 4.17 - Aplicação dos Filtros no CABO1

Fonte: (Autor)

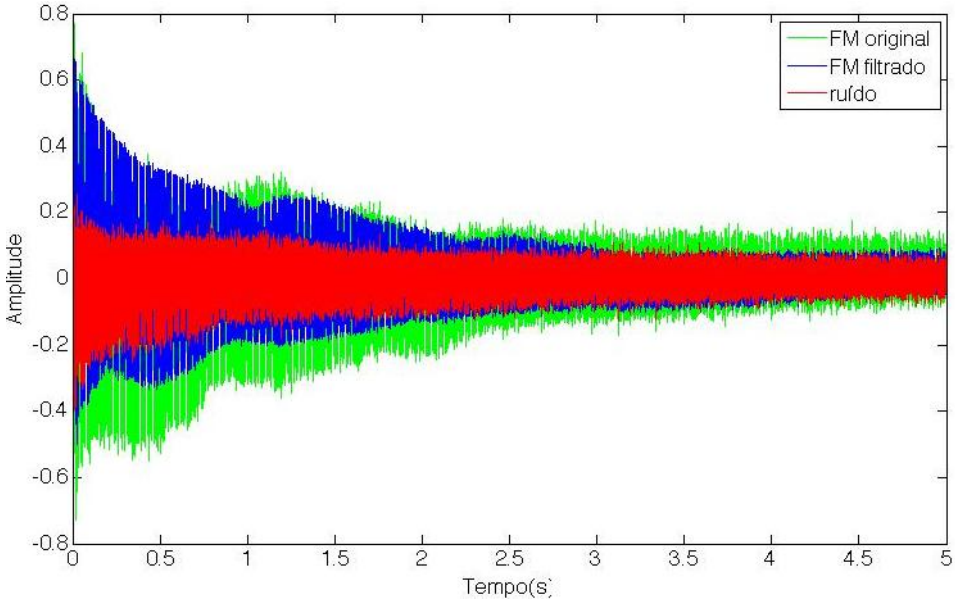


Figura 4.18 - Aplicação dos Filtros no FM1

Fonte: (Autor)

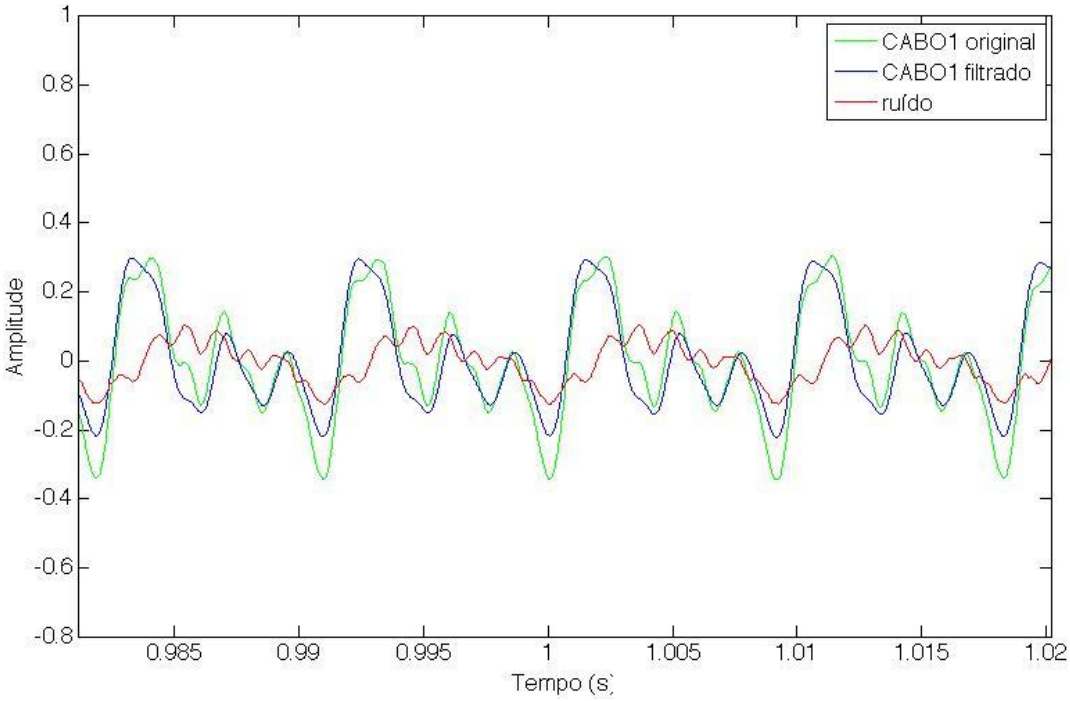


Figura 4.19 - Aplicação do Filtro no CABO1 Ampliada

Fonte: (Autor)

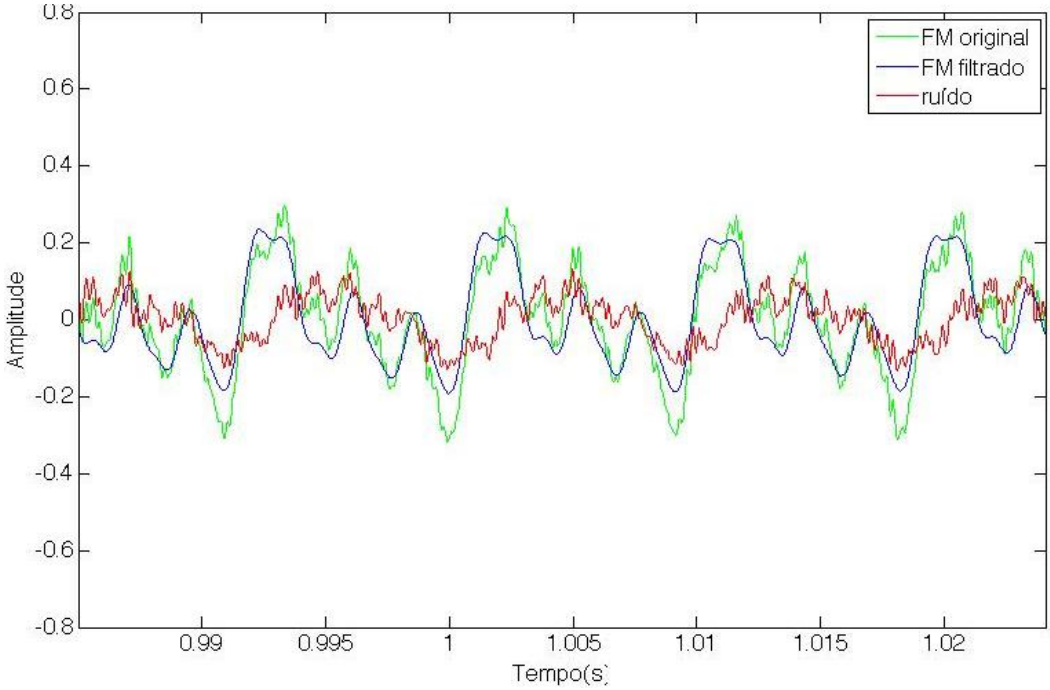


Figura 4.20 - Aplicação do Filtro no FM1 Ampliada

Fonte: (Autor)

4.5 Relação Sinal Ruído

Em seguida, para ser realizado o cálculo da relação Sinal Ruído, são utilizados os códigos que se encontram nos apêndices A.3 e A.4. Em cada código é feita a filtragem, apresentada anteriormente, em todas as amostras e a partir de cada filtragem é retirado o ruído da amostra. Calcula-se então uma aproximação da relação sinal ruído a partir dos valores RMS do sinal original e do ruído como apresentado na equação $SNR = \frac{RMS(x)}{RMS(r)}$, apresentada no capítulo 3. Os valores aproximados da relação sinal ruído para cada amostra são armazenados em um único vetor. Assim, se obtém os seguintes resultados para as amostras coletadas.

Tabela 4.3 - Relação Sinal Ruído [dB]

Amostras	CABO	FM
1	4,335	3,530
2	4,056	3,302
3	4,430	3,564
4	4,319	3,533
5	4,430	3,539
6	4,128	3,134
7	4,231	3,578
8	4,072	3,595
9	3,963	3,497
10	4,191	3,519
Média	4,216	3,479

Com os valores da tabela 4.3 é realizado o Teste t de Student para avaliar se a diferença entre as médias das duas populações a qual pertencem às amostras é significante. Aplicando conceitos e técnicas adquiridos na disciplina de estatística do curso, que já estão mencionados no Capítulo 3, obtêm-se os resultados a seguir. Primeiro é realizado o teste F para verificar se as populações são homocedásticas ou heterocedásticas. Define-se as hipóteses nula e alternativa.

$$H_0\colon \sigma^2_{CABO} = \sigma^2_{FM}$$
$$H_1\colon \sigma^2_{CABO} \neq \sigma^2_{FM}$$

Considera-se o nível de significância (α) em 2x5% e observa-se que há 9 graus de liberdade tanto para as amostras da transmissão via cabo como via FM. Calcula-se então o Fcal e o Fcrítico. Obtêm-se os valores que seguem na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Teste F

TESTE F	
Probabilidade	0,76287
Fcal	1,63696
Fcrítico	0,31457

Observa-se que Fcal > Fcrítico, ou seja, rejeita-se a Hipótese nula. Assim, as populações são Heterocedásticas. Com esse resultado pode ser inciada a execução do teste T. Como observado anteriormente, definimos as Hipóteses nula e alternativa.

$$H_0: \mu_{CABO} = \mu_{FM}$$
$$H_1: \mu_{CABO} \neq \mu_{FM}$$

Ainda considera-se o nível de significância (α) em 5%. Porém, considera-se $n_{CABO} + n_{FM} - 2$ graus de liberdade no teste t, ou seja, 18. Calcula-se então o Fcal e o Fcrítico. Obtêm-se assim os valores que seguem na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Teste T

TESTE T	
Probabilidade	3,53938E-09
Tcal	10,61460
Tcrítico	2,10092

Observa-se que Tcal > Tcrítico, ou seja, rejeita-se a Hipótese das médias das populações serem iguais com 5% de significância. Isso significa que o teste é significante, ou seja, a transmissão via cabo tem em média relação sinal ruído maior que a transmissão FM. Isso comprova que a transmissão sem fio é menos eficiente que a transmissão por cabo.

4.6 Análise dos Harmônicos

Com o uso dos programas presentes nos apêndices A.1 e A.2 são gerados vários espectros de frequência onde se observam os harmônicos presentes em cada sinal. O programa FFTCABOs.m (apêndice A.1), gera especificamente os espectros de todas as dez amostras transmitidas via cabo e o FFTfms.m (apêndice A.2) gera os mesmos espectros para as dez amostras transmitidas via meio sem fio. Utilizando a ferramenta *Datatip* do MatLab podemos identificar as coordenadas de cada pico dos harmônicos. Os gráficos de todos os vinte espectros podem ser encontrados nos apêndices de A.9 até A.29. Anotando os valores das frequências de cada harmônico são geradas as tabelas 4.6 e 4.7. E com base nesses valores foram calculados os valores de média e desvio padrão para cada harmônico.

Tabela 4.6 - Harmônicos da Corda Lá transmitidos pelo cabo. (Hz)

Harmônico	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CABO1	109,6	219,6	329,6	439,8	549,8	660,4	771,2	881,8	991,6
CABO2	109,8	219,8	329,8	440,2	550,2	662	772,6	881,6	993,4
CABO3	109,8	219,8	329,6	439,6	549,4	663	774	885,6	995
CABO4	109,8	219,8	329,8	440,2	549,6	663,2	774,6	885,6	994,8
CABO5	109,8	219,8	330,2	440,6	549,6	661,6	772,8	884	993,8
CABO6	109,8	219,8	329,6	439,8	549,6	660,2	771,2	880,2	991,6
CABO7	109,8	219,8	329,6	439,8	549,6	661,8	770,8	883,6	995,4
CABO8	110	220	330	440,3	550,2	661	773,4	884,2	995,6
CABO9	110	220	330	440,6	551	662,4	774	884,8	996,6
CABO10	110	220	330	440,2	551,2	661,6	772,6	884,2	994
Média	109,84	219,84	329,82	440,11	550,02	661,72	772,72	883,56	994,18
Desvio Padrão	0,1265	0,1265	0,2201	0,3479	0,6286	0,9987	1,3172	1,7983	1,6505

Tabela 4.7 - Harmônicos da Corda Lá transmitidos pela FM. (Hz)

Harmônico	1	2	3	4	5	6	7	8	9
FM1	109,6	219,6	329,6	439,8	549,6	660,4	771,2	881,8	992
FM2	109,8	219,8	330	440	550,2	662,2	772,8	881,6	993,4
FM3	109,8	219,8	329,6	439,6	549,4	663	774	885,6	997,6
FM4	109,8	219,8	329,8	440,2	551,4	663,2	771,4	885,8	992
FM5	109,8	219,8	330,2	440,6	549,6	661,8	773	884,2	993,8
FM6	109,8	219,8	329,6	439,8	549,6	660,2	771	880,8	992
FM7	109,8	219,8	330,2	439,8	549,6	661,8	772,8	883,6	994,6
FM8	110	220	330	440,2	551,4	662,2	773,4	884,2	996
FM9	110	220	330,8	441,2	551,6	662,6	772,4	884,8	996,6
FM10	110	220,2	330,4	440,2	551,4	661,6	772,8	884,2	994
Média	109,84	219,86	330,02	440,14	550,38	661,9	772,48	883,66	994,2
Desvio Padrão	0,1265	0,1647	0,3938	0,4719	0,9449	0,9899	0,9852	1,7128	2,0022

Observa-se que as frequências dos harmônicos da corda sofrem uma maior variação dos seus valores conforme vão aumentando as ordens dos harmônicos. Os harmônicos a partir do quinto são os que apresentam maior desvio tanto na transmissão por cabo como na sem fio. Contudo, não se observam grandes diferenças nas variações de frequências entre as transmissões. Nesse aspecto a transmissão por meio sem fio não é significantemente prejudicial.

Então é feita a importação de todas as amostras originais para o Audacity. E no programa, para visualizar os harmônicos, utilizamos a ferramenta Plot Spectrum que está ilustrada nas figuras 4.21 e 4.22.

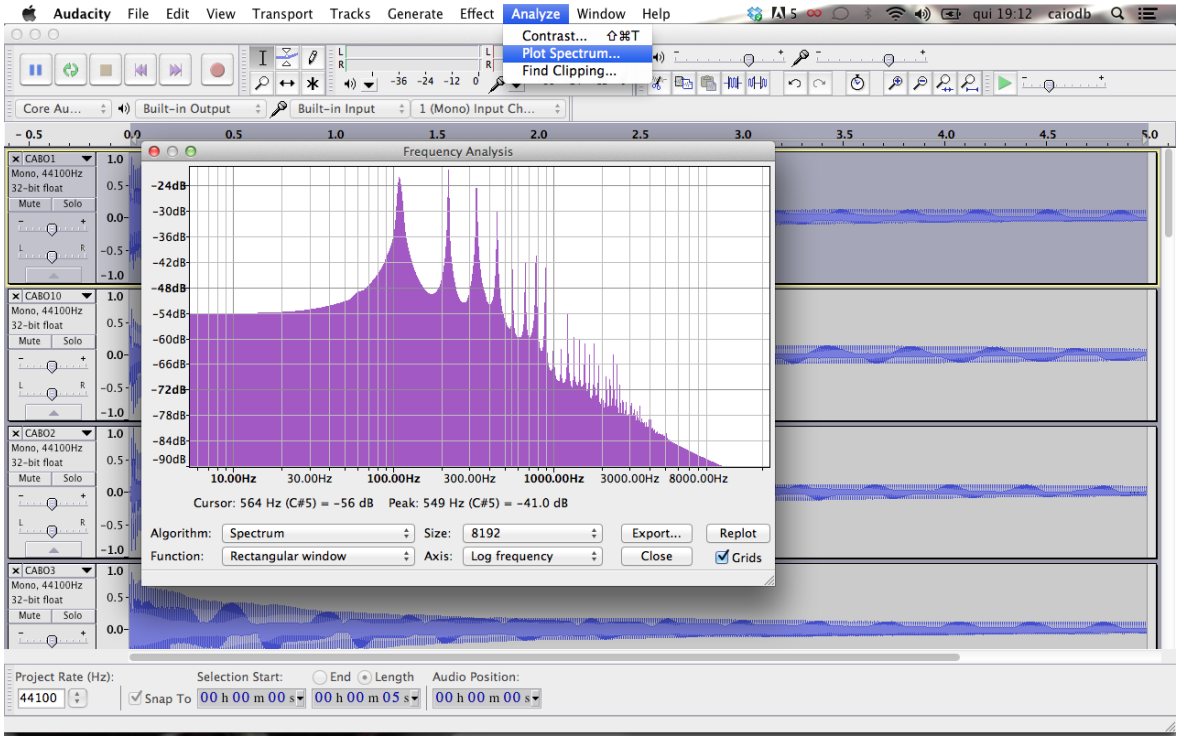


Figura 4.21 - Análise de Frequências pelo Audacity 1

Fonte: (Autor)

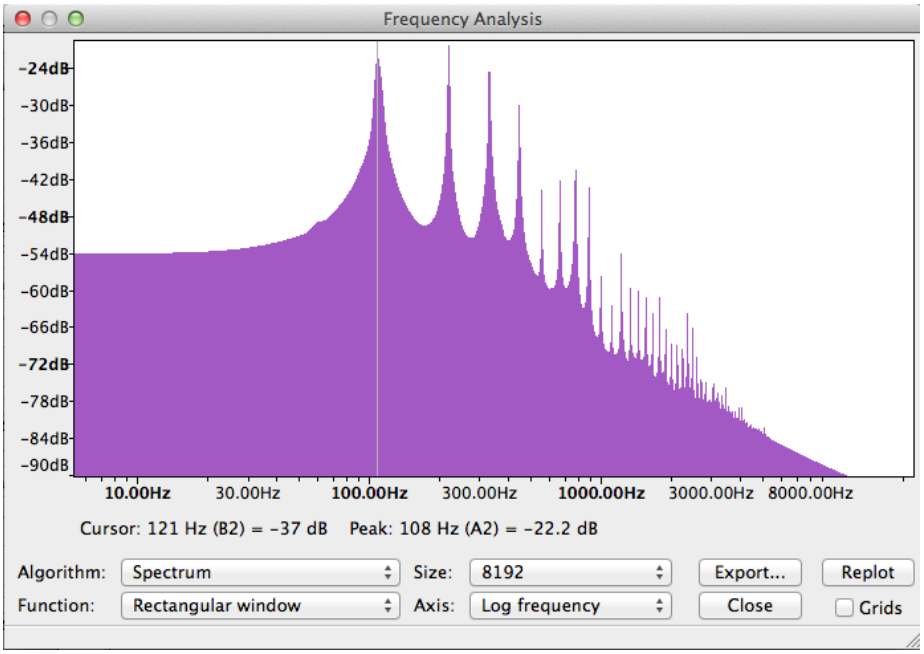


Figura 4.22 - Análise de Frequências pelo Audacity 2

Fonte: (Autor)

Com o uso da ferramenta de análise de frequências, mostrada na figura 4.21, é feita a coleta dos valores das intensidades dos harmônicos e estão são organizados nas tabelas 4.8 e 4.9 a seguir.

Tabela 4.8 - Intensidades dos Harmônicos da Corda Lá transmitidos pelo Cabo. (dB)

Harmônico	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CABO1	-22.20	-19.00	-21.60	-25.50	-41.00	-37.40	-32.50	-33.70	-52.20
CABO2	-23.20	-20.90	-24.20	-23.70	-44.50	-35.80	-30.60	-35.50	-50.30
CABO3	-23.30	-20.00	-22.40	-27.00	-45.60	-38.10	-31.50	-37.30	-52.70
CABO4	-22.30	-18.90	-22.60	-24.90	-44.70	-35.40	-30.50	-37.30	-53.40
CABO5	-25.80	-22.80	-23.90	-24.00	-46.90	-34.10	-31.30	-37.20	-50.90
CABO6	-25.70	-23.60	-27.00	-29.40	-45.40	-37.50	-41.10	-52.70	-59.70
CABO7	-23.50	-19.40	-24.80	-24.40	-45.20	-34.40	-32.70	-37.00	-51.80
CABO8	-22.20	-19.90	-24.20	-24.40	-46.10	-36.20	-35.30	-42.20	-52.90
CABO9	-21.20	-19.20	-24.30	-25.80	-44.90	-46.40	-41.40	-43.70	-53.10
CABO10	-23.40	-20.50	-25.30	-27.00	-45.30	-45.60	-39.50	-40.80	-51.80
Média	-23.28	-20.42	-24.03	-25.61	-44.96	-38.09	-34.64	-39.74	-52.88

Tabela 4.9 - Intensidades dos Harmônicos da Corda Lá transmitidos pela FM. (dB)

Harmônico	1	2	3	4	5	6	7	8	9
FM1	-22.30	-22.40	-23.60	-26.40	-41.80	-37.10	-31.40	-32.80	-51.40
FM2	-23.10	-24.00	-25.90	-24.10	-45.10	-35.50	-29.50	-34.40	-49.60
FM3	-23.30	-23.40	-24.20	-27.70	-44.40	-36.40	-30.50	-36.10	-52.50
FM4	-22.40	-22.20	-24.50	-25.50	-43.40	-34.10	-29.40	-36.20	-52.50
FM5	-25.80	-26.10	-25.70	-24.60	-49.30	-33.70	-30.10	-36.10	-50.20
FM6	-25.50	-26.80	-28.80	-29.90	-48.70	-37.10	-40.20	-52.90	-58.60
FM7	-22.40	-19.60	-24.50	-22.80	-44.10	-31.40	-29.30	-35.50	-49.10
FM8	-21.00	-19.90	-23.50	-22.60	-43.70	-33.00	-31.50	-38.30	-49.40
FM9	-19.90	-19.10	-23.30	-24.20	-42.50	-41.90	-37.40	-39.70	-49.80
FM10	-22.30	-20.60	-24.80	-25.50	-45.80	-44.80	-35.90	-37.60	-48.80
Média	-22.80	-22.41	-24.88	-25.33	-44.88	-36.50	-32.52	-37.96	-51.19

Nota-se que apenas nos segundos e terceiros harmônicos a média da intensidade nas amostras do cabo é menor que a média das amostras FM. Porém, observa-se que não há grande diferença nas médias dos valores dos harmônicos.

4.7 Avaliação Global do Modelo

A aplicação do modelo de transmissão utilizando o transmissor sem fio automotivo apresentou algumas dificuldades.

A interferência de estações de rádio na transmissão é uma das principais dificuldades da utilização do transmissor. Na fase de gravações das amostras tentei realizar as gravações em um escritório perto do centro de Brasília. Era um quarto fechado, mas não um estúdio próprio para gravação profissional. Nesta tentativa não foi possível realizar as gravações devido à quantidade de interferências no sinal. Portanto uma das limitações do transmissor FM é o local de utilização, obtive uma transmissão mais limpa quando as gravações foram realizadas em locais mais afastados do centro da cidade.

Com a utilização dos filtros (passa-banda e smooth) foi possível realizar o cálculo da relação sinal/ruído para as amostras e foi possível observar que todos os resultados para a transmissão que usa meio guiado foram maiores do que via ondas eletromagnéticas. Caracterizando uma melhor qualidade no sinal transmitido pelo cabo. Outra análise importante é a dos harmônicos, pois são eles que caracterizam o som do instrumento, o seu timbre. Conclui-se que não houve alteração significante nos principais harmônicos das amostras. Porém, como visto nas primeiras análises,

existe ruído em frequências mais altas do som. O ruído é evidente nas amostras da transmissão que utiliza meio sem fio.

Com o trabalho realizado foi possível analisar o comportamento dos ruídos na transmissão FM, claramente presente nas frequências mais altas do sinal transmitido e as possíveis interferências que esse sinal pode sofrer.

CAPÍTULO 5 - ANÁLISES E CONCLUSÃO

Nesse capítulo é feita uma conclusão a respeito da utilização do transmissor e são sugeridas outras pesquisas a respeito do assunto.

5.1 Conclusões

Observa-se no ato das gravações, que ao tentar utilizar o transmissor em locais abertos e próximos a grandes centros foram detectadas interferências de rádios comerciais, visto que a frequência de transmissão do transmissor utilizado está dentro da banda FM comercial de rádio.

O áudio gerado na guitarra e transmitido por meio do transmissor FM automotivo sofre visíveis degradações. Se comparado com a transmissão por cabo nota-se a clara diferença de qualidade. Ao escutar ambas as amostras, cabo e FM, é possível ouvir claramente um ruído adicional no arquivo originado na transmissão sem fio. Ao gerar os gráficos dos sinais no domínio do tempo, observamos que há uma diminuição na amplitude do sinal. Tal atenuação pode ser justificada pela perda no espaço livre.

Com o uso da FFT nos sinais amostrados foi possível observar que grande parte do ruído na amostra de FM se concentra nas maiores frequências do sinal, principalmente frequências que a guitarra por si só não produz. Ainda com o uso da Transformada Rápida de Fourier foi possível obter dados sobre os harmônicos dos sinais. Assim, ao analisar os harmônicos, conclui-se que os mesmos não sofrem grandes alterações de um meio de transmissão para o outro.

O filtro de Butterworth combinado com o filtro de smooth obteve bons resultados na filtragem desse ruído, ainda que não tenha sido possível a total remoção do ruído. Os valores das médias da relação sinal ruído das amostras transmitidas por fio e sem fio de respectivamente 4,216 dB e 3,479 dB mostram que a presença de ruídos é maior nas amostras transmitidas pela FM. O teste t de student com os valores estimados das relações sinal ruído confirmaram que em geral, o sinal original está mais forte, em relação ao ruído, nas amostras CABO do que nas amostras FM. Assim, vemos que a maior parte da degradação do sinal está definitivamente na perda de amplitude, interferência de outras fontes e na presença de ruído na transmissão.

Foram atingidos os objetivos do projeto. A partir da gravação das amostras e análise das mesmas observou-se a degradação que sofre o sinal quando transmitido

por meio sem fio. Comparando os meios de transmissão via meio guiado e sem fio nota-se a diferença de qualidade do sinal.

É indicado o uso do transmissor sem fio apenas em locais fechados, preferencialmente em estúdios e é preferido que esses locais estejam em regiões afastadas de antenas de transmissão de rádio e grandes centros. Não existe grande degradação no sinal a ponto de ser inutilizado, porém essa alternativa de transmissão sem fio para guitarras não é indicada para substituir completamente o cabo convencional.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir do trabalho realizado nesse projeto e seus resultados, outras pesquisas no mesmo ramo podem ser desenvolvidas. Aproveitando a utilização do transmissor FM automotivo podem ser desenvolvidos filtros para retirar o ruído proveniente da transmissão. Além disso, como a utilização do transmissor FM com a guitarra não foi satisfatória em comparação ao cabo, podem ser feitas pesquisas e comparações, similares às utilizadas no projeto, de um transmissor UHF profissional para instrumentos musicais, com o cabo e verificar assim se o transmissor profissional não degrada o sinal a ponto de entregar um sinal não fiel.

Podem ser realizados trabalhos para verificar outros métodos de modulação do sinal, a fim de obter uma transmissão sem ruídos, porém sempre observando o delay da transmissão. Outro aspecto importante na transmissão que pode ser melhorado é a faixa de frequências que a transmissão trabalha. Sugiro pesquisas para determinar quais faixas de frequências são mais recomendadas para esse tipo de transmissão além das faixas já abordadas no projeto.

GLOSSÁRIO

Harmônicos – Diz-se do fenômeno periódico cuja freqüência é um múltiplo inteiro da freqüência de outro.

Banda – Corresponde à faixa de frequências ocupada pelo sinal modulado.

Bobina – Agrupamento de espiras de um condutor elétrico, enroladas em torno de um suporte ou de um núcleo de material ferromagnético, e que, num circuito, funciona como indutor.

Transmissor – É um dispositivo eletrônico que, com a ajuda de uma antena, propaga um sinal eletromagnético, podendo ser de rádio, televisão e outros.

Receptor – Dispositivo que recebe a informação enviada pelo transmissor e a decodifica, isto é, transforma os impulsos físicos (sinais) em mensagem recuperada.

Amostra – Subconjunto de uma população por meio do qual se estabelecem ou estimam as propriedades e características dessa população.

Interface – Dispositivo físico ou lógico que faz a adaptação entre dois sistemas.

REFERÊNCIAS

Banda Sinfônica do CSVP. (2005). *Instrumentos de Corda*. Acesso em 08 de 10 de 2012, disponível em http://www.csvp.com.br/banda/instrumentos_cordas.asp

Barúqui, F. A. (2012). *Eletrônica IV.* Acesso em 6 de novembro de 2012, disponível em http://www.pads.ufrj.br/~fbaruqui/

Brain, M. (25 de abril de 2008). *Como Funcionam as guitarras elétricas.* Acesso em 10 de 10 de 2012, disponível em HowStuffWorks: http://lazer.hsw.uol.com.br/guitarras-eletricas.htm

Campos, S. (2002). *O que é modulaçâo e que módulos são utilizados.* Acesso em 14 de 10 de 2012, disponível em http://www.sarmento.eng.br/Modulacao.htm

Departamento Acadêmico de Eletrônica UTFPR. (2007). *Modulação FM.* Acesso em 13 de outubro de 2012, disponível em http://old.daeln.ct.utfpr.edu.br/arquivos/objetivo_05_-_modulacao_fm.pdf

Departamento acadêmico de Eletrônica UTFPR. (2007). *Objetivo 5 Modulação FM.* Acesso em 14 de outubro de 2012, disponível em http://old.daeln.ct.utfpr.edu.br/arquivos/objetivo_05_-_modulacao_fm.pdf

Departamento de Física CCEN - Universidade Federal da Paraíba. (s.d.). *Estudo Dirigido de Física.* Acesso em 08 de outubro de 2012, disponível em http://www.fisica.ufpb.br/~mkyotoku/texto/texto2.htm

Estúdio 57. (s.d.). *Estúdio 57*. Acesso em 6 de 11 de 2012, disponível em http://www.estudio57sp.com/#!/inicio

Ferreira, S. A. (Dezembro de 2006). Sistema Especialista Para Reconhecimento de Acordes Musicais Em Tempo Real Para Violão Elétrico Utilizando Técnicas De DSP. Salvador, Bahia.

Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (1998). *The Physics of Musical Instruments.* Springer.

Gomes, A. T. (2004). *Telecomunicações: Transmissão e Recepção; AM-FM; Sistemas Pulsados.* São Paulo: Érica.

Haykin, S., & Veen, B. V. (2001). *Sinais e Sistemas.* Porto Alegre: Bookman.

Heyerdahl, G. (23 de Fevereiro de 2012). *Whiplash.net*. Acesso em 3 de outubro de 2012, disponível em http://whiplash.net/materias/biografias/148942.html

Holmes, D. S., & Mergen, A. E. (2007). Signal to Noise Ratio-What is the Right Size? *Quality Magazine*, 1-6.

Janeczko, C. (2009). *Filtros Digitais.* Acesso em 23 de 10 de 2012, disponível em Filtros Digitais: http://www.pessoal.utfpr.edu.br/janeczko/index_files/pds/capitulo6.pdf

Klein, F. A. (2012). *Teste de Hipóteses.* Brasília.

Leite, B., & Marques, M. (26 de Dezembro de 2005). *Sistemas de Rádio.* Acesso em 15 de novembro de 2012, disponível em Kit didático de Recepção e Transmissão FM: http://radiofonia.com.sapo.pt/Sistemas_radio.html

LOGJAM ELETRONICS. (2012). *FM Transmitters: How They Work & Why They're So Bad!* Acesso em 25 de 10 de 2012, disponível em LOGJAM ELETRONICS: http://www.logjamelectronics.com/fmtransmitters.html

Miyoshi, E. M., & Sanches, C. A. (2002). *Projetos de sistemas rádio.* São Paulo: Érica.

Ogasawara, A. (abril de 2008). *Reconhecedor de Notas Musicais em Sons Polifônicos.* Acesso em 13 de 10 de 2012, disponível em http://www02.lps.ufrj.br/~sergioln/theses/bsc18angelica.pdf

Olazábal, T. (1993). *Acústica Musical y Organología.* Buenos Aires: Ricordi.

Orta, E. S. (4 de Julho de 2012). *Musica Sacra e Adoração.* Acesso em 6 de 11 de 2012, disponível em Matemática na Música: http://musicaeadoracao.com.br/25406/matematica-na-musica-capitulo-3/

RMS Rehearsal Studios. (s.d.). *RMS Rehearsal Studios*. Acesso em 06 de 11 de 2012, disponível em RMS Rehearsal Studios: http://www.rmsstudios.co.uk/index.html

TechTerms. (30 de Dezembro de 2011). *TechTerms.com.* Acesso em 25 de outubro de 2012, disponível em TechTerms.com: http://www.techterms.com/definition/aiff

Ultimate-Guitar.com. (27 de outubro de 2011). *Ultimate-Guitar.com.* Acesso em 20 de outubro de 2012, disponível em Ultimate-Guitar.com: http://www.ultimate-guitar.com/columns/general_music/the_audible_frequency_range_and_describing_tone.html

Wikipedia. (24 de agosto de 2012). *Humbucker.* Acesso em 10 de setembro de 2012, disponível em Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Humbucker

Wikipedia. (11 de novembro de 2012). *Wikipedia*. Acesso em 15 de novembro de 2012, disponível em Rádios do Brasil: http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_de_r%C3%A1dios_do_Brasil

Wikipedia. (s.d.). *Guitarra Clássica*. Acesso em 8 de 10 de 2012, disponível em Wikipedia: http://pt.wikipedia.org/wiki/Guitarra_cl%C3%A1ssica

Wilson, S. (20 de Janeiro de 2003). *Stanford's Center for Computer Research in Music and Acoustics.* Acesso em 20 de 10 de 2012, disponível em Stanford's Center for Computer Research in Music and Acoustics: https://ccrma.stanford.edu/courses/422/projects/WaveFormat/

Ynoguti, C. (23 de agosto de 2010). *Introdução aos Filtros Digitais.* Acesso em 24 de 10 de 2012, disponível em Introdução aos Filtros Digitais: http://www.inatel.br/docentes/ynoguti/component/docman/cat_view/24-dsp

APÊNDICE A - Códigos criados no MatLab

Constam nesse apêndice os códigos desenvolvidos no software MatLab para a análise das amostras de áudio.

A.1 FFTCABOs.m

```
%FFT CABO's
for j=1:10,
switch     j %são importados as amostras de 1 até 10, uma de cada vez.
case   {1}
            [y,Fs] = wavread('CABO1');
case   {2}
            [y,Fs] = wavread('CABO2');
case   {3}
            [y,Fs] = wavread('CABO3');
case   {4}
            [y,Fs] = wavread('CABO4');
case   {5}
            [y,Fs] = wavread('CABO5');
case   {6}
            [y,Fs] = wavread('CABO6');
case   {7}
            [y,Fs] = wavread('CABO7');
case   {8}
            [y,Fs] = wavread('CABO8');
case   {9}
            [y,Fs] = wavread('CABO9');
case   {10}
            [y,Fs] = wavread('CABO10');
end
%Define os pontos da FFT como o tamanho total do sinal
Nsamps = length(y);
%Armazena os valores em módulo retornados pela FFT do sinal
y_fft = abs(fft(y));
y_fft = y_fft(1:Nsamps/2);      %Descarta metade dos pontos.
f = Fs*(0:Nsamps/2-1)/Nsamps;   %Prepara a frequência para o plot.
Figure                        %Gera um novo gráfico em uma nova janela.
plot(f, y_fft)
xlim([0 1000])
xlabel('FrequÍncia (Hz)')
ylabel('Amplitude')
switch     j
case   {1} %são escritas as legendas dos gráficos de 1 até 10, uma de cada
vez.
title( 'CABO1 no domínio da Frequência')
case   {2}
            title( 'CABO2 no domínio da Frequência')
case   {3}
            title( 'CABO3 no domínio da Frequência')
case   {4}
            title( 'CABO4 no domínio da Frequência')
case   {5}
            title( 'CABO5 no domínio da Frequência')
case   {6}
            title( 'CABO6 no domínio da Frequência')
case   {7}
```

```
            title( 'CABO7 no domínio da Frequência')
case    {8}
            title( 'CABO8 no domínio da Frequência')
case    {9}
            title( 'CABO9 no domínio da Frequência')
case    {10}
            title( 'CABO10 no domínio da Frequência')
end
end
```

A.2 FFTfms.m

```
%Transformada de Fourier das amostras FM.

for j=1:10,
switch      j %são importados as amostras de 1 até 10, uma de cada vez.
case    {1}
            [y,Fs] = wavread('FM1');
case    {2}
            [y,Fs] = wavread('FM2');
case    {3}
            [y,Fs] = wavread('FM3');
case    {4}
            [y,Fs] = wavread('FM4');
case    {5}
            [y,Fs] = wavread('FM5');
case    {6}
            [y,Fs] = wavread('FM6');
case    {7}
            [y,Fs] = wavread('FM7');
case    {8}
            [y,Fs] = wavread('FM8');
case    {9}
            [y,Fs] = wavread('FM9');
case    {10}
            [y,Fs] = wavread('FM10');
end
%Define os pontos da FFT como o tamanho total do sinal
Nsamps = length(y);
%Armazena os valores em módulo retornados pela FFT do sinal
y_fft = abs(fft(y));
y_fft = y_fft(1:Nsamps/2);       %Descarta metade dos pontos
f = Fs*(0:Nsamps/2-1)/Nsamps;    %Prepara a frequência para o plot
figure                           %Gera um novo gráfico em uma nova janela.
plot(f, y_fft)
xlim([80 1000])
xlabel('FrequÍncia (Hz)')
ylabel('Amplitude')
switch      j %são escritas as legendas dos gráficos de 1 até 10, uma de
cada vez.
case    {1}
            title( 'FM1 no domínio da Frequência')
case    {2}
            title( 'FM2 no domínio da Frequência')
case    {3}
            title( 'FM3 no domínio da Frequência')
case    {4}
```

```
            title( 'FM4 no domínio da Frequência')
case   {5}
            title( 'FM5 no domínio da Frequência')
case   {6}
            title( 'FM6 no domínio da Frequência')
case   {7}
            title( 'FM7 no domínio da Frequência')
case   {8}
            title( 'FM8 no domínio da Frequência')
case   {9}
            title( 'FM9 no domínio da Frequência')
case   {10}
            title( 'FM10 no domínio da Frequência')
end
end
```

A.3 SNR_todos_cabo.m

```
%SNR_todos_cabo
for j=1:10, %são importados as amostras de 1 até 10, uma de cada vez.
switch     j
case   {1}
            CABO = wavread('CABO1');
case   {2}
            CABO = wavread('CABO2');
case   {3}
CABO = wavread('CABO3');
case   {4}
            CABO = wavread('CABO4');
case   {5}
            CABO = wavread('CABO5');
case   {6}
CABO = wavread('CABO6');
case   {7}
            CABO = wavread('CABO7');
case   {8}
            CABO = wavread('CABO8');
case   {9}
CABO = wavread('CABO9');
case   {10}
            CABO = wavread('CABO10');
End
%Aplicar-se o filtro passa banda desenvolvido com auxílio da fdatool.
filtrado = filter (filtro_pbanda, CABO);
%Aplica-se o filtro smooth.
filtrado2 = smooth (filtrado(:),30);
%é extraÌdo o ruído diminuindo o sinal original do filtrado.
ruido = CABO - filtrado2;
%calcula-se o valor RMS do sinal cabo
RMScabo = sqrt (mean(CABO.^2));
%calcula-se o valor RMS do ruído
RMSruido = sqrt (mean(ruido.^2));
%calcula-se a relação sinal/ruído
SNRcabo = (RMScabo/ RMSruido);
%resultados são armazenado em um vetor.
SNRcabos(j) = 10*log10(SNRcabo)
end
```

A.4 SNR_todos_fm.m

```
%SNR_todos_fm
for j=1:10,


switch     j
case   {1}
            FM = wavread('FM1');
case   {2}
            FM = wavread('FM2');
case   {3}
            FM = wavread('FM3');
case   {4}
            FM = wavread('FM4');
case   {5}
            FM = wavread('FM5');
case   {6}
            FM = wavread('FM6');
case   {7}
            FM = wavread('FM7');
case   {8}
            FM = wavread('FM8');
case   {9}
            FM = wavread('FM9');
case   {10}
FM = wavread('FM10');


end


%Aplicar-se o filtro passa banda desenvolvido com auxílio da fdatool.
filtrado3 = filter (filtro_pbanda, FM);
%Aplica-se o filtro smooth.
filtrado4 = smooth (filtrado3(:),30);
%é extraÌdo o ruído diminuindo o sinal original do filtrado.
ruido = FM - filtrado4;
%calcula-se o valor RMS do sinal fm
RMSfm = sqrt (mean(FM.^2));
%calcula-se o valor RMS do ruído
RMSruido = sqrt (mean(ruido.^2));
%calcula-se a relação sinal/ruído
SNRfm = (RMSfm/ RMSruido);
%resultados são armazenado em um vetor.
SNRfms(j) = 10*log10(SNRfm)

end
```

A.5 Filtros para retirar o Ruído no CABO

```
%Função com filtro para retirar o ruído.

%Armazenar as informações do audio.
CABO1 = wavread('CABO1');

%Aplicar-se o filtro passa banda desenvolvido com auxílio da fdatool.
filtrado21 = filter (filtro_pbanda, CABO1);

%Aplica-se o filtro smooth.
filtrado22 = smooth (filtrado21(:),30);

%é extraído o ruído diminuindo o sinal original do filtrado.
ruido = CABO1 - filtrado22;

%Define-se a frequência de amostragem em 44100 amostras por segundo.
Fs = 44100;

%Por fim, define-se o tempo em segundos total do sinal.
t = (1:length(CABO1))/Fs;

%plota no mesmo gráfico o sinal original, o filtrado e o ruído.
%inclui-se o t em cada plot para o eixo x ser dado em segundos e não número
%de amostras.
plot (t, CABO1,'g')
hold on
plot (t, filtrado22, 'b')
plot (t, ruido,'r')
legend ('CABO1 original','CABO1 filtrado','ruído')
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
```

A.6 Filtros para retirar o Ruído no FM

```
%Função com filtro para retirar o ruído.

%Armazenar as informações do audio em um vetor.
FM1 = wavread('FM10');

%Aplicar-se o filtro passa baixa
filtrado1 = filter (filtro_pbanda, FM1);

%Aplica-se o filtro smooth.
filtrado2 = smooth (filtrado1(:),30);

%é extraído o ruído diminuindo o sinal original do filtrado.
ruido = FM1 - filtrado2;

%Define-se a frequência de amostragem em 44100 amostras por segundo.
Fs = 44100;

%Por fim, define-se o tempo em segundos total do sinal.
t = (1:length(FM1))/Fs;
```

```
%plota no mesmo gráfico o sinal original, o filtrado e o ruído.
%inclui-se o t em cada plot para o eixo x ser dado em segundos e não número
%de amostras.
plot (t,FM1,'g')
hold on
plot (t,filtrado2, 'b')
plot (t,ruido,'r')
legend ('FM original','FM filtrado','ruído')
xlabel ('Tempo(s)')
ylabel ('Amplitude')
```

A.7 CABO1 vs FM1 no domínio do Tempo

```
function analyze2tempo
% Esse código foi escrito a partir de uma função chamada analyze.m
% (Mark R. Petersen, U. of Colorado Boulder Applied Math Dept, Feb 2004)
%
% Essa modificação tem o objetivo de plotar e comparar apenas no domínio
% do tempo.

% y recebe os dados do sinal, Fs recebe a frequência de amostragem (44100)
[y, Fs] = wavread('FM1');
t = (1:length(y))/Fs;       %define-se o tempo total da amostra

% define-se um tempo menor para a plotagem em 'zoom'
ind = find(t>0.1 & t<0.12);
%plota o t e o sinal apenas no intervalo ind
plot(t(ind),y(ind),'r')
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
hold on         %necessário para a plotagem no mesmo gráfico
axis tight

%repete-se o processo para CABO
[x, Fs] = wavread('CABO1');
t2 = (1:length(x))/Fs;
ind = find(t2>0.1 & t2<0.12);
plot(t2(ind),x(ind))
xlabel ('Tempo (s)')
ylabel ('Amplitude')
legend ('Sinal transmitido pela FM','Sinal transmitido pelo Cabo')
axis tight
title('Formato da onda de FM1 e CABO1')
```

A.8 CABO1 vs FM1 no domínio da Frequência

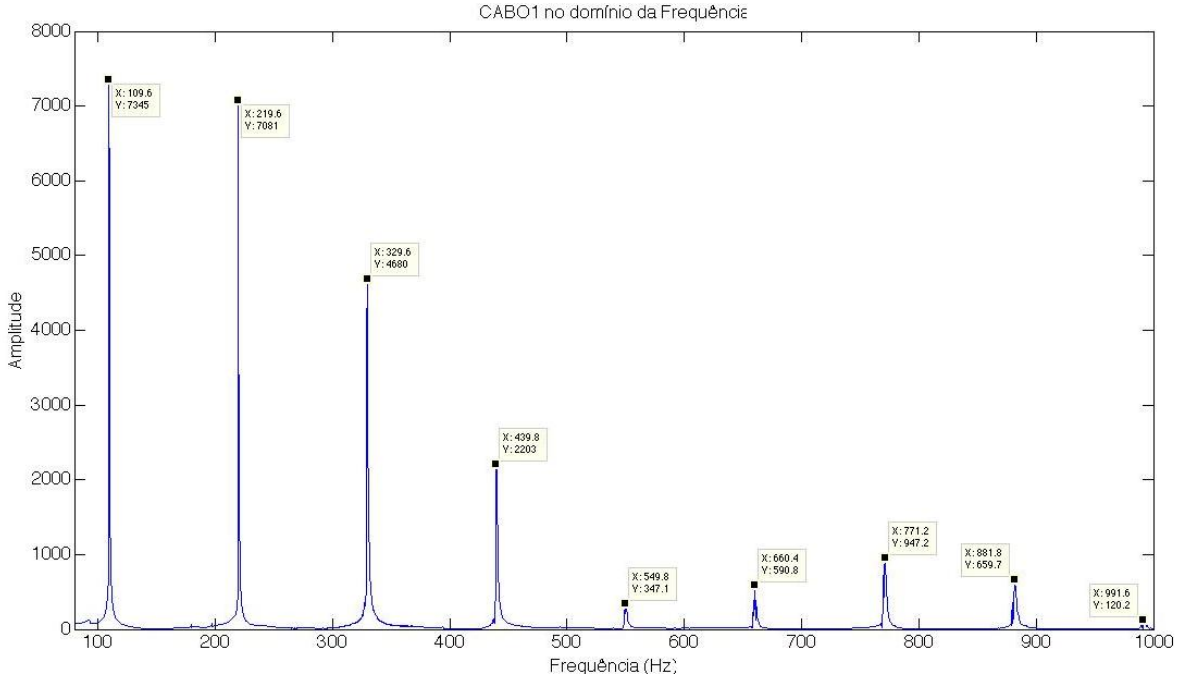
```
function analyze2freq
% Esse código foi escrito a partir de uma função chamada analyze.m
% (Mark R. Petersen, U. of Colorado Boulder Applied Math Dept, Feb 2004)
%
% Essa modificação tem o objetivo de plotar e comparar apenas no domínio
% da frequência,

% y recebe os dados do sinal, Fs recebe a frequência de amostragem (44100)
[y, Fs] = wavread('FM1');
t = (1:length(y))/Fs;       %define-se o tempo total da amostra
```

```
N = 2^15;                   % define-se o número de pontos a serem analizados
c = fft(y(1:N))/N;          % c recebe a fft do intervalo escolhido do sinal
p = 2*abs( c(2:N/2));       % é feito o calculo da potência
f = (1:N/2-1)*Fs/N          % Frequências que correspondem às potências

%é feita a plotagem do Sinal de FM em vermelho com escala logarítmica à
direita.
subplot(1,2,2)
semilogy(f,p,'r')
axis([0 4000 10^-4 1])
xlabel ('Frequência (Hz)')
ylabel ('Potência (dB)')
title('Espectro de PotÍncia de FM')

%repete-se o processo para o CABO
[x, Fs] = wavread('CABO1');
t2 = (1:length(x))/Fs;
N2 = 2^15;
c2 = fft(x(1:N2))/N2;
p2 = 2*abs( c2(2:N2/2));
f2 = (1:N2/2-1)*Fs/N2;
subplot(1,2,1)
semilogy(f2,p2)         %sinal do cabo é plotado em azul.
axis([0 4000 10^-4 1])
xlabel ('Frequência (Hz)')
ylabel ('Potência (dB)')
title(['Espectro de Potência de CABO'])
```

APÊNDICE B - Resultados

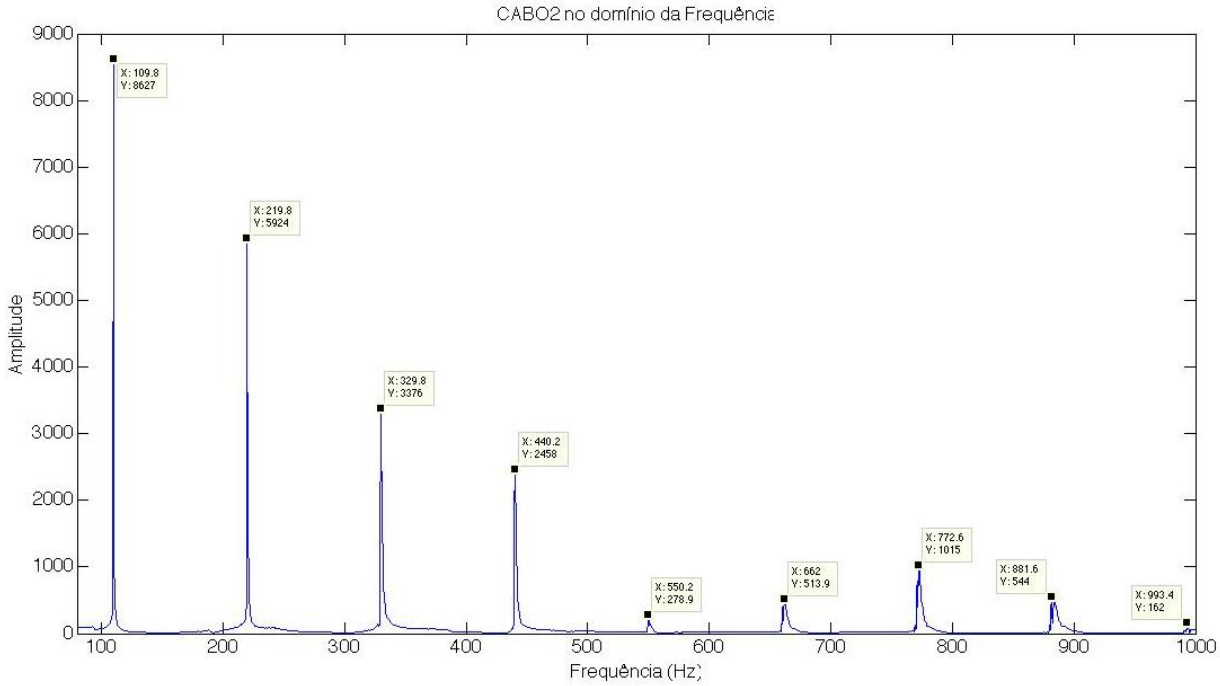
Constam nesse apêndice alguns resultados obtidos através do software MatLab.

B.1 CABO 1 no domínio da Frequência

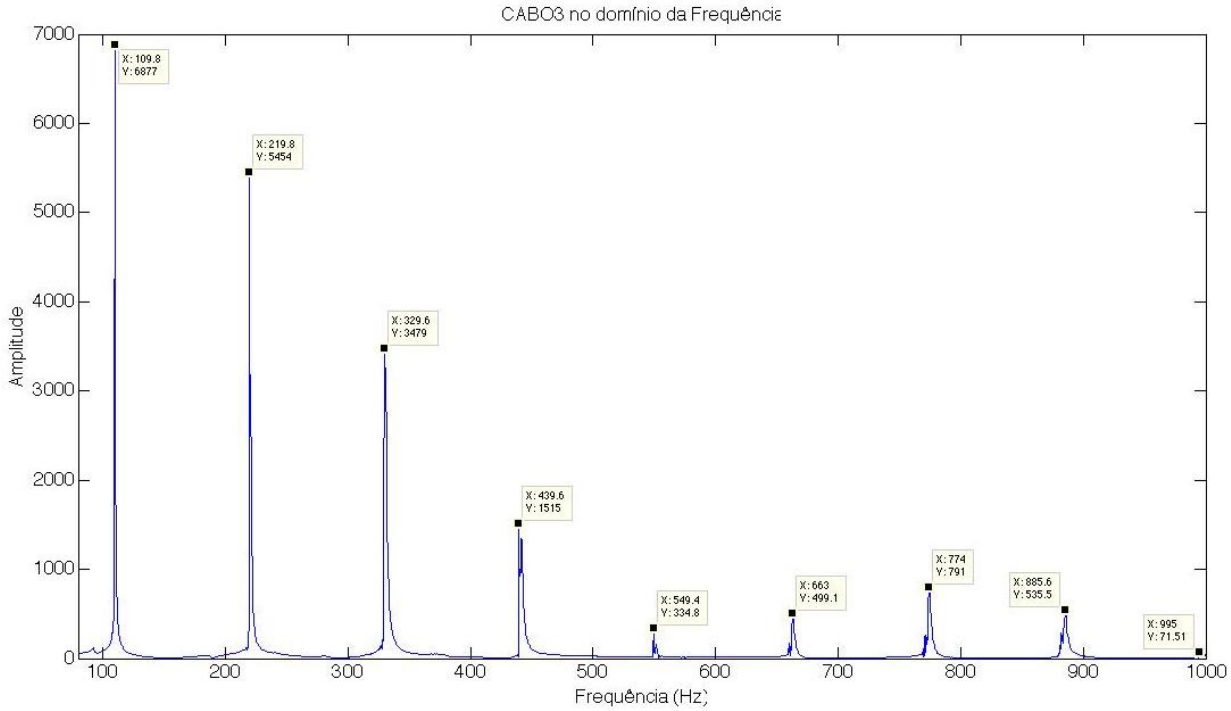


A figura do anexo B.1 acima apresenta os harmônicos da nota lá transmitida pelo cabo. Nota-se que o harmônico fundamental é de frequência 110 Hz aproximadamente, o que indica que a corda está corretamente afinada. Observamos nas imagens do anexo B.2 até o B.20 o mesmo comportamento dos harmônicos da nota, evidenciando que não existe diferença significativa das transmissões no que se diz respeito das características da nota musical.

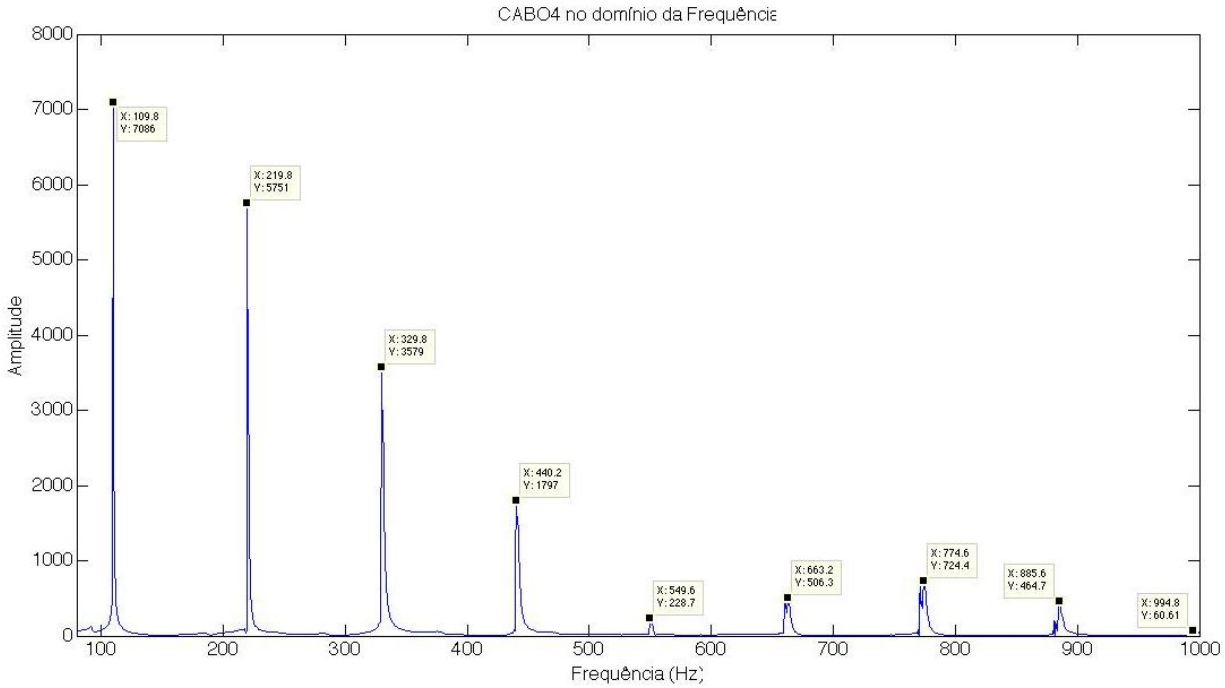
B.2 CABO 2 no domínio da Frequência



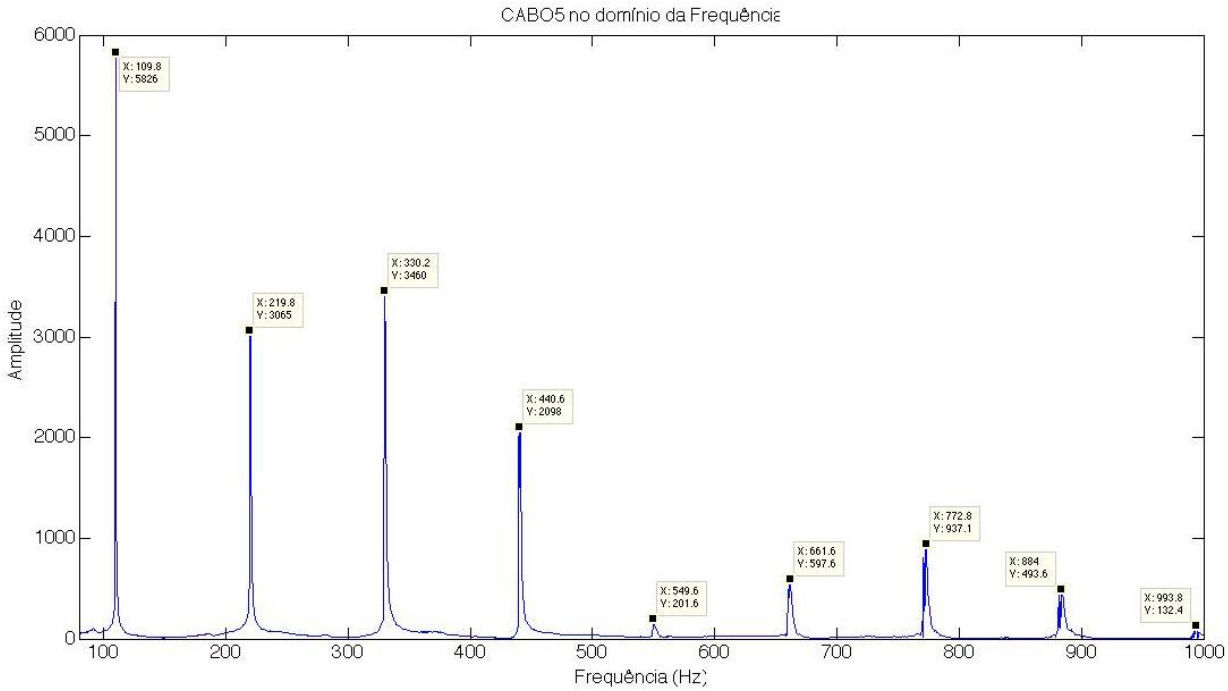
B.3 CABO 3 no domínio da Frequência



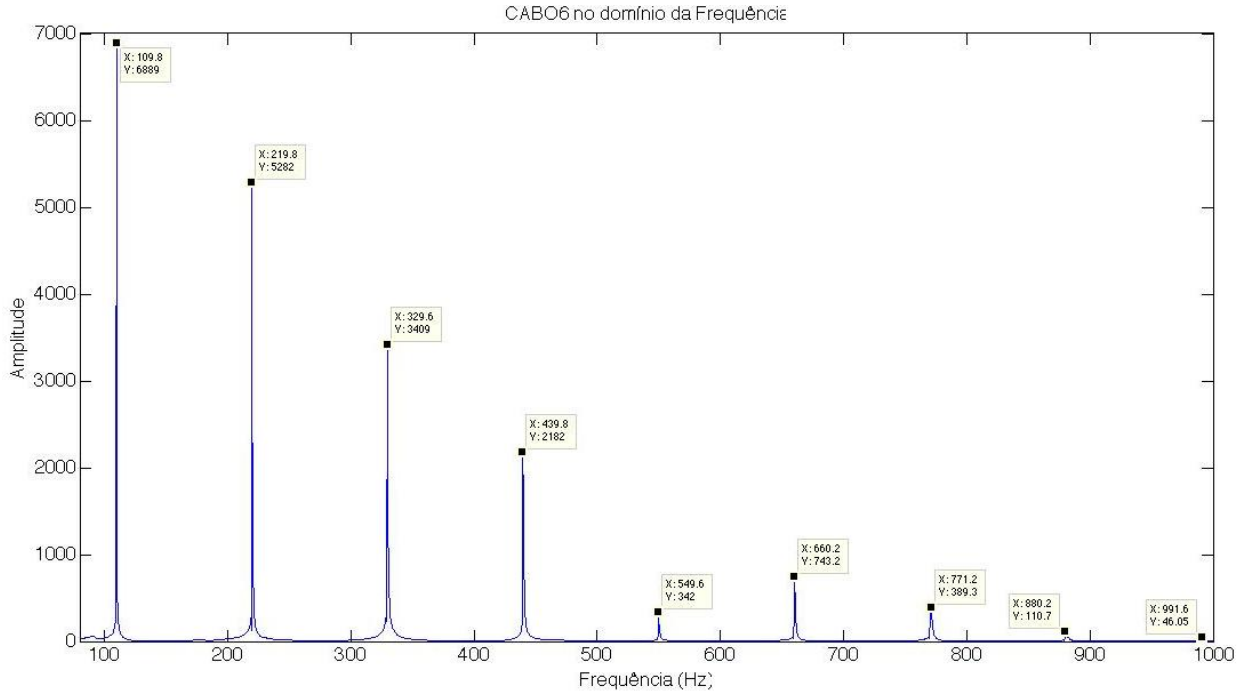
B.4 CABO 4 no domínio da Frequência



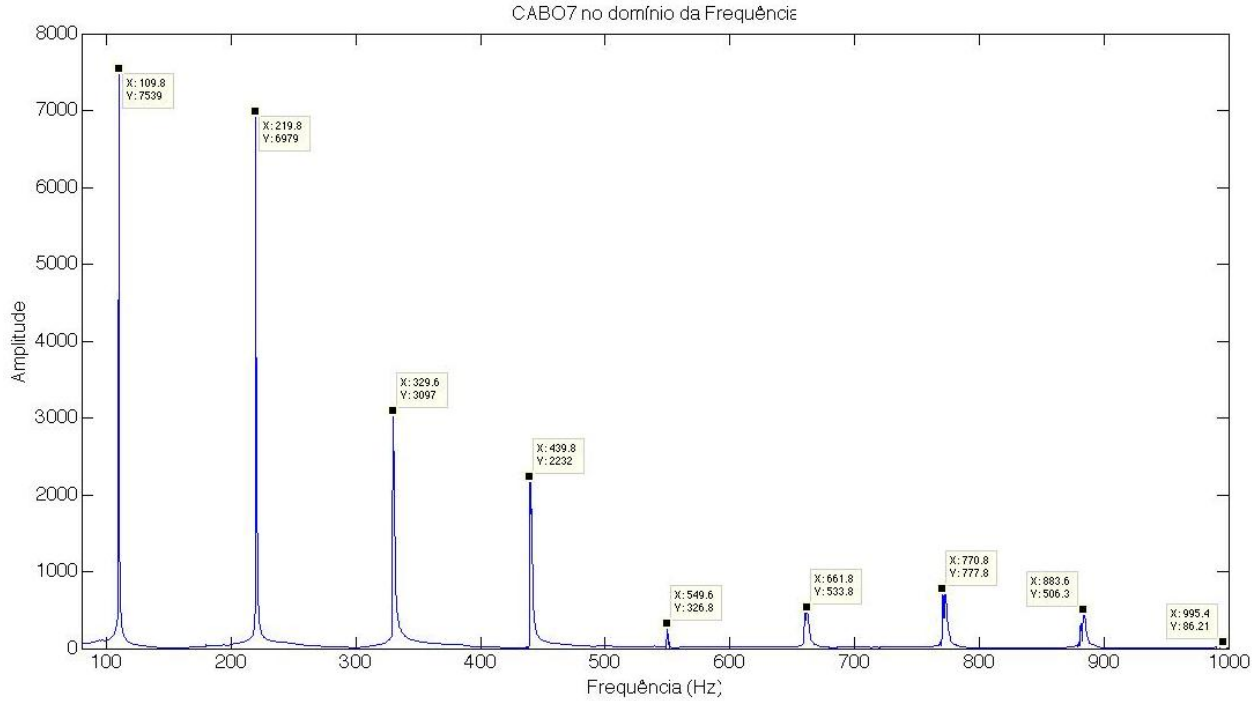
B.5 CABO 5 no domínio da Frequência



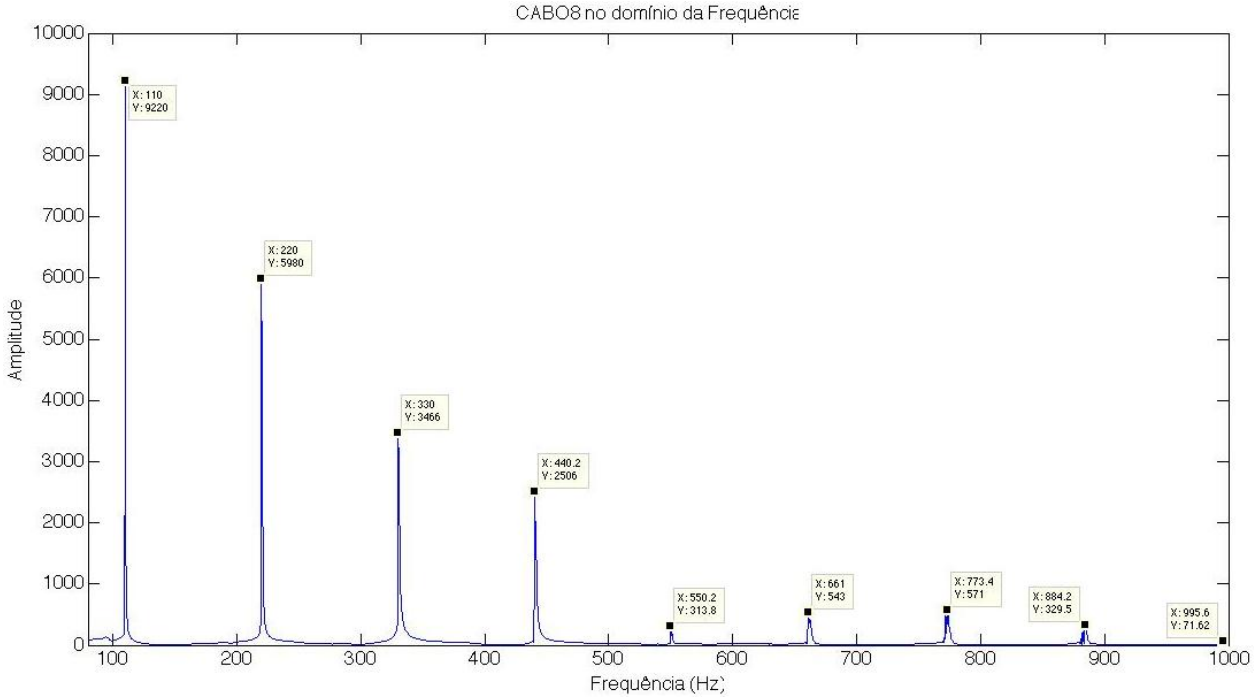
B.6 CABO 6 no domínio da Frequência



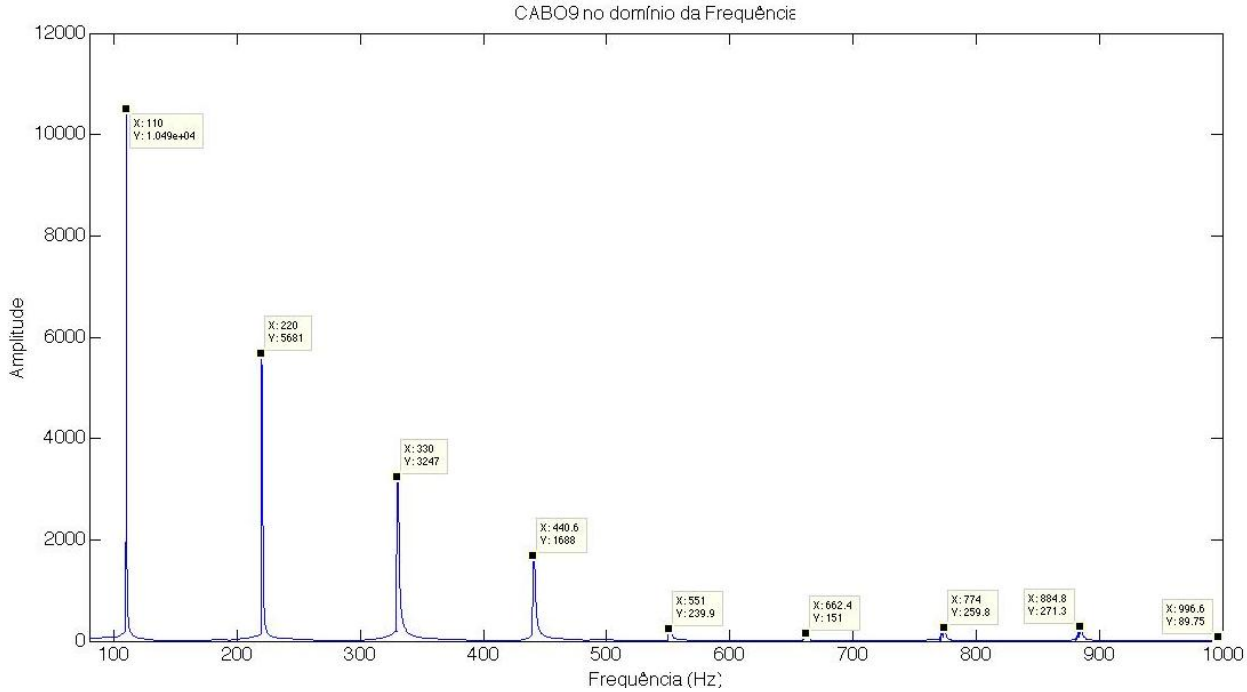
B.7 CABO 7 no domínio da Frequência



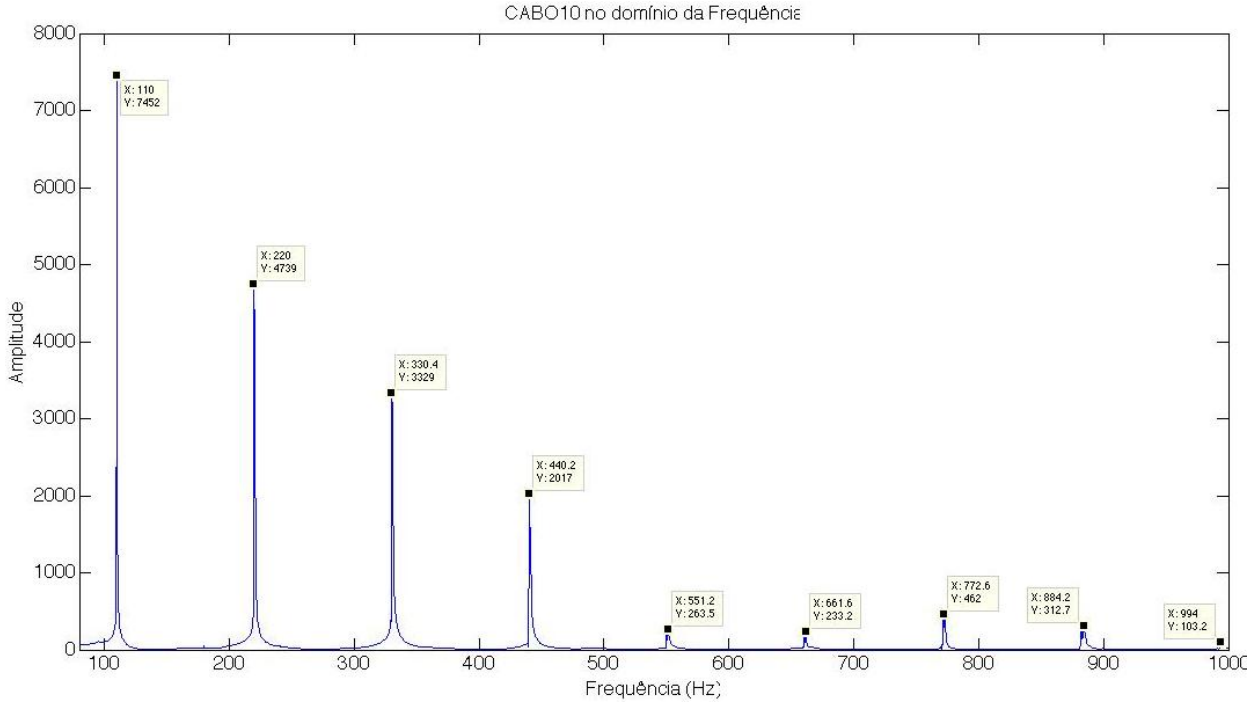
B.8 CABO 8 no domínio da Frequência



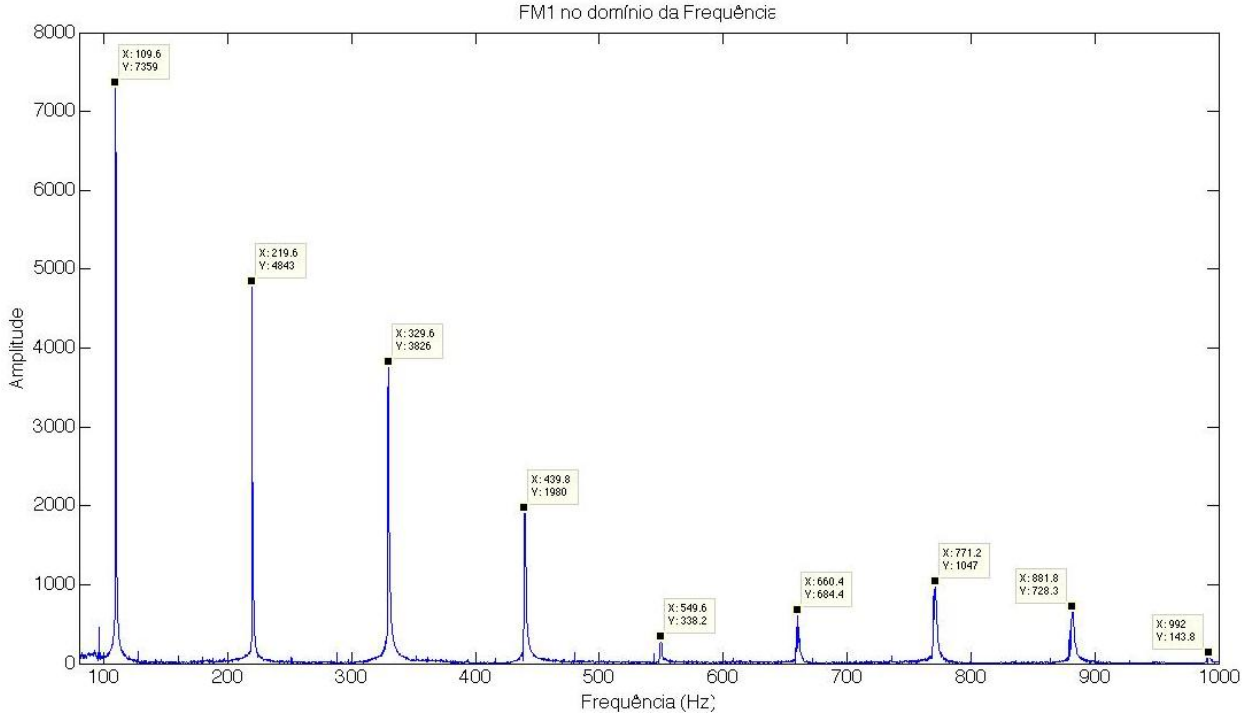
B.9 CABO 9 no domínio da Frequência



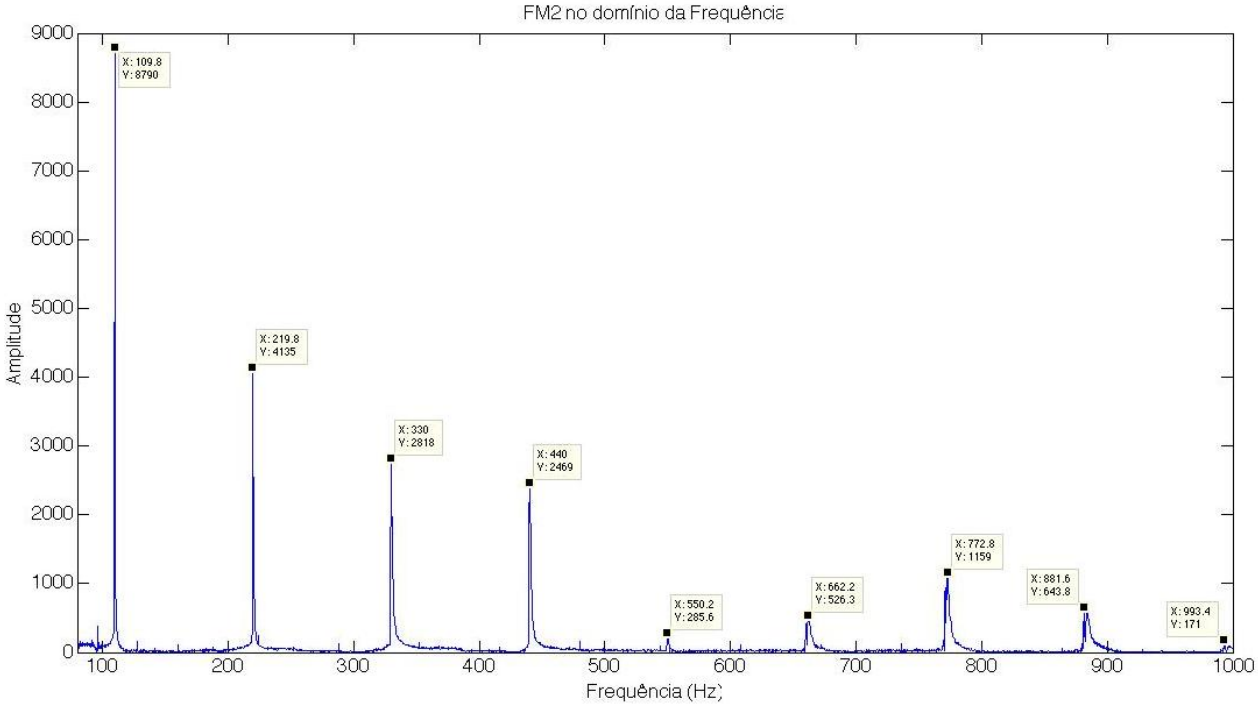
B.10 CABO 10 no domínio da Frequência



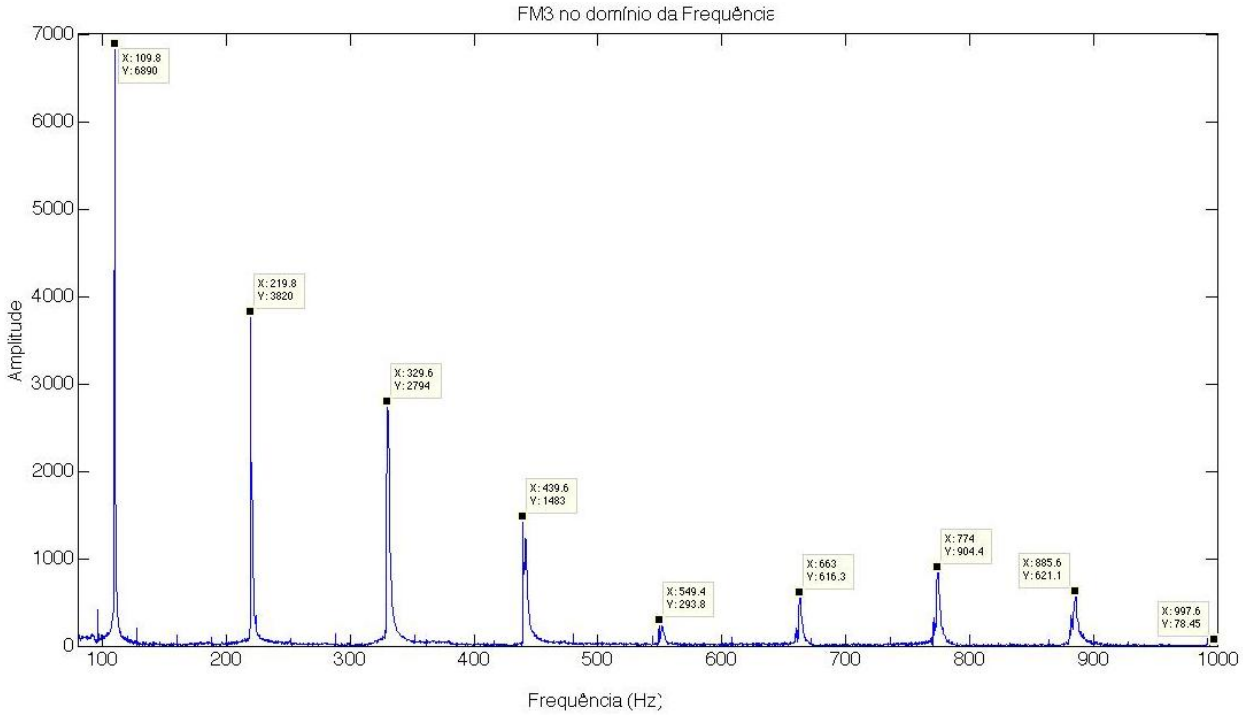
B.11 FM 1 no domínio da Frequência



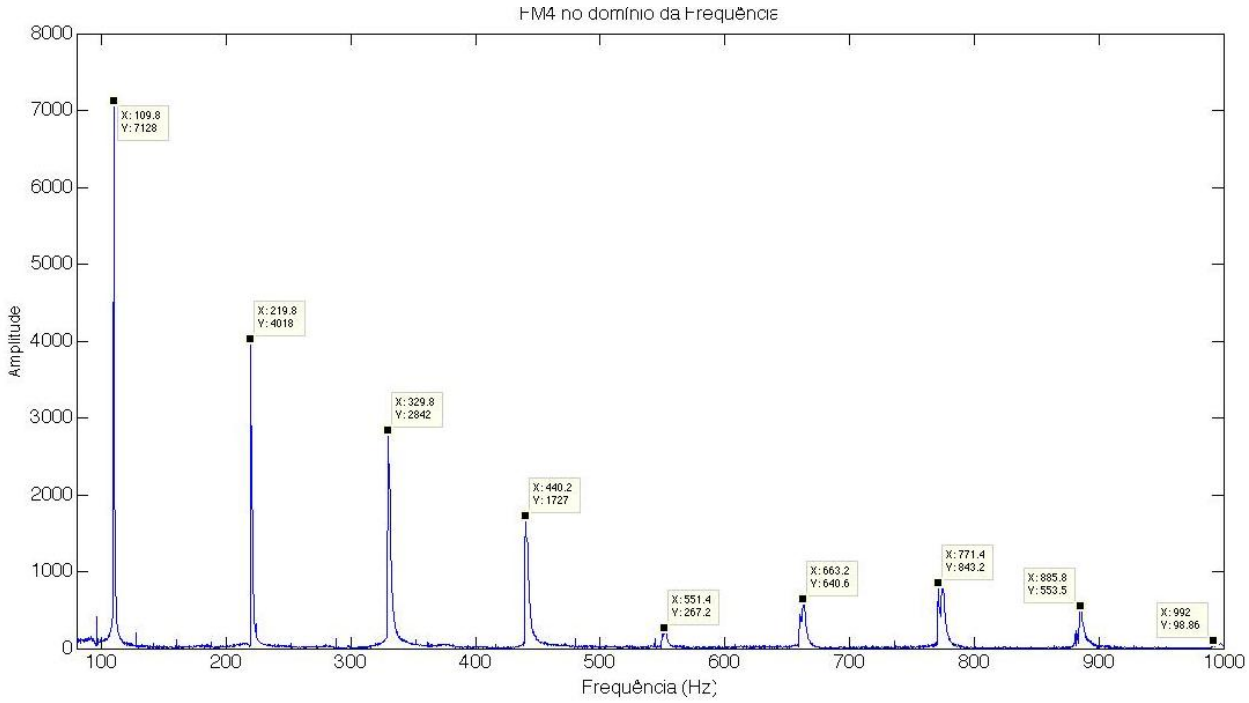
B.12 FM 2 no domínio da Frequência



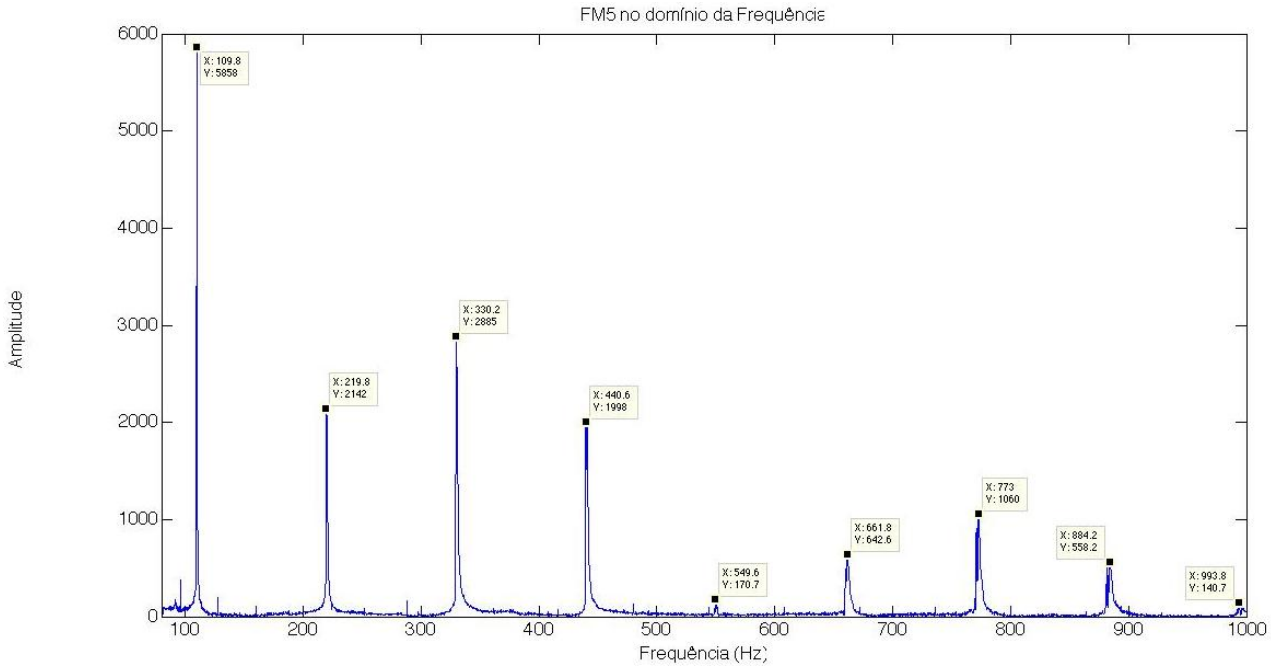
B.13 FM 3 no domínio da Frequência



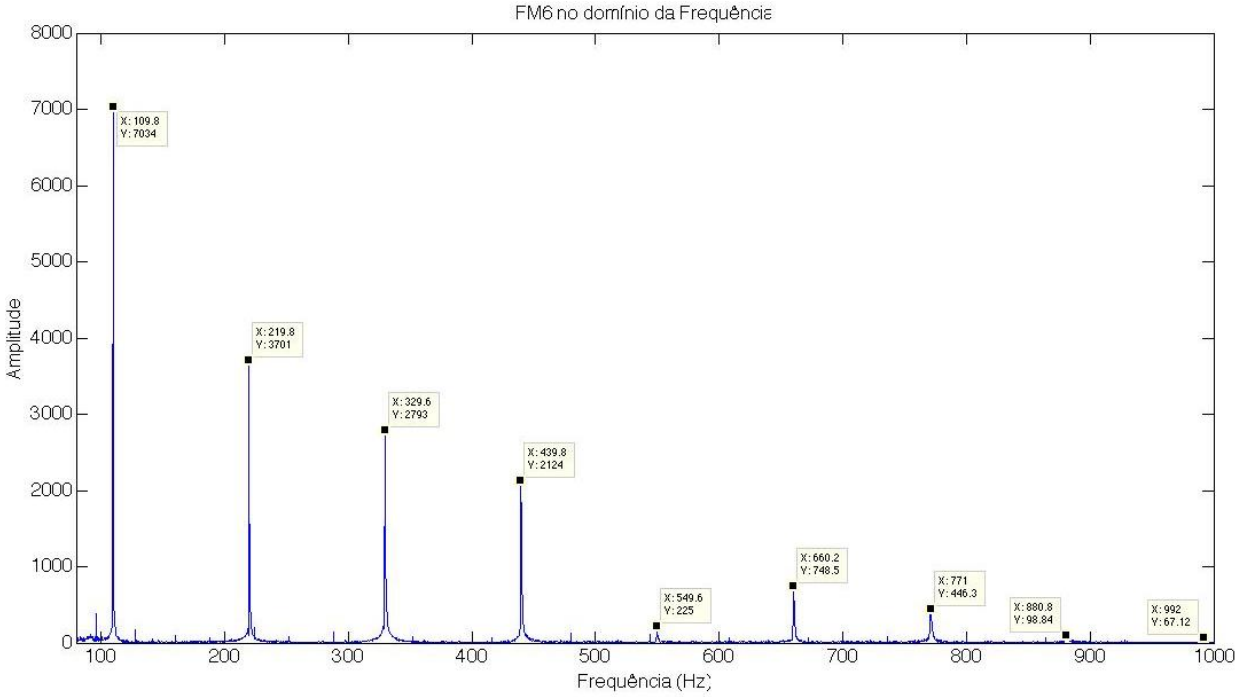
B.14 FM 4 no domínio da Frequência



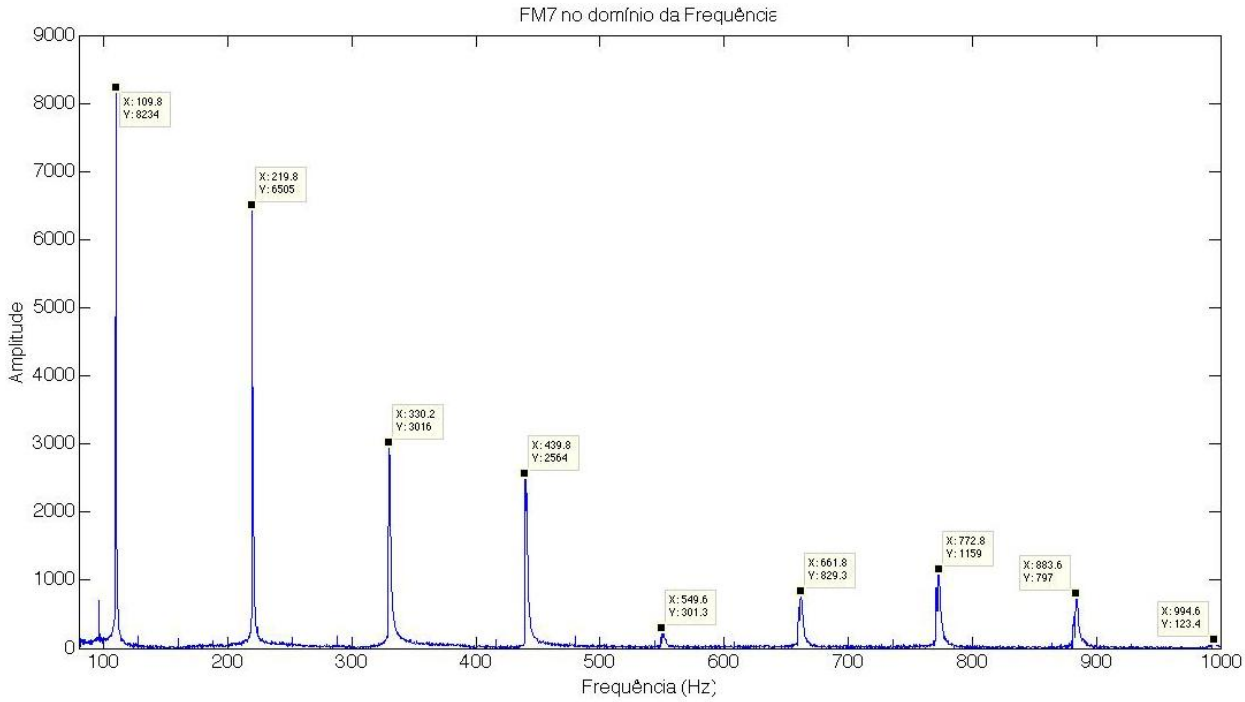
B.15 FM 5 no domínio da Frequência



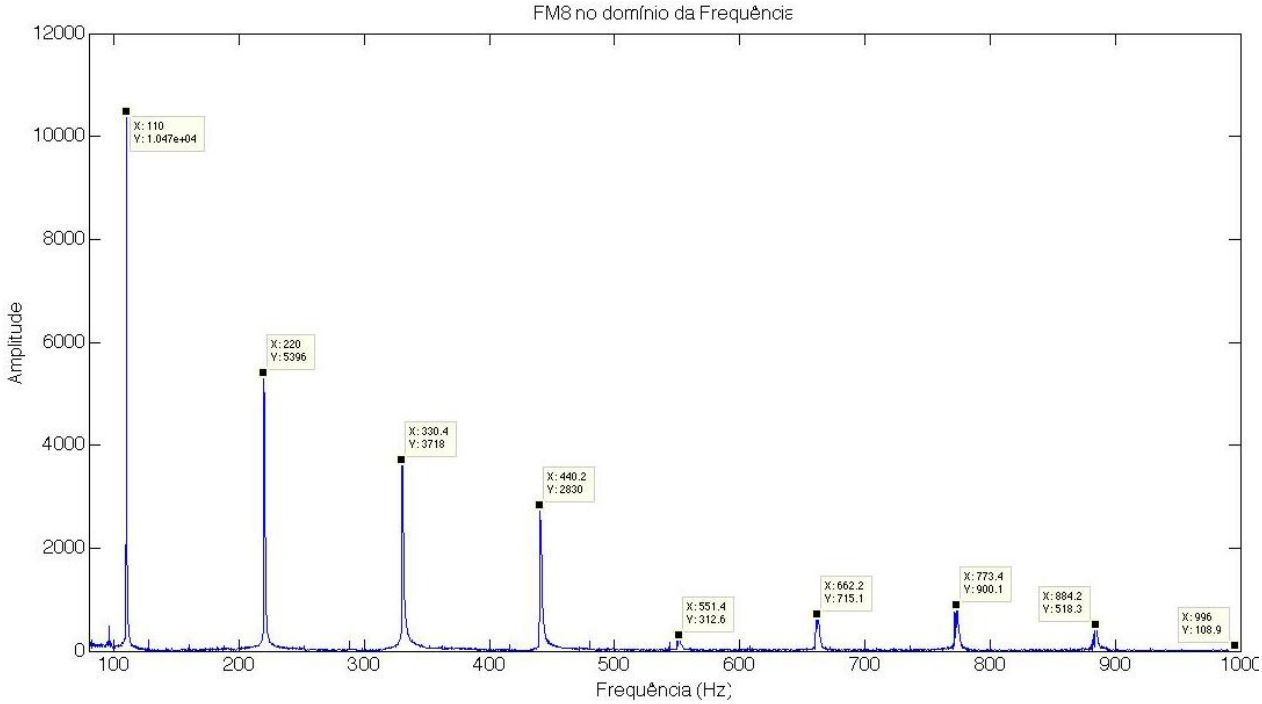
B.16 FM 6 no domínio da Frequência



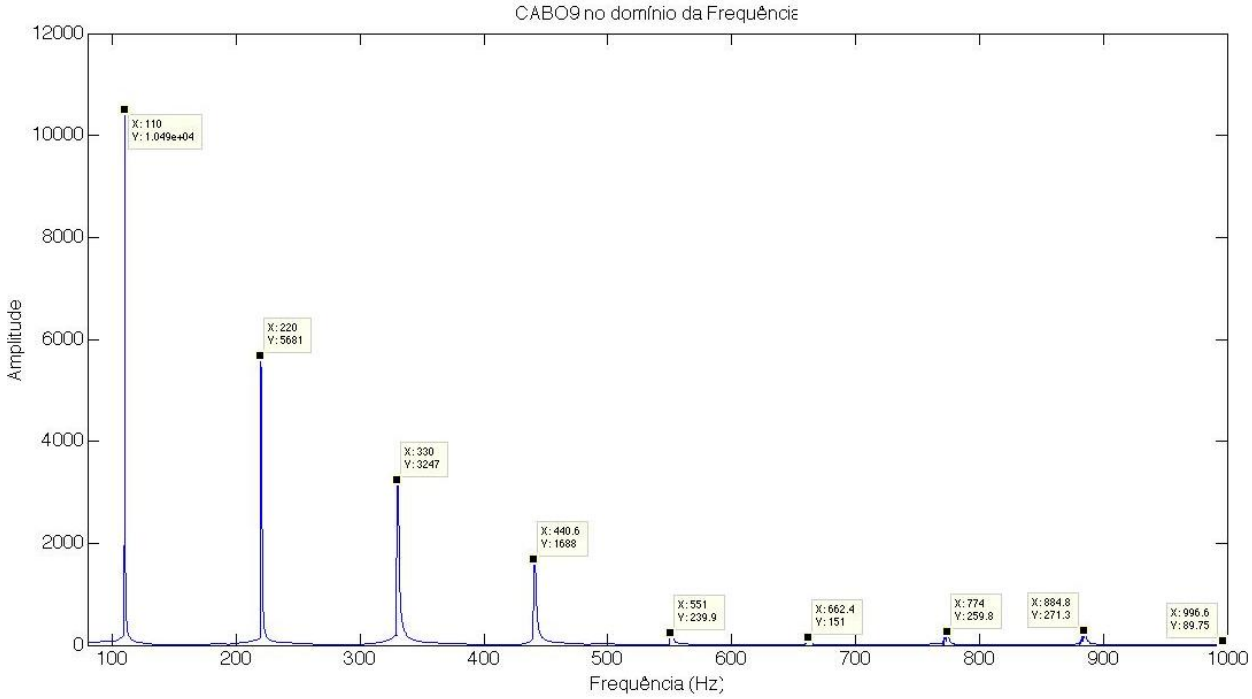
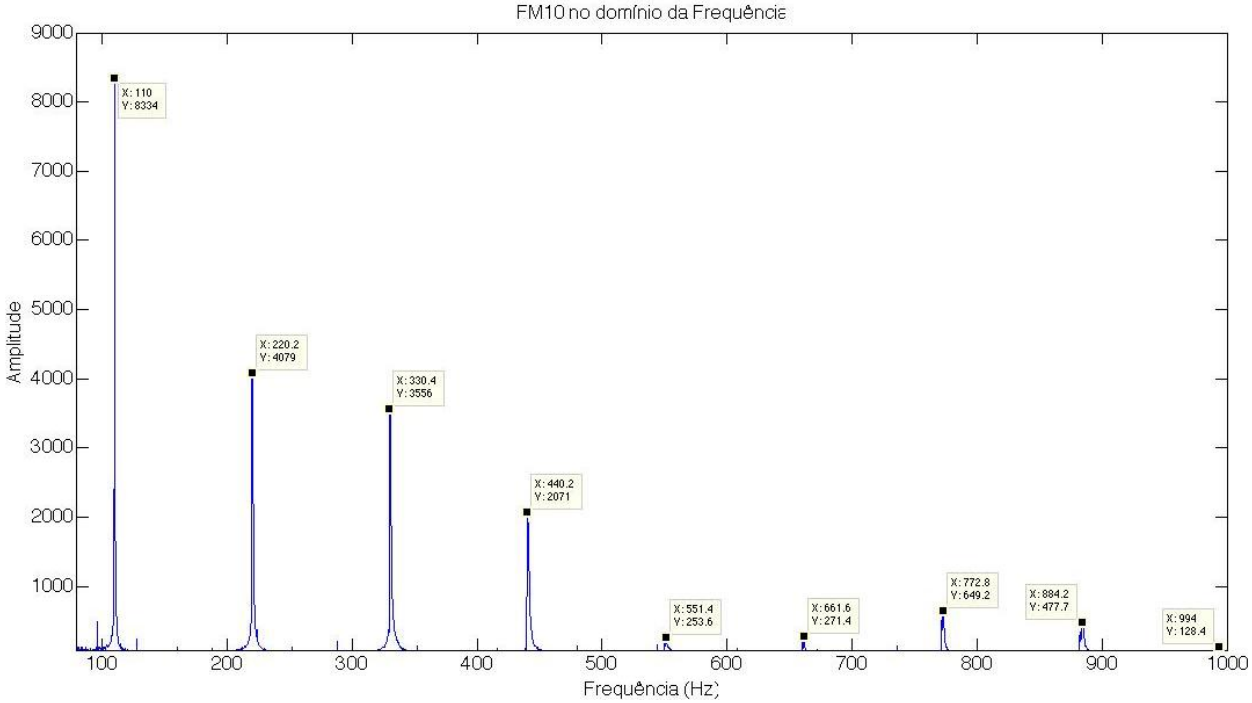
B.17 FM 7 no domínio da Frequência



B.18 FM 8 no domínio da Frequência



B.19 FM 9 no domínio da Frequência



B.20 FM 10 no domínio da Frequência