



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO - CECAU**



ANDRÉ LUIZ VIANA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS E EFEITOS SONOROS EM
SINAIS DE ÁUDIO, UTILIZANDO NI SPEEDY 33 E MÓDULO
LABVIEW DSP**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2019

ANDRÉ LUIZ VIANA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS E EFEITOS SONOROS EM
SINAIS DE ÁUDIO, UTILIZANDO NI SPEEDY 33 E MÓDULO
LABVIEW DSP**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Ronilson Rocha, Dr.

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2019**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Andre Luiz Viana da .
Aplicação de filtros digitais e efeitos sonoros em sinais de áudio,
utilizando NI SPEEDY 33 e módulo LABVIEW DSP . [manuscrito] / Andre
Luiz Viana da Silva. . - 2019.
51 f.: il.: color., gráf..

Orientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Teoria dos sinais (Telecomunicações) - Processamento de sinais. 2.
National Instruments Signal - NI SPEEDY 33. 3. National Instruments
Signal - Módulo LabVIEW-DSP. I. , . II. Rocha, Ronilson. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB: 1716

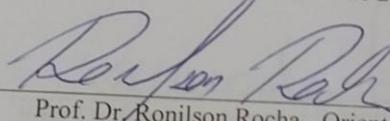


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas
Colegiado do Curso Engenharia de
Controle e Automação - CECAU

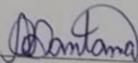
ATA DE DEFESA

Ao 05º dia do mês de dezembro de 2019, às 08:30h, na Escola de Minas -UFOP, reuniu-se a Comissão Avaliadora designada para julgar a Monografia do graduando **ANDRÉ LUIZ VIANA DA SILVA** de Engenharia de Controle e Automação intitulada **“APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS E EFEITOS SONOROS EMSINAIS DE ÁUDIO, UTILIZANDO NI SPEEDY 33 E MÓDULO LABVIEW DSP”**, sob orientação do Prof. Ronilson Rocha sendo a referida Comissão composta pelos professores Ronilson Rocha, Adrielle de Carvalho Santana, Bernardo Vescovi Fabris, e Josué Geraldo Damasceno. A Comissão Avaliadora resolveu considerar o trabalho aprovado por ter atendido as exigências para defesa e recomendações da banca examinadora.

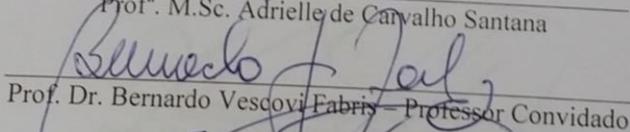
Ouro Preto, 05 de dezembro de 2019.



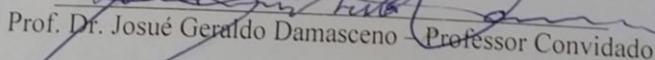
Prof. Dr. Ronilson Rocha - Orientador



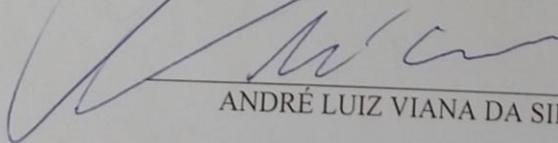
Prof.ª M.Sc. Adrielle de Carvalho Santana



Prof. Dr. Bernardo Vescovi Fabris – Professor Convidado

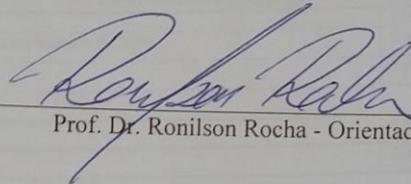


Prof. Dr. Josué Geraldo Damasceno – Professor Convidado

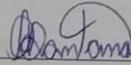


ANDRÉ LUIZ VIANA DA SILVA – Aluno (a)

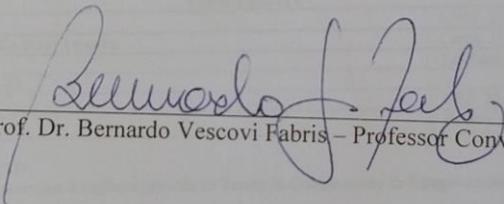
Monografia defendida e aprovada, em 5 de dezembro de 2019, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



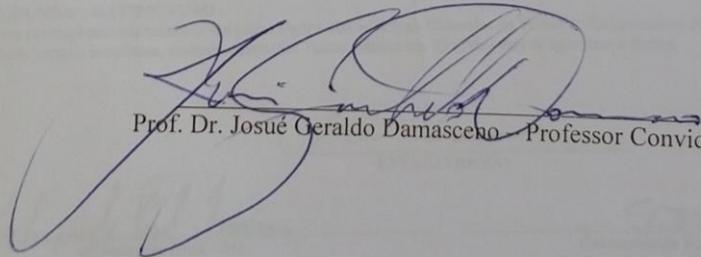
Prof. Dr. Ronilson Rocha - Orientador



Profa. M.Sc. Adrielle de Carvalho Santana



Prof. Dr. Bernardo Vescovi Fabris - Professor Convidado



Prof. Dr. Josué Geraldo Damasceno - Professor Convidado

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos principais são direcionados às meus pais Eunice e Luiz (in memoria), aos meus irmãos Alex e Lorrana. À minha namorada Rúbia, pelo apoio e paciência nos momentos difíceis e pelas felicidades nos momentos de vitória. Agradeço também aos meus familiares pelo apoio incondicional e por permitirem que essa conquista se realizasse: sem vocês, nada disso seria possível. Agradeço em especial ao meu tio Sérgio, que me deu a oportunidade não só de aprender muito, mas também de descobrir o mundo da elétrica. Ao meu orientador e mentor acadêmico Ronilson Rocha, meus agradecimentos por todos os ensinamentos e experiências passadas ao longo do curso. Agradeço a 4P sistemas e Vila Peret Consultoria, em especial ao Alexandre Peret, pelos grandes aprendizados e pela oportunidade de crescimento profissional. Ao meu antigo mentor da UFSJ - Wellington Passos - pelos grandes e valiosos conselhos. Agradecimentos especiais ao Departamento de Engenharia de Controle e Automação e a gloriosa Escola de Minas, extenso aos projetos que participei (Automic Jr, Fórmula-FEMU). Agradeço também a todos os mestres que contribuíram durante essa caminhada e ao Centro acadêmico de Engenharia de Controle e Automação-CAECA.

“Nenhuma grande descoberta foi feita jamais sem um palpite ousado.” (Isaac Newton)

RESUMO

O presente trabalho objetiva demonstrar a implementação de um laboratório on-line que investiga a aplicação de filtros digitais e efeitos sonoros em sinais baseados em técnicas de processamento de sinais digitais. Em sua implementação, o National Instruments Signal (NI SPEEDY 33) está sendo programado para realizar o processamento de um sinal aplicado na entrada usando o módulo LabView DSP. A entrada consiste em um sinal de áudio, e a saída é um sinal de áudio modificado, coletados e processados pelo NI SPEEDY 33, sendo mostrado a forma de onda ao usuário em ambas as etapas. A pertinência de tal estudo justifica-se devido a aplicação de dados discretos e sua respectiva importância no processamento de sinais em todos os campos da engenharia, tais como, por exemplo, multimídia, telecomunicações, geofísica, astrofísica, acústica e biomedicina. A aplicabilidade de sinais e sistemas desempenha um papel importante em todas as áreas de conhecimento e atuação.

Palavras-chaves: Processamento de Sinal Digital, iLabs interativos, LabVIEW-DSP, Laboratórios on-line, NI SPEEDY 33.

ABSTRACT

The present objective work demonstrates the implementation of an online laboratory that investigates the application of digital filters and sound effects on signals using digital signal processing techniques. In its implementation, the National Instruments Signal (NI SPEEDY 33) is being programmed to perform an input signal processing using the module. LabView DSP. The input consists of an audio signal, and an output is a modified audio signal collected and processed by NI SPEEDY 33 and displayed as a waveform by the user at embassies as steps. The relevance of such study is justified due to the application of discrete data and its importance in signal processing in all fields of engineering, such as multimedia, telecommunications, geophysics, astrophysics, acoustics and biomedicine. The applicability of signals and systems plays an important role in all areas of knowledge and practice. .

Key-words: Digital Signal Processing, Interactive iLabs, LabVIEW-DSP, Online Labs, NI-SPEEDY 33.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – LabVIEW,módulo DSP e placa SPEEDY-33. Fonte: Elaborada pelo autor. . .	16
Figura 2 – Representação no domínio do tempo de um sinal senoidal e suas propriedades. Fonte:(CERQUEIRA; VIEIRA, 2007)	18
Figura 3 – Representação da conversão de sinais A/D e D/A. Fonte:(NALON, 2000) . .	19
Figura 4 – Representação em diagrama de blocos no LabVIEW. Fonte: Elaborada pelo autor.	20
Figura 5 – Diagrama esquemático de componentes da Speedy-33. Fonte: (KARAM L. J. MOUNSEF, 2006)	22
Figura 6 – Espectro de Frequência. Fonte: (FERREIRA, 2006)	23
Figura 7 – Frequências correspondentes das notas musicais. Fonte: Elaborada pelo autor.	24
Figura 8 – Band-pass resonator-função de transferência. Fonte: (BOQUERA, 2016) . .	25
Figura 9 – Máquina virtual do Windows XP-Virtual Box Teste sound recorder com uma entrada de frequência irregular(ruído). Fonte: Elaborada pelo autor.	27
Figura 10 – Variação dos tipos de saídas e leituras de forma de onda. Fonte: Elaborada pelo autor.	28
Figura 11 – Filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.	29
Figura 12 – reverberação com filtro DSP. Fonte: Elaborada pelo autor.	30
Figura 13 – Diagrama de blocos do teste reverberação com filtro DSP. Fonte: Elaborada pelo autor.	30
Figura 14 – Sub VI Reverb.Pan.vi. Fonte: Elaborada pelo autor.	31
Figura 15 – Configurações usadas no teste. Fonte: Elaborada pelo autor.	31
Figura 16 – Filtros e depth desativado. Fonte: Elaborada pelo autor.	32
Figura 17 – Reprodução em modo music,sem o filtro ativado. Fonte: Elaborada pelo autor.	32
Figura 18 – Reprodução em modo music,com filtros e reverb ativos. Fonte: Elaborada pelo autor.	33
Figura 19 – Simulação de Controle de ganho automático. Fonte: Elaborada pelo autor. .	34
Figura 20 – Diagrama de blocos da simulação de Controle de ganho automático. Fonte: Elaborada pelo autor.	34
Figura 21 – Diagrama de blocos da simulação heterodyne. Fonte: Elaborada pelo autor. .	35
Figura 22 – Diagrama de blocos da simulação Heterodyne. Fonte: Elaborada pelo autor.	36
Figura 23 – Painel da simulação Heterodyne. Fonte: Elaborada pelo autor.	36
Figura 24 – Configuração do simulate signal. Fonte: Elaborada pelo autor.	37
Figura 25 – Modulação de sinais e filtros. Fonte: Elaborada pelo autor.	38
Figura 26 – Modulação de sinais-Diagrama de blocos. Fonte: Elaborada pelo autor. . . .	39
Figura 27 – Filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.	40
Figura 28 – Filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.	41

Figura 29 – Filtro de parada de banda com frequência mais alta	41
Figura 30 – Configuração don sinal de entrada do filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.	42
Figura 31 – Filtro LMS ativo. Fonte: Elaborada pelo autor.	43
Figura 32 – Filtro LMS inativo. Fonte: Elaborada pelo autor.	43
Figura 33 – Filtro LMS-Diagrama de blocos. Fonte: Elaborada pelo autor.	44
Figura 34 – Configuração do gerador de varredura de frequência. Fonte: Elaborada pelo autor.	44
Figura 35 – Configuração do filtro utilizado. Fonte: Elaborada pelo autor.	45
Figura 36 – Função de transferência do filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem. Fonte: Elaborada pelo autor.	45
Figura 37 – Painel do filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem. Fonte: Elaborada pelo autor.	46
Figura 38 – Diagrama de blocos do filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem. Fonte: Elaborada pelo autor.	47
Figura 39 – Music composer-Painel. Fonte: Elaborada pelo autor.	48
Figura 40 – Music composer-Diagrama de blocos. Fonte: Elaborada pelo autor.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench,
DSP	Digital Signal Processing (Processador digital de sinais)
NI SPEEDY-33	National Instruments Signal Processing Educational Engineering Device for Youth (National Instruments -Dispositivo de engenharia educacional para processamento de sinais para jovens)
CODEC	É o acrônimo de codificador/decodificador, dispositivo de hardware ou software que codifica/decodifica sinais.
ADC ou A/D	Analog-to-digital converter (conversore analógico-digital)
DAC ou D/A	Digital to Analog converter (conversore digital-analógico)
AGC	Automatic gain control-Controle automático de ganho.
LPF	Low-Pass Filter ou Filtro passa baixo.
PID	Controle proporcional integral e derivativo.
VI	Vitrual Instruments (instrumentos virtuais)
DC ou VDC	Voltage direct current (voltagem em corrente contínua)
A	Ampere
PC	personal computer
Hz	Hertz
V	Volt
LED	Light-emitting diode (Diodo emissor de luz).
I/O	input/output (entrada/saída)
dB	decibel
FIR	Resposta por impulso finito (Finite Impulse Response)
IIR	Resposta ao impulso infinito (Infinite Impulse Response)
LMS	Least mean square

LISTA DE SÍMBOLOS

m	mili
M	Mega
G	Giga
k	kilo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Estado da arte	15
1.2	Objetivos gerais e específicos	15
1.3	Justificativa do trabalho	16
1.4	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Processamento de sinais e DSP	18
2.2	LabVIEW	19
2.3	Speedy-33	20
2.4	Componentes da placa Speedy-33	20
2.5	Intensidade sonora	22
2.6	Frequência	23
2.7	Filtros Digitais e modulação	24
3	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	26
3.1	Primeiros testes: Exemplos disponibilizados pelo DSP-Speedy-33	27
3.1.1	<i>Variação dos tipos de saídas e leituras de forma de onda</i>	27
3.1.2	<i>Filtro de parada de banda</i>	28
3.2	Dados e Experimentos	29
3.2.1	<i>Análise da adição de efeitos e Reverb com controle de ganho, Pan e depth</i>	29
3.2.2	<i>Controle de ganho automático.</i>	33
3.2.3	<i>Heterodyne</i>	35
3.2.4	<i>Modulação de sinais</i>	37
3.2.5	<i>O filtro de parada de banda</i>	39
3.2.6	<i>Filtro LMS</i>	42
3.2.7	<i>Filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem (Fourth-Order Chebyshev low pass filter)</i>	45
3.2.8	<i>Music Composer</i>	47
4	CONCLUSÃO	50
4.1	Trabalhos futuros	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estado da arte

A tecnologia está modificando toda relação do ser humano com o mundo, seja no âmbito social, ambiental, físico ou mental. As metodologias de aprendizagem e desenvolvimento do estudante de engenharia no contexto atual de inovação e tecnologia, no qual a difusão de informações ocorre de forma acelerada e (mas, nem sempre) eficiente, em consequência dos grandes avanços nos setores científicos e tecnológicos, têm revelado novas necessidades e desafios à prática pedagógica.

Metodologias baseadas em sistemas computadorizados que suportam esforços pedagógicos, como, por exemplo, laboratórios virtuais, podem contribuir para agregar e facilitar o ensino em uma ampla gama de disciplinas da engenharia. Estudantes de engenharias que envolvem sistemas digitais precisam ser treinados para usar e aplicar técnicas de processamento de sinal. Isso pode ser feito da melhor forma, abordando tanto o conhecimento teórico quanto a exposição prática em experimentos de laboratório. Embora os processos físicos sejam analógicos na natureza, em aplicações modernas, em grande parte são implementadas de forma digital, utilizando várias técnicas de processamento de sinal. O processamento de sinal é a ação de alterar um ou mais parâmetros de um sinal de acordo com um requisito pré-determinado, e implica tanto o tratamento analógico quanto o digital (KYESSWA et al., 2011). Laboratórios on-line de Processamento Digital de Sinais têm sido implementados em várias universidades, a maioria em campos de Engenharia elétrica, eletrônica, de computação e ciência da computação.

Na Faculdade de Tecnologia da Universidade Makerere (Kampala, Uganda) foi implementado um laboratório on-line de filtros utilizando também o módulo DSP e a placa NI SPEEDY-33 que oferece suporte a experimentação dos filtros digitais baseado em técnicas de processamento digital de sinais (KYESSWA et al., 2011). Já na Universidade de Sevilha, um laboratório que fornece acesso remoto a dispositivos DSP, nomeado eDSPLab, foi implementado utilizando LabVIEW e o Starter Kit (DSK6711) (BARRERO; TORAL; GALLARDO, 2008). No Afeka College of Engineering, Tel-Aviv, laboratórios DSP foram implementados e configurados, combinando o acesso remoto e experimentação no local usando o EZ-KIT bordo LITE (DVIR, 2006).

1.2 Objetivos gerais e específicos

Este trabalho tem como objetivo familiarizar o usuário com o módulo DSP do software LabVIEW e procura descrever a extensão da funcionalidade e aplicação de filtros digitais e efeitos sonoros em laboratórios digitais de arquitetura compartilhada. Visa também proporcionar e oferecer suporte a experimentação dos filtros digitais, baseado em técnicas de processamento

digital de sinais.

Neste projeto de um Laboratório de filtros digitais, o objetivo específico foi possibilitar a análise do efeito de uma dada operação com um sinal de áudio, amostras do próprio módulo DSP ou algum outro sinal similar do filtro, além de analisar a resposta do filtro e a característica do sinal de entrada. O usuário seleciona o tipo de teste a ser realizado, e este que demandará ou não uma entrada de áudio e/ou um filtro para usar e para processar o arquivo ou entrada. As entradas do sistema são arquivos de áudio de um local definido pelo usuário ou mesmo um sinal em tempo real, captado, por exemplo, com um microfone. Esses testes foram construídos no ambiente LabVIEW juntamente com o módulo DSP, como mostrado na Figura 1, que mostra também a interface do software com o hardware do laboratório, e um microfone Shure SV100 usado em alguns testes. Em alguns testes, o usuário pode especificar as variáveis de entrada, então um sinal real é gerado, processado e a saída visualizada no painel frontal, que funciona como a interface do sistema.

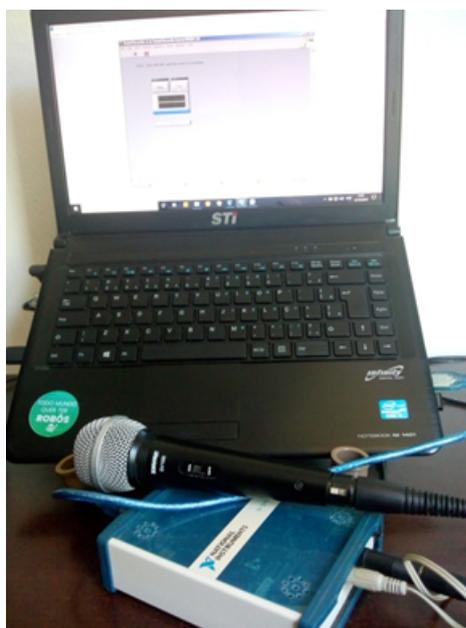


Figura 1 – LabVIEW,módulo DSP e placa SPEEDY-33. Fonte: Elaborada pelo autor.

1.3 Justificativa do trabalho

Com o LabVIEW (de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), os usuários usam métodos gráficos de programação para aprender e desenvolver aplicativos, realizar simulações, podem utilizar módulos, como, por exemplo, o DSP (Digital Signal Processing) que utilizando a representação digital de sinais, usa processadores digitais para analisar, modificar, ou extrair informações de sinais (HERRERA, 2004). O módulo DSP possui uma ampla aplicabilidade, um exemplo é a aplicação (conversão) de sinais resultantes da forma analógica, amostrado em intervalos regulares e convertido para a forma digital.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho está organizada da seguinte forma: na seção 2, que abordará a revisão de literatura, serão apresentados alguns conceitos iniciais dentro da temática, e uma breve revisão teórica, abordada de forma a facilitar e contribuir no entendimento do trabalho. Na seção 3 é apresentada a metodologia empregada no trabalho, como também algumas abordagens empregadas durante os experimentos, e informações sobre os equipamentos utilizados; na seção 4 são apresentados os resultados e as discussões dos resultados obtidos, e algumas observações sobre os experimentos; na seção final de conclusão são apresentadas as conclusões obtidas após a realização do trabalho, observações, considerações finais, ideias e melhorias para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No contexto social vigente, quase que constantemente, nos deparamos com sinais. Um sinal geralmente contém informação sobre algum fenômeno ou acontecimento. Sinais são os meios pelos quais transmitimos informações. Um sinal é definido como qualquer quantidade física variando com o tempo (sinal unidimensional), por exemplo, quando falamos ao telefone, a voz, que é um sinal acústico, é convertida em sinais elétricos pelo microfone. Este sinal elétrico é transmitido por um sistema de satélites e recebido do outro lado da Terra, e convertido novamente num sinal de voz, o que possuem valores contínuos em todo valor do tempo. Para ser processado por um computador, um sinal de tempo contínuo deve ser amostrado no tempo em um sinal de tempo discreto para que seus valores, em um conjunto discreto de instantes de tempo, possam ser armazenados nos locais de memória do computador. Um sinal de áudio é um sinal contínuo, ou seja, ele está definido para qualquer instante de tempo. Existem várias formas de representação de um sinal contínuo. A representação mais comum de sinais e formas de onda é no domínio do tempo e no domínio da frequência. Pode-se exemplificar com uma representação de um sinal senoidal simples no tempo na figura 2.

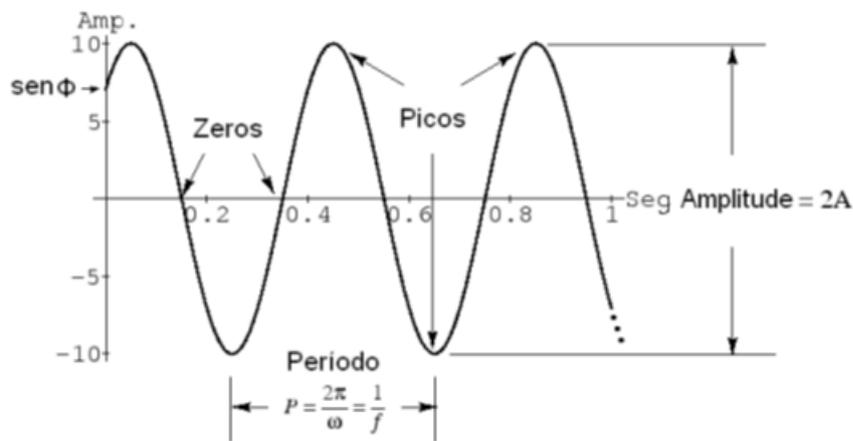


Figura 2 – Representação no domínio do tempo de um sinal senoidal e suas propriedades.
Fonte: (CERQUEIRA; VIEIRA, 2007)

2.1 Processamento de sinais e DSP

Há uma crescente demanda por equipamentos portáteis, de fácil manuseio e de interface simples com o usuário. Com suas mais diversas possibilidades de uso, nas mais abrangentes áreas, os Processadores de Sinais Digitais (DSP) são uma ótima opção para estas aplicações, por serem muito versáteis e por poder se enquadrar em quaisquer tipos de projetos (NUNES et al., 2006). Os DSPs são processadores cujas características vêm atender aplicações onde o objetivo principal é o processamento digital de sinais. Para entender como funciona um DSP

primeiramente deve-se entender o princípio do processamento de sinal. Este princípio consiste no método de analisar sinais do mundo real, usando ferramentas computacionais e matemáticas, que podem ser transformadas ou extraídas informações desses sinais. Podemos dizer que o sinal digital é justamente uma representação numérica de sinais analógicos. Para que haja essa representação são utilizados conversores analógico-digitais (ADC), que convertem os sinais analógicos numa sequência de 0s e 1s, podendo ser analisados por meio de computadores e programas. Após o processamento computacional, pode-se ter a necessidade de reenviar as novas informações para o mundo real. Para isso são utilizados conversores digital-analógicos (DAC), que tem a função de converter uma determinada sequência de 0s e 1s e transformá-la num sinal analógico (NUNES et al., 2006). Abaixo temos um exemplo de como ocorre a conversão dos sinais tanto na forma analógico-digital quanto na forma digital-analógica em um processo de gravação e reprodução de voz.



Figura 3 – Representação da conversão de sinais A/D e D/A. Fonte:(NALON, 2000)

2.2 LabVIEW

LabVIEW é a sigla de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. É uma linguagem de programação gráfica da National Instruments. O verdadeiro poder do LabVIEW reside na sua capacidade de interagir com dispositivos externos e / ou placas de som internas instaladas no PC. Geralmente é usado para aquisição de dados, controle de instrumentos e automação industrial. O módulo LabVIEW DSP adiciona recursos ao LabVIEW para processamento de sinais digitais (executado no hardware incorporado ao DSP). Os programas do LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais (VIs). Cada VI tem duas representações: diagrama de blocos e um painel frontal. Cada VI, por sua vez, pode conter sub-VIs e outras estruturas. Os controles e indicadores no painel frontal permitem que um operador insira ou extraia dados de um instrumento virtual em execução. O código gráfico é compilado em vez de interpretado. A compilação é feita em tempo real, enquanto o código gráfico de um VI está sendo editado. O código gerado é um pouco mais lento que o código equivalente compilado em C. No entanto, este é considerado um pequeno preço a pagar pelo aumento da produtividade oferecida pelo sistema exclusivo patentado de design de código gráfico. Os algoritmos desenvolvidos são baixados

para a placa DSP, que executa o algoritmo em um ambiente em tempo real. A seguir temos uma representação em diagrama de blocos de um modelo de teste realizado no presente trabalho.

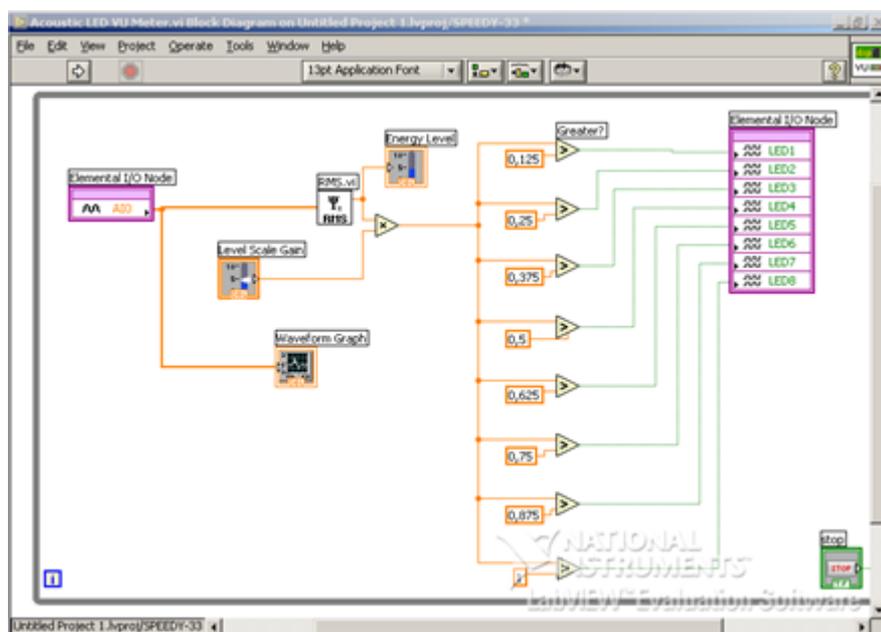


Figura 4 – Representação em diagrama de blocos no LabVIEW. Fonte: Elaborada pelo autor.

Usando o microfone da placa Speedy-33, pode-se captar um sinal de áudio (entrada), que é processada pela placa, mostrando em tempo real a forma dessa entrada. Em seguida é realizada uma conversão A/D para que o ganho deste sinal seja representado através dos LED's que a placa possui.

2.3 Speedy-33

SPEEDY (*Signal Processing Educational Engineering Device for Youth*) significa Dispositivo de engenharia educacional para processamento de sinais. A SPEEDY-33 é uma placa fácil de usar que contém o processador digital de sinais TMS320VC33 da TI DSP. O processador DSP otimiza a velocidade implementando funções no hardware, ao invés do software. Ele se conecta a um PC padrão através da porta do host Universal Serial Bus (USB). Como ponto de partida, pode-se usar um sinal digital básico para o processamento de dados (DSP) no LabVIEW, como amostragem e reconstrução de sinais de tempo contínuo (operações A / D e D / A), bem como exibir tempo e sinais no domínio da frequência.

2.4 Componentes da placa Speedy-33

A seguir, são exibidos os componentes da placa Speedy-33, demonstrados em seguida na Figura 5 :

1. Na extremidade inferior esquerda da Figura 5 está a porta de alimentação. Esta porta fornece a SPEEDY-33 a possibilidade de conectar a uma fonte de energia externa e operar o dispositivo no modo autônomo para demonstrações e aplicações no mundo real, sem estar conectado ao PC via USB. Quando a energia é fornecida ao dispositivo, o LED de energia acende. A tensão de entrada deve ser de 9V DC (VDC), a 500mA, com o contato externo sendo terra e contato interno sendo VDC positivo.
2. Logo acima, está o conector que se conecta a porta USB do PC, faz a conexão com o programa LabVIEW e executa o DSP através dessa conexão.
3. Os dois pequenos dispositivos retangulares no canto superior esquerdo e direito são os microfones da placa.
4. O maior componente na placa é o processador da Texas Instruments (TI). Este chip tem um processador que opera a 150 MHz. Isso é bastante lento se comparado aos computadores executando em 1 GHz a 3 GHz; no entanto, é rápido o suficiente para processar voz, música e até vídeo em tempo real.
5. Logo ao lado do processador está a memória flash. Uma vez programada e carregada na memória flash, a placa pode ser desconectada do PC, sendo alimentada com uma fonte 9V DC e executada de forma autônoma.
6. Um dos chips contidos na placa é a Interface de controle de áudio. Seu trabalho é converter um sinal analógico do microfone (por exemplo) para um formato digital, para que o processador possa utilizar. Também recebe dados digitais do processador e os converte em um formato analógico, de forma que possa ser usado por algum alto-falante ou saída de áudio, (frequentemente chamado de conversor analógico-digital A/D ou ADC ou conversor digital-analógico D/A ou DAC). Um Codec de áudio estéreo de 16 bits incluídos no NI SPEEDY-33 permite amostragem em canal duplo de até 48 kHz no sinal de entrada. Os componentes para permitir isto estão incluídos no módulo LabVIEW DSP, permitindo 8 kHz, 18 kHz, 24 kHz, e taxas de amostragem de 36 kHz e 48 kHz que podem ser usadas nas aplicações.
- 7 e 8 Os jumpers de nível de entrada de áudio (J1, J2) controlam a quantidade de ganho aplicada aos sinais de áudio de entrada. É usado para escolher entre a Entrada de linha (11) e a entrada dos microfones (3).
- 9 Dispositivo que sinaliza quando a energia é fornecida ao dispositivo, o LED de energia acende.
- 10 O botão de redefinição é um pequeno botão que redefine manualmente o DSP e é normalmente usado no caso de um congelamento de software ou hardware.

- 11 e 12 Os dois conectores na extremidade direita da placa são da entrada e saída de áudio estéreo. O superior para os microfones e afins e o inferior para os alto-falantes.
- 13 e 14 Existem oito linhas de entrada e saída digital na placa. As portas são representadas por oito comutadores (canto inferior direito) e as portas de saída são representadas por 8 LED's (parte inferior direita). As linhas digitais de I/O podem ser programadas com o módulo DSP.
- 15 O Flash Boot Jumper controla se o DSP tentará inicializar a partir da memória flash, que é a configuração padrão. Ele deve estar ativado para executar o dispositivo em modo autônomo.
- 16 O cabeçalho de expansão simples de 20 pinos permite uma interface fácil com o hardware externo. O cabeçalho inclui alimentação, terra, oito entradas digitais e oito saídas digitais sob o Controle DSP.
- 17 Dois conectores compõem os conectores de I/O analógicos de expansão padrão, que podem ser usados com outros módulos opcionais.
- 18 O jumper de habilitação de gravação em flash controla se o DSP pode gravar na memória flash ou não.

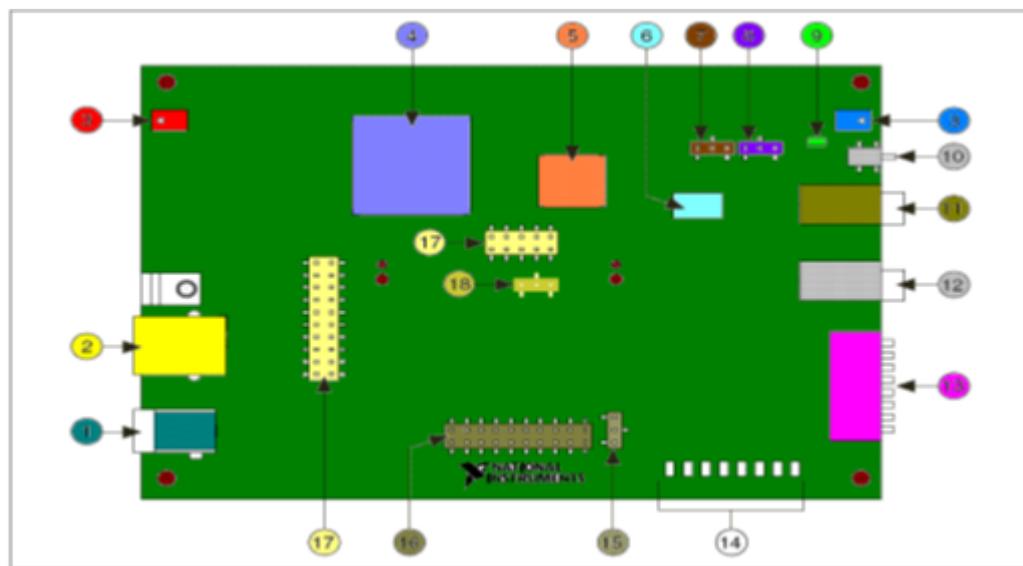


Figura 5 – Diagrama esquemático de componentes da Speedy-33. Fonte: (KARAM L. J. MOUNSEF, 2006)

2.5 Intensidade sonora

Em acústica, a intensidade refere-se à percepção da amplitude (na música a "intensidade") da onda sonora que popularmente é chamada de "volume" ou "nível de pressão sonora". Como

ocorre com outras grandezas, a percepção da intensidade pelo ouvido humano não é linear, mas sim logarítmica. Isso por que o ouvido só percebe variações de intensidade aproximadamente lineares, se as amplitudes variarem exponencialmente. Para isto foi criada a grandeza de medição da intensidade sonora em relação à percepção auditiva, o decibel (dB), que utiliza uma unidade logarítmica.

Para que sons de diferentes frequências sejam percebidos com a mesma sonoridade, temos as curvas isofônicas, que são curvas de igual volume através das quais é calculada a relação entre a frequência e a intensidade (em decibéis) de dois sons, de tal forma que sejam percebidos com a mesma intensidade pelo ouvido.

2.6 Frequência

O número de vezes que as oscilações ocorrem, ou seja, quantos ciclos completos acontecem por unidade de tempo, é chamado de frequência e a sua percepção é popularmente conhecida por altura. Quanto maior for a frequência de um som, mais agudo ele será. Ao contrário, quando mais baixa for a frequência, mais grave o som será. Para descrever a frequência é utilizada a unidade Hertz (Hz), onde 1Hz corresponde a um ciclo de oscilação por segundo. (BACKUS, 1997.).

O som pode ser representado por uma soma de diversas ondas individuais chamadas de componentes de Fourier e cada uma corresponde a uma determinada frequência múltipla da componente inicial. Essas componentes formam uma série conhecida como série harmônica onde o harmônico de ordem zero é chamado de frequência natural ou fundamental, o segundo e denominado harmônico de primeira ordem ou primeiro harmônico, o terceiro é chamado segundo harmônico e assim sucessivamente (LACERDA, 1961).

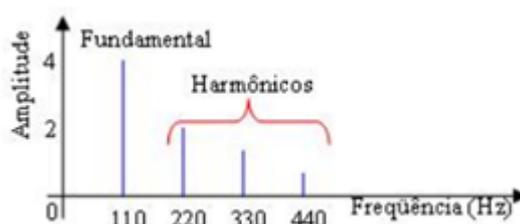


Figura 6 – Espectro de Frequência. Fonte: (FERREIRA, 2006)

A percepção da intensidade não é igual para qualquer frequência. O ouvido humano só consegue perceber sons entre aproximadamente 20 Hz e 20 000 Hz. Próximo a esses limites, a percepção sofre atenuação. A faixa de frequências em que a audição é mais sensível está entre 2 kHz e 5 kHz. A tabela a seguir contém os valores de frequência para as notas em uma oitava do piano.

Note	Frequency (Hz)
A	$220=220 \times 2^{0/12}$
A#	$233=220 \times 2^{1/12}$
B	$247=220 \times 2^{2/12}$
C	$262=220 \times 2^{3/12}$
C#	$277=220 \times 2^{4/12}$
D	$294=220 \times 2^{5/12}$
D#	$311=220 \times 2^{6/12}$
E	$330=220 \times 2^{7/12}$
F	$349=220 \times 2^{8/12}$
F#	$370=220 \times 2^{9/12}$
G	$392=220 \times 2^{10/12}$
G#	$415=220 \times 2^{11/12}$
A	$440=220 \times 2^{12/12}$

Figura 7 – Frequências correspondentes das notas musicais. Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma forma de calcularmos a frequência de cada nota é multiplicando a frequência da nota anterior por $\sqrt[12]{2}$. Sendo assim, pode-se usar este método para determinar as frequências das notas acima e abaixo das notas da Figura 7. Existem doze notas em uma oitava, portanto, subindo uma oitava dobra-se a frequência. O envelope da nota define a amplitude versus tempo.

2.7 Filtros Digitais e modulação

Os filtros podem ser classificados quanto à tecnologia empregada em sua implementação, sendo divididos em filtros analógicos e filtros digitais. Essas duas classificações estão relacionadas ao domínio em quem os sinais são tratados. Os filtros analógicos manipulam sinais analógicos e filtros digitais atuam em sinais digitais (NALON, 2000).

Na forma analógica, os filtros podem ser implementados de duas maneiras: utilizando componentes passivos, como os resistores, capacitores e indutores, ou utilizando componentes ativos, como os amplificadores operacionais, amplificadores operacionais de transcondutância e transistores. Os filtros digitais utilizam processadores digitais para realizar as funções de filtragem no sinal digital. Para realizar a filtragem digital de um sinal analógico, este precisa ser convertido em sinal digital, por meio de um conversor A/D, e, posteriormente, reconstruído a partir de um conversor D/A e um filtro passa-baixa (JÚNIOR, 2003).

Na área de processamento de sinais os filtros digitais representam soluções proeminentes, pois apresentam algumas vantagens consideráveis perante aos filtros analógicos, principalmente nos quesitos flexibilidade, precisão e confiabilidade (PROAKIS; MANOLAKIS, 2007). Boquera (2016) em seu trabalho: “*Implement a chorus effect in a real-time embedded system*” na Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), compara o resultado obtido em sua pesquisa com produtos similares usando várias métricas. Observam-se recursos disponíveis e qualidade de

som. Ele comparou seu experimento com alguns dispositivos, como, por exemplo, Boss CE-5 e TC Electronics Corona Chorus e conclui que com relação aos recursos, o produto desenvolvido por eles contém muito mais recursos do que o CE-5, pois essas são unidades analógicas dedicadas à produção de efeito Chorus apenas e, como tal, incluem apenas um conjunto mínimo de parâmetros configuráveis. Um dos filtros aplicados em seu trabalho foi o *Bandpass resonator*. O ressonador passa banda possui um alto ganho em sua frequência central e baixo ganho em outras frequências. Seu diagrama e respectiva função de transferência são mostrados na figura 8:

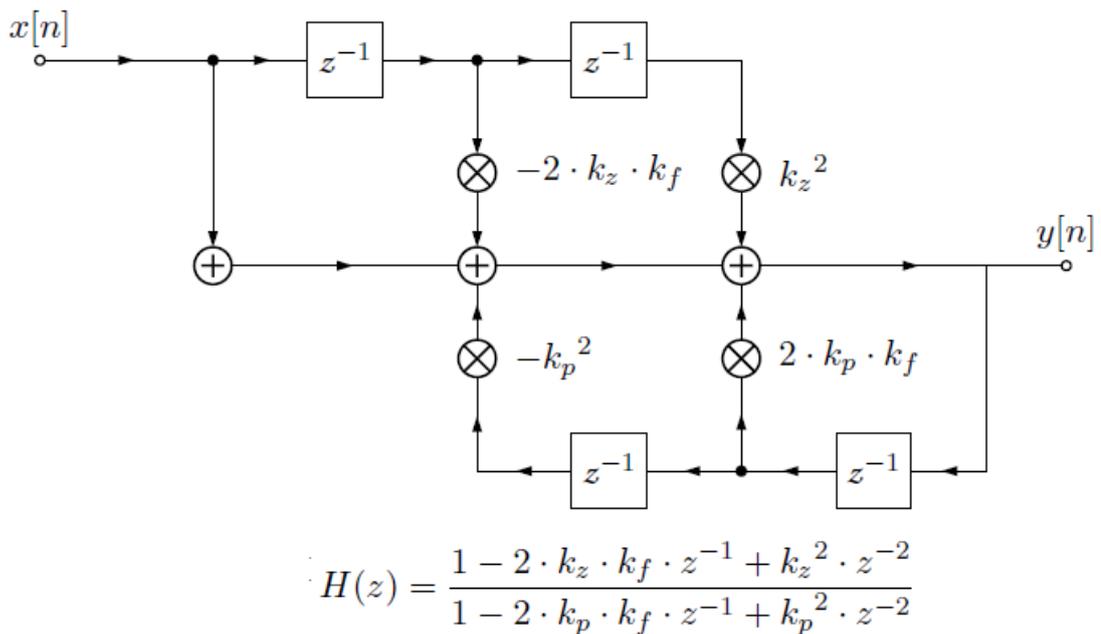


Figura 8 – Band-pass resonator-função de transferência. Fonte: (BOQUERA, 2016)

Boquera (2016) em sua conclusão mostra que em particular, o uso de formas de onda não sinusoidais para retardo modulação, incluindo combinações lineares delas e a possibilidade de modular os parâmetros de osciladores com métricas do sinal de entrada são novidades interessantes dentro da área de estudo de filtros digitais e modulação. Ele cita também que essa metodologia geralmente tem sido bem recebida e outros esforços nessa área poderiam ser direcionados pelo mundo acadêmico ou pela indústria de música eletrônica.

3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

No presente projeto do laboratório de filtros digitais, o objetivo principal é analisar o efeito de uma dada operação do filtro em um sinal de entrada (sonoro ou forma de onda), retornando na saída a característica do sinal recebido na entrada modificado. O usuário ao realizar uma experiência pode selecionar um arquivo ou entrada de áudio e um filtro ou teste específico a ser usado para processar a entrada, podendo em alguns testes especificar o tipo de filtro em tempo real, ou mudar a frequência de corte do filtro. Quando o utilizador especifica as variáveis de entrada, um sinal real é gerado, processado e a saída visualizados no painel frontal, o qual irá ser a interface do usuário.

Todo projeto foi construído em LabVIEW, como mostrado na Figura 9, rodando em uma máquina virtual Oracle VM VirtualBox (que pode ser visto também na imagem a seguir), com o sistema operacional Windows XP. Isso porque a NI só oferece suporte de drivers e para conexão da placa com o DSP para esse sistema. Foram encontrados algumas adaptações pra Windows 7, porém sem suporte da NI.

Primeiramente foram realizados alguns testes com os exemplos disponibilizados pelo módulo DSP para a placa SPEEDY-33. A vantagem de se usar esta VM seria a possibilidade de disponibilizá-la para futuros usuários que queiram estudar ou realizar testes, ou mesmo ser aplicados em aulas práticas. No teste ilustrado na imagem a seguir temos a opção de gravar e visualizar em tempo real as entradas de áudio. Neste caso foi usado um microfone da marca Shure para captar sinal de áudio com ruído e ao lado a produção de um som com uma frequência definida. Logo em seguida testou-se também usando o microfone da própria placa.

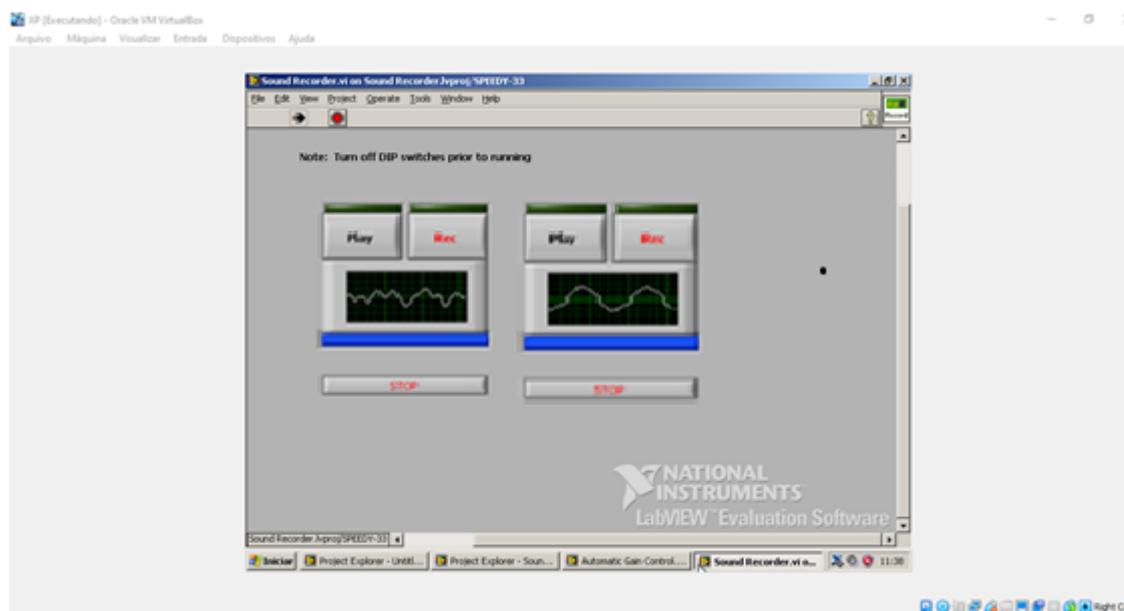


Figura 9 – Máquina virtual do Windows XP-Virtual Box Teste sound recorder com uma entrada de frequência irregular(ruído). Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa ferramenta se mostra muito útil, por exemplo, quando conectado a outros VI, para identificação de notas musicais ou de padrões de afinação.

3.1 Primeiros testes: Exemplos disponibilizados pelo DSP-Speedy-33

3.1.1 Variação dos tipos de saídas e leituras de forma de onda

Neste modelo temos diferentes tipos de leitura e de representação de leitores de frequência.

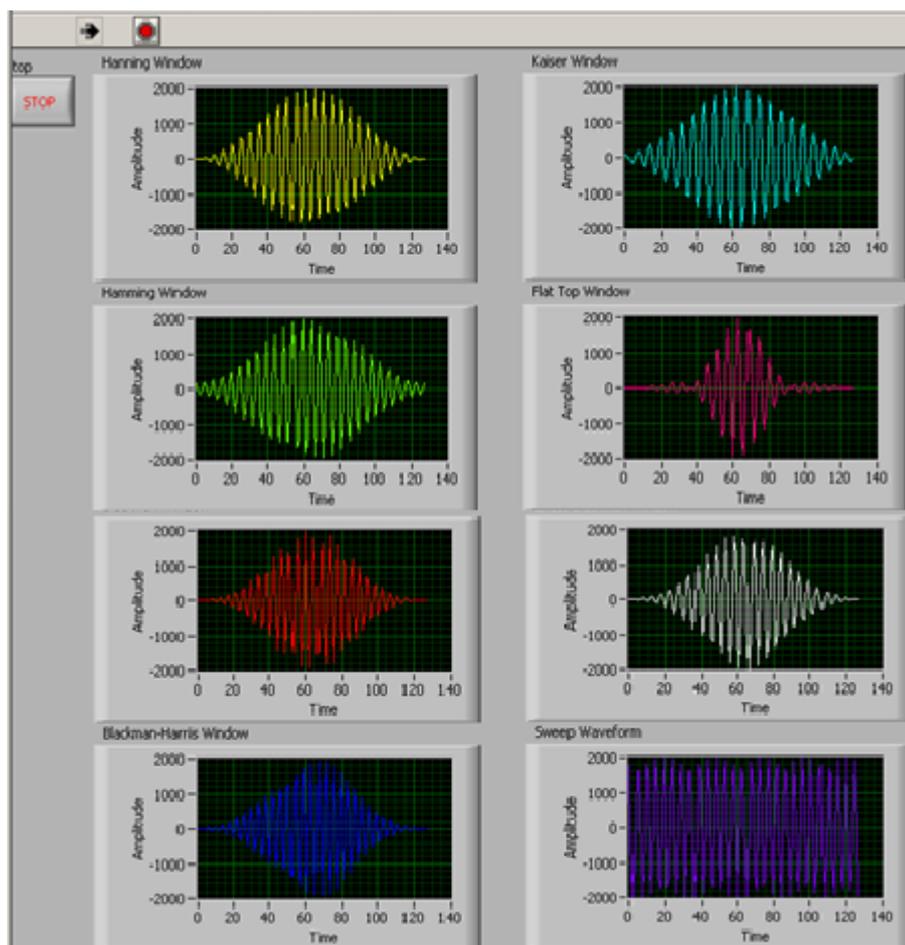


Figura 10 – Variação dos tipos de saídas e leituras de forma de onda. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na entrada temos um gerador de varredura de frequência, conectado a entrada analógica A0 da placa, que é conectado a sub Vi's, que aplicam suas respectivas modulações e filtragens no sinal de entrada. Algumas delas são: A sub.vi Hamming window, a sub.vi Blackman window, a sub.vi Blackman-Harris window, a sub.vi Kaiser-Bessel window e demais outras mostradas na figura 10.

3.1.2 Filtro de parada de banda

No exemplo a seguir, temos um filtro de parada de banda (FIR ou BSF). O Filtro de parada de banda é um tipo de circuito seletivo de frequência, composto da combinação um filtro passa-baixa básico com um filtro passa-alta, assim, podemos formar um filtro passa-banda simples que vai passar um intervalo ou banda de frequências compreendida entre dois pontos de frequência de corte.

O filtro de parada de banda, também conhecido como filtro de rejeição de banda, corta todas as frequências com exceção daquelas dentro de uma faixa de parada especificada, estas que são bastante atenuadas.

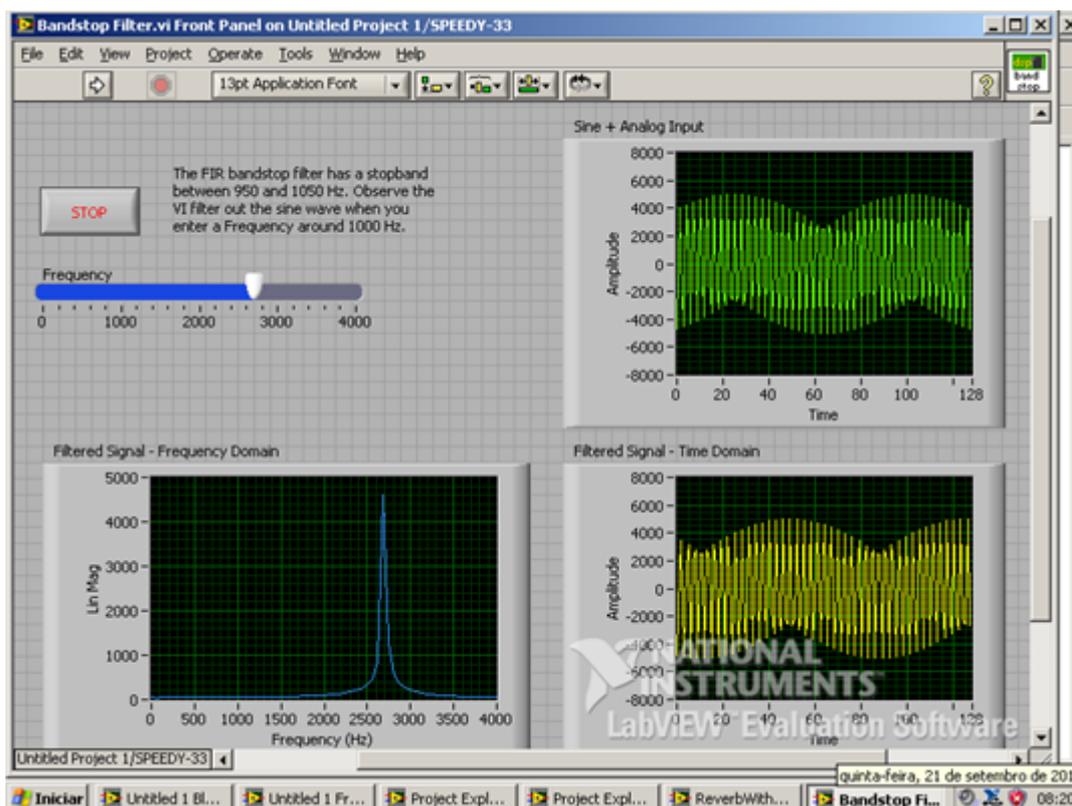


Figura 11 – Filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.

Temos uma faixa de corte de parada entre 950 e 1050 Hz. No primeiro monitor (gráfico em azul) temos o sinal filtrado no domínio da frequência, ao lado (em amarelo) temos o sinal filtrado no domínio do tempo, e acima (em azul) temos a onda mais o sinal de entrada, que pode ser ajustado no slide de frequência à esquerda.

3.2 Dados e Experimentos

3.2.1 Análise da adição de efeitos e Reverb com controle de ganho, Pan e depth

Um dos tipos de efeitos mais utilizados em processamento de áudio, o reverb, visa simular um espaço acústico no qual o som é produzido. Em um ambiente qualquer, as ondas sonoras são refletidas ao encontrarem uma superfície refletora. Essas primeiras reflexões (*early reflections*) são seguidas de outras reflexões menos intensas e mais atrasadas em relação ao sinal inicial. A soma de todas essas componentes cria o efeito de reverberação.¹ Pode-se alcançar os efeitos do reverb utilizando uma série complexa de atrasos de um mesmo sinal. O monitor do teste é mostrado na figura a seguir:

¹ Disponível em: <http://www2.eca.usp.br/prof/iazzetta/tutor/audio/efeitos/effx.html> Reverb Acesso em: 17 de dez. às 15h43

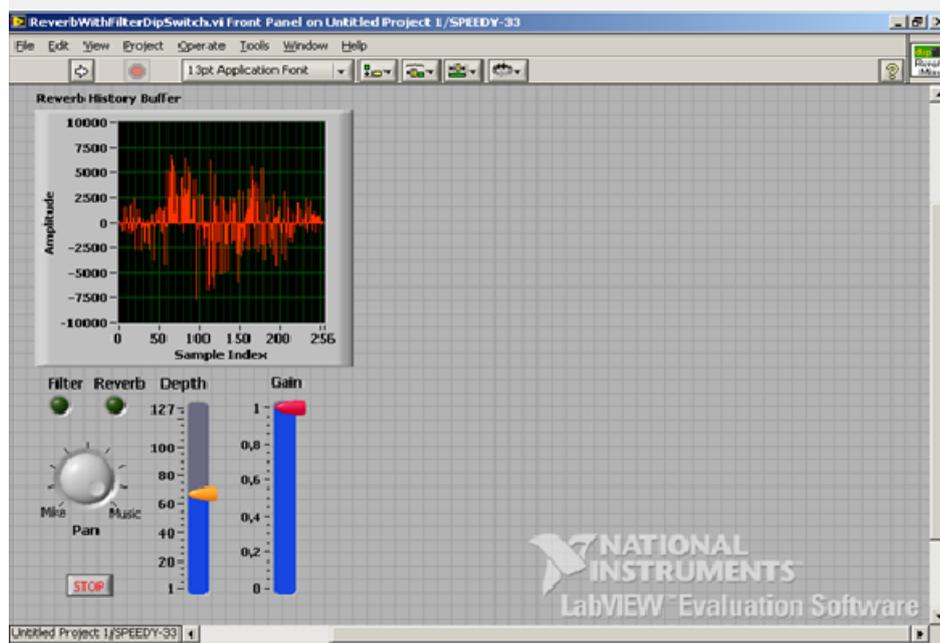


Figura 12 – reverberação com filtro DSP. Fonte: Elaborada pelo autor.

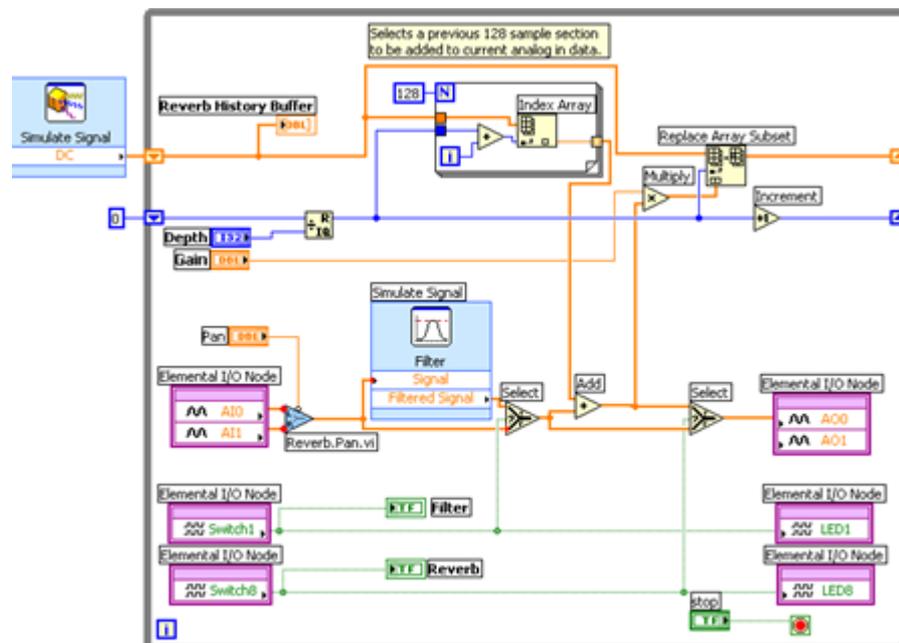


Figura 13 – Diagrama de blocos do teste reverberação com filtro DSP. Fonte: Elaborada pelo autor.

Como entradas, temos um modulador de sinais alternados, juntamente com as entradas de microfones da placa. As entradas passam por um Reverb History Buffer, que registrará no monitor o histórico do sinal de entrada. Conectando ambos os simuladores de sinal, temos um multiplicador, que logo em seguida é conectado a um conversor de sinais que converterá o sinal para ser mostrado no gráfico de forma de onda, e deriva outra saída que é direcionada para a porta

de áudio da placa. O controle de Pan (Mic e Music) são conectados a uma sub VI Reverb.Pan.vi no qual seu funcionamento é demonstrado na figura 14 a seguir:

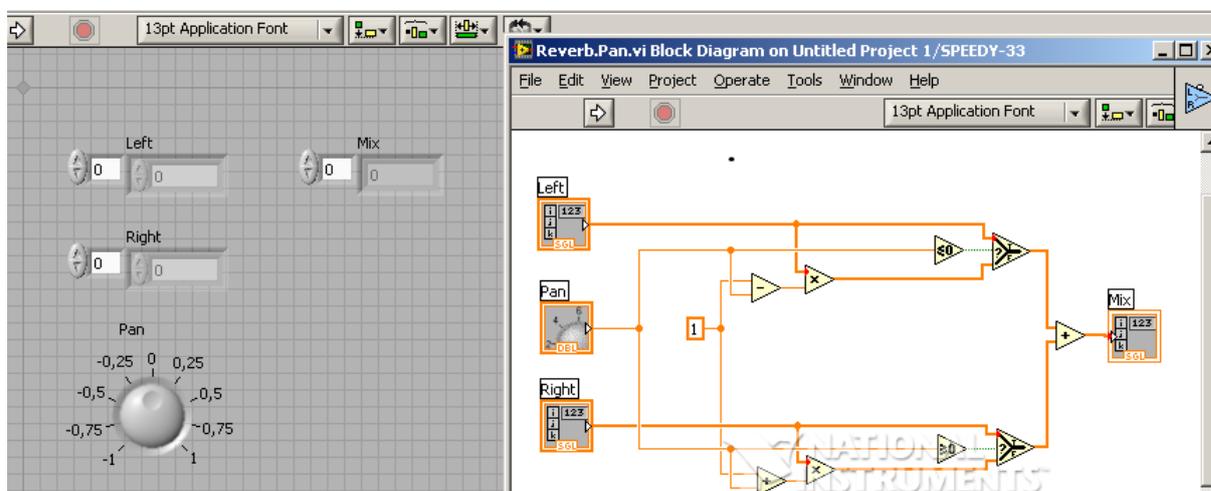


Figura 14 – Sub VI Reverb.Pan.vi. Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, na figura 15, temos as configurações usadas neste teste no filtro.

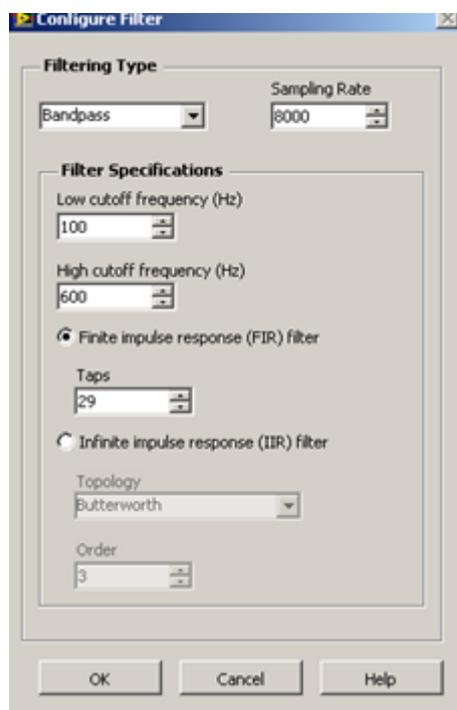


Figura 15 – Configurações usadas no teste. Fonte: Elaborada pelo autor.

No gráfico temos duas faixas de frequência representadas. O microfone esquerdo da placa é representado pela amplitude negativa e o microfone direito é representado pela frequência positiva. Temos dois modos disponíveis, Music e Mic. Ao ativar o modo music aumenta-se

a atenuação e a sensibilidade dos filtros e do microfone, sendo possível captar com maior sensibilidade.

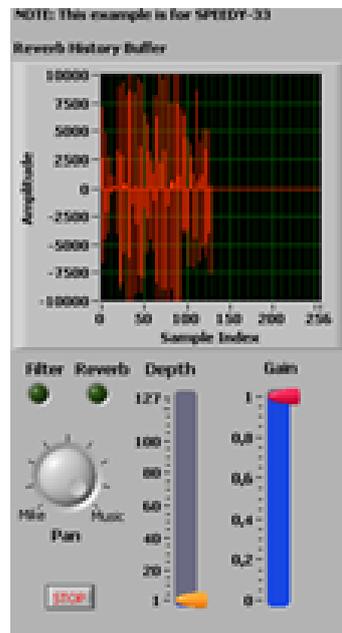


Figura 16 – Filtros e depth desativado. Fonte: Elaborada pelo autor.

Os filtros e o Reverb são ativados a partir das entradas digitais (chaves) um e dois.

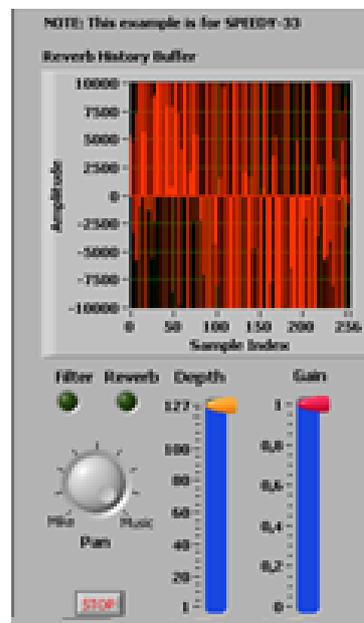


Figura 17 – Reprodução em modo music, sem o filtro ativado. Fonte: Elaborada pelo autor.

O Filtro BandPass filtra os extremos, deixando passar somente os graves ou agudos, a partir das frequências estipuladas. Por exemplo, neste caso ele filtra o que está especificado nas configurações. Na imagem a seguir temos o filtro e reverb ativos.

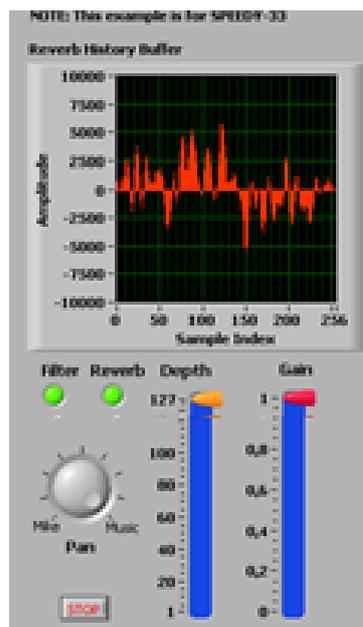


Figura 18 – Reprodução em modo music, com filtros e reverb ativos. Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao adicionar o reverb, observa-se que as frequências são refletidas também como era esperado. Essas primeiras reflexões (early reflections) são seguidas de outras reflexões menos intensas e mais atrasadas em relação ao sinal inicial.

3.2.2 Controle de ganho automático.

Neste experimento foi usada a ideia do controle automático de ganho, que é uma técnica usada na eletrônica analógica, na qual consiste em um laço de realimentação, que atua sobre o ganho de um amplificador de forma manter a amplitude de saída do sinal dentro de uma faixa de valores pré-determinada. Estes circuitos são utilizados em diversas áreas de aplicação, como em controladores de volume em rádios AM e estabilizadores de amplitude em osciladores eletrônicos.

No experimento temos uma entrada que pode ser ajustada e controlada através do ajuste de amplitude e de frequência do sinal de entrada. Este sinal é exibido no *monitor input signal*. A amplitude média da saída, que é o valor no qual se deseja setar, pode ser ajustada no ícone AGC Amplitude. Sua saída é exibida no painel AGC Result. O painel do experimento é mostrado a seguir na figura 19, juntamente com sua representação em diagrama de blocos:

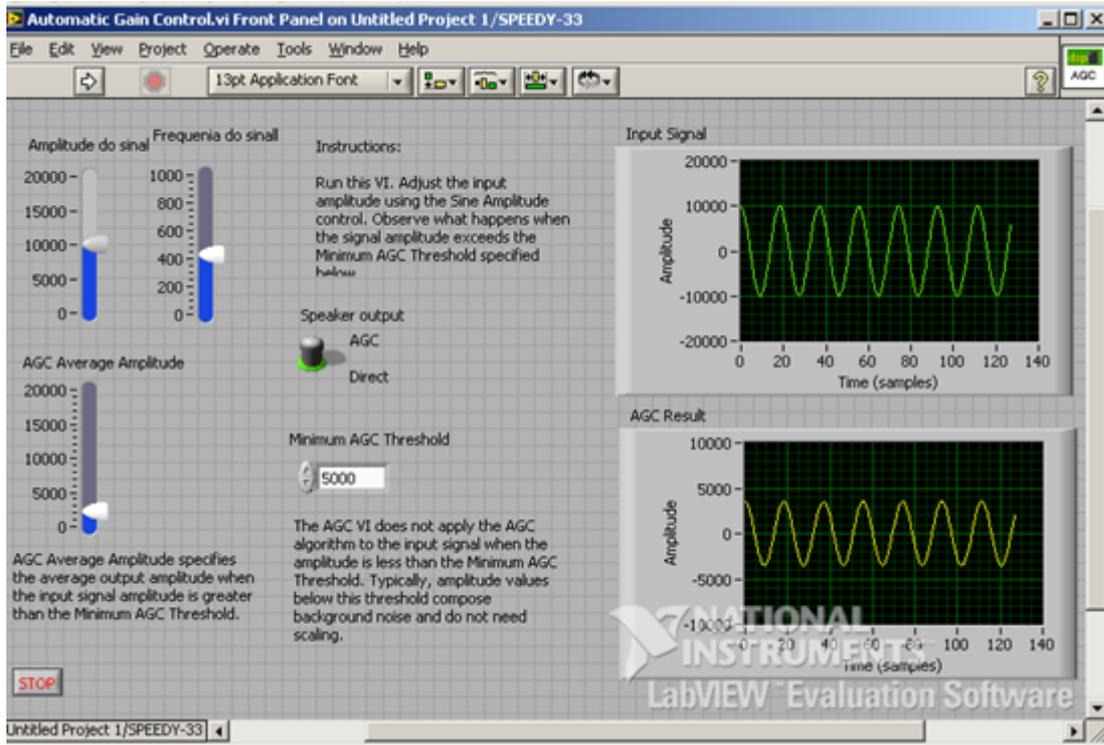


Figura 19 – Simulação de Controle de ganho automático. Fonte: Elaborada pelo autor.

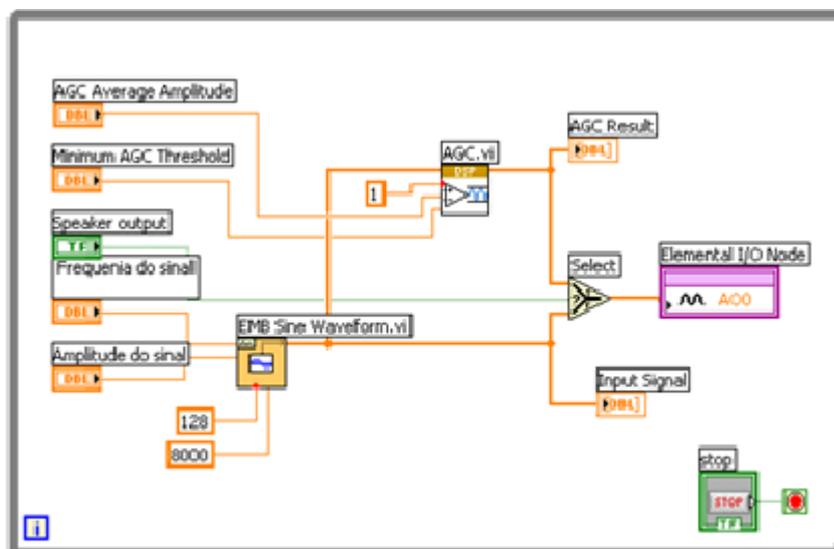


Figura 20 – Diagrama de blocos da simulação de Controle de ganho automático. Fonte: Elaborada pelo autor.

Para seu funcionamento, primeiramente é necessário fazer o ajuste da amplitude de entrada usando o controle de amplitude senoidal. É interessante observar o que acontece quando a amplitude do sinal excede o limite mínimo do AGC especificado. A amplitude média especifica é a amplitude média de saída quando a amplitude do sinal de entrada é maior que o limite mínimo do AGC. O VI do AGC não aplica o algoritmo AGC ao sinal de entrada quando a amplitude é

menor que o limite mínimo do AGC. Normalmente, os valores de amplitude abaixo desse limite compõem o ruído de fundo e não precisam de escala.

3.2.3 Heterodyne

Heterodyne é uma técnica de processamento de sinal inventada pelo engenheiro canadense Reginald Fessenden. O heterodyne cria novas frequências combinando ou misturando duas frequências. A heterodinâmica é usada para mudar uma faixa de frequência para outra, nova, e também está envolvida nos processos de modulação e desmodulação.

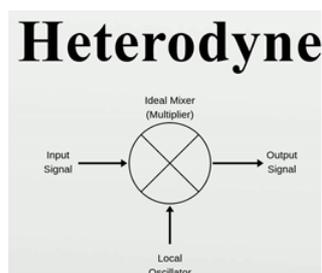


Figura 21 – Diagrama de blocos da simulação heterodyne. Fonte: Elaborada pelo autor.

A heterodyne, também chamada de conversão de frequência, é amplamente utilizada na engenharia de comunicações para gerar novas frequências e mover informações de um canal de frequência para outro. Por exemplo, um cabo coaxial usado por um sistema de televisão a cabo pode transportar 500 canais de televisão ao mesmo tempo, porque cada um recebe uma frequência diferente, para que não interfira um no outro.

Na fonte a cabo, os conversores ascendentes eletrônicos convertem cada canal de televisão recebido em uma nova frequência mais alta. Eles fazem isso misturando a frequência do sinal de televisão, com um oscilador local com uma frequência muito maior, criando um heterodyne na soma, que é adicionada ao cabo. Na casa do consumidor, o decodificador de cabos possui um downconverter que mistura o sinal de entrada na frequência com a mesma frequência do oscilador local criando a diferença de frequência heteródina, convertendo o canal de televisão em sua frequência. Cada canal é movido para uma frequência superior diferente. A frequência básica mais baixa original do sinal é chamada banda base, enquanto o canal mais alto para o qual é movido é chamado banda passante.

No experimento seguir, buscou-se simular um Heterodyne, que pode ser visto no diagrama da figura 22. Logo em seguida é mostrado a interface no LabVIEW na figura 23.

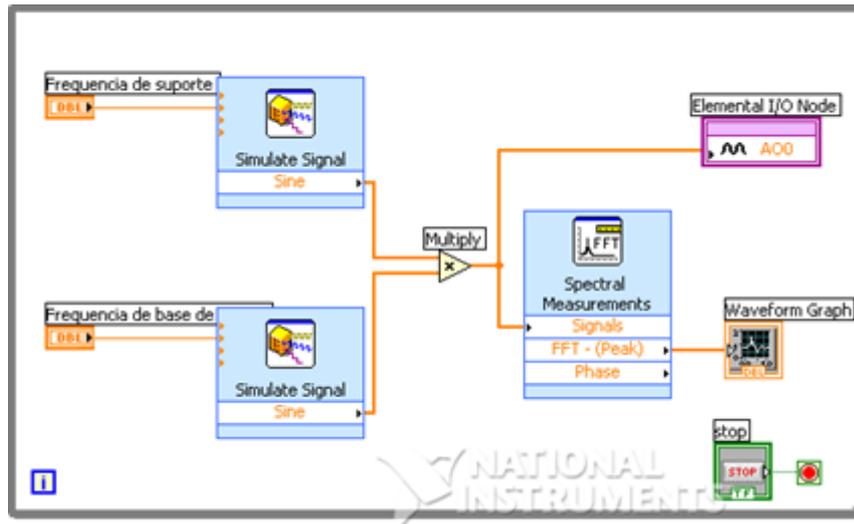


Figura 22 – Diagrama de blocos da simulação Heterodyne. Fonte: Elaborada pelo autor.

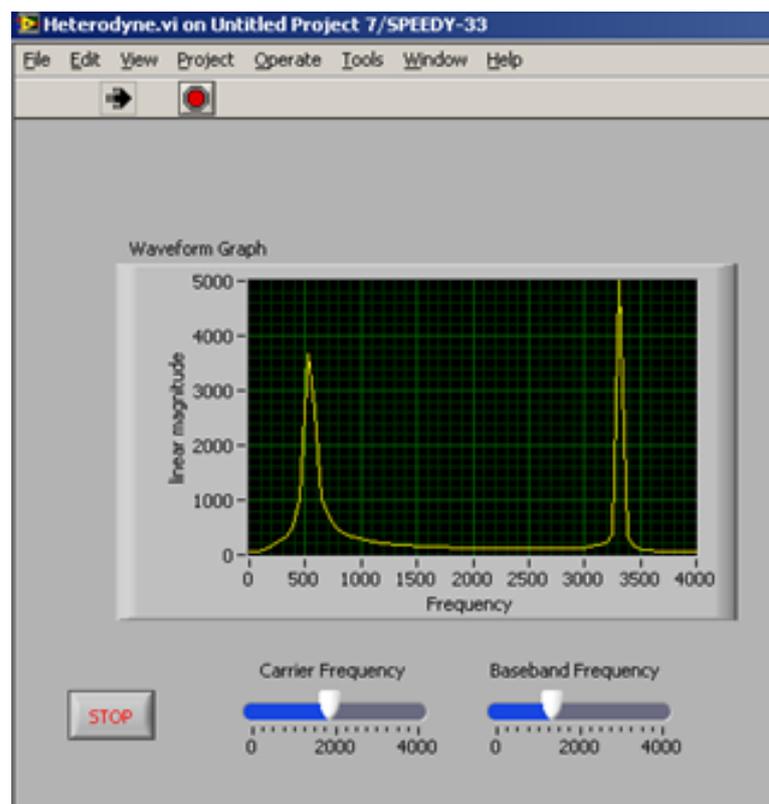


Figura 23 – Painel da simulação Heterodyne. Fonte: Elaborada pelo autor.

Temos como entrada, a frequência de suporte e frequência de base de banda, que é a banda de frequência encarregada de todos os sinais transmitidos usados para modular uma porta para transmissão. Após o sinal de entrada, temos dois simuladores de sinais, que foram configurados conforme apresenta a figura a seguir:

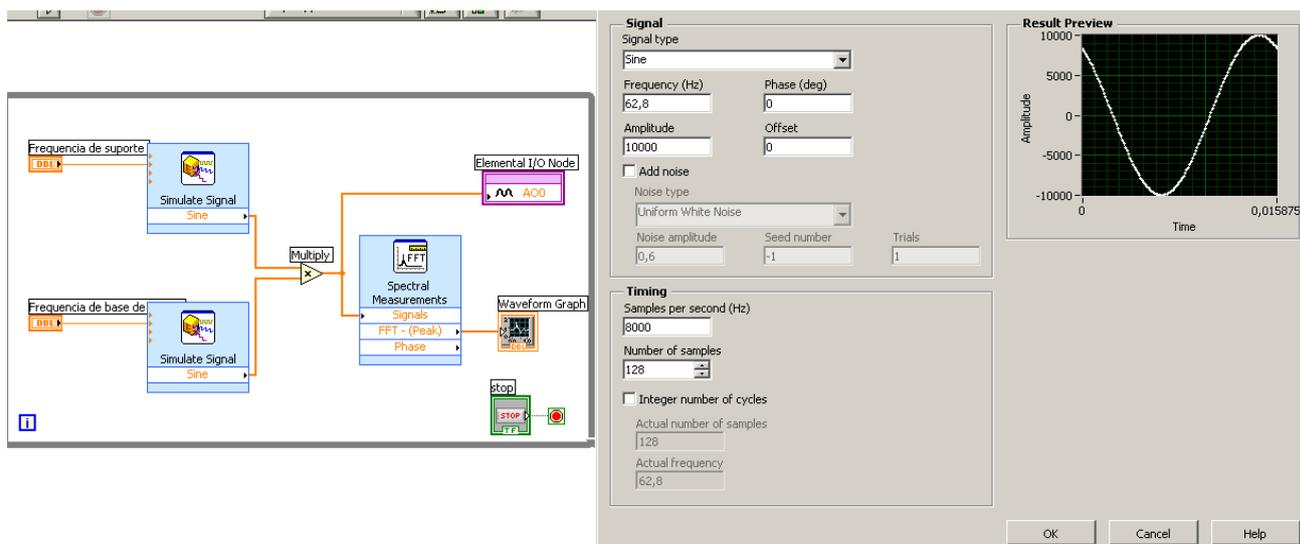


Figura 24 – Configuração do simulate signal. Fonte: Elaborada pelo autor.

Conectando ambos os simuladores de sinal, temos um multiplicador, que logo em seguida é conectado a um conversor de sinais que converterá o sinal para ser mostrado no gráfico de forma de onda, e deriva outra saída que é direcionada para a porta de áudio da placa.

3.2.4 Modulação de sinais

Um elemento essencial do uso de sinais modulados em amplitude é o processo de desmodulação ou detecção. A desmodulação é um processo fundamental na recepção de quaisquer sinais modulados em amplitude. A desmodulação é o processo pelo qual a modulação é extraída do sinal recebido. O processo de desmodulação de sinais usando modulação de amplitude pode ser alcançado em várias técnicas diferentes, cada uma das quais tem sua própria vantagem. No respectivo experimento temos um sinal de entrada de frequência pré-setada, no qual podemos verificar que a aplicação do processo de modulação e desmodulação é uma boa escolha quando se precisa remover ruídos de alta frequência de um sinal digital.²

² Disponível em: <<https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/amplitude-modulation-am-demodulation-detection.php>> Acesso em: 10 de dez. às 15h43

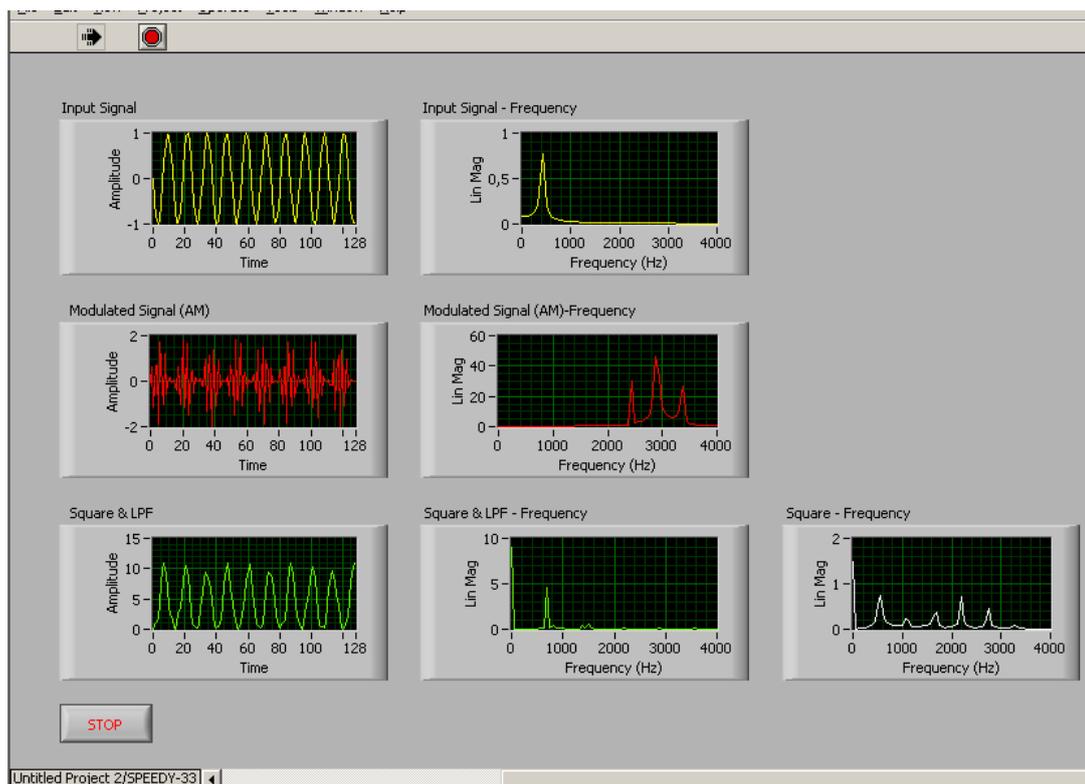


Figura 25 – Modulação de sinais e filtros. Fonte: Elaborada pelo autor.

No modelo da figura 25 temos o efeito de cada uma das etapas do teste e suas respectivas formas de onda (saída). Um modulador AM é basicamente um multiplicador que multiplica a amplitude portadora (o sinal de alta frequência) pelo sinal modulador de baixa frequência (informação a ser transmitida). O desmodulador AM é basicamente um filtro passa-baixa, que elimina a componente de alta frequência (portadora), recuperando a informação do sinal de baixa frequência. Quando se multiplica o sinal de baixa frequência pelo sinal de alta frequência, a frequência resultante é a amplitude do sinal de alta frequência modulada pelo sinal de baixa frequência. Podemos depois recuperar o sinal de baixa frequência, realizar a filtragem do sinal. Para entender melhor, temos a seguir na figura 26 o diagrama de blocos do respectivo experimento:

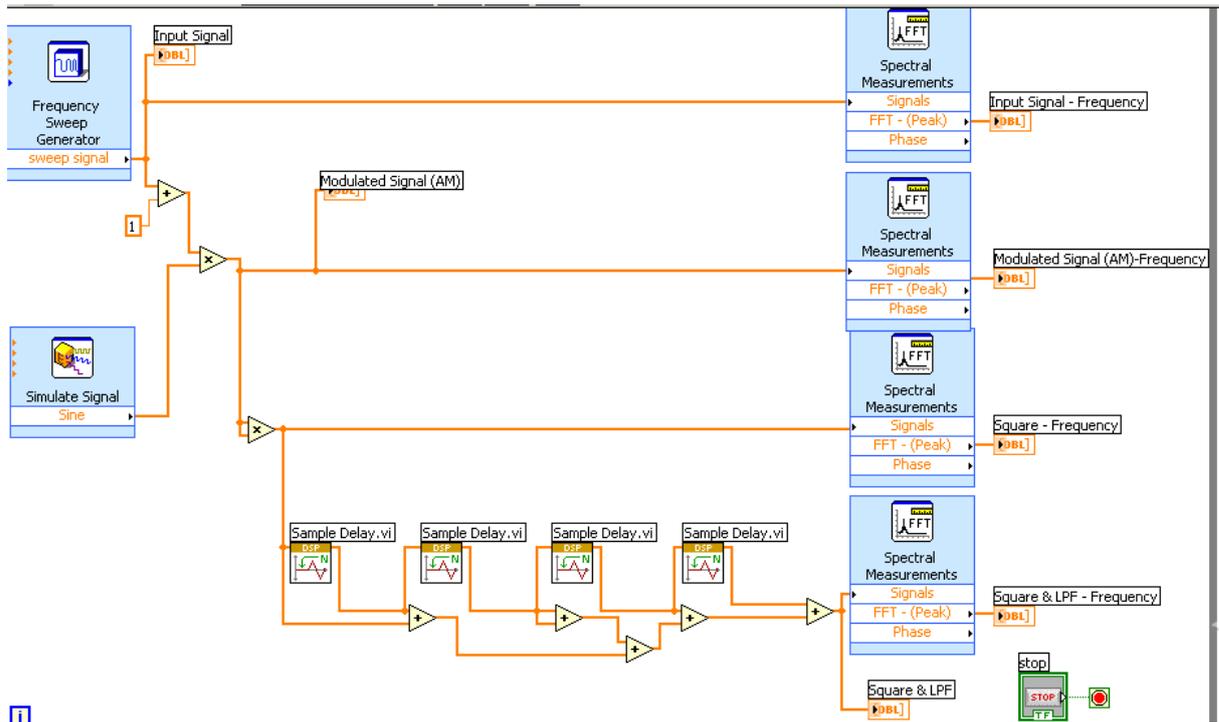


Figura 26 – Modulação de sinais-Diagrama de blocos. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na entrada temos um gerador de varredura de frequência, sinal esse que é multiplicado por um simulador de sinais, cuja saída é mostrada na primeira linha da figura 25. O resultado desse produto é dividido entre duas partes: A primeira vai para um modulador de sinais AM, que é conectado a um monitor e tem seu sinal de onda resultante e de sua entrada mostrado na segunda linha da figura 25. A segunda ramificação é conectada a uma série de sub Vi's, onde são aplicados *delays* e filtros passa-baixa. Os sinais de entrada do bloco e as respostas das operações são mostrados na terceira linha da figura 25.

3.2.5 O filtro de parada de banda

O filtro de parada de banda é um filtro que permite a passagem da maioria das frequências inalteradas, porém atenua aquelas que estejam em uma faixa determinada pelo filtro. O princípio de funcionamento é o oposto do filtro passa-faixa.

Dentro de uma faixa de frequência pré-selecionada, podemos filtrar todas as frequências acima e abaixo dessas frequências. Por exemplo, dado uma faixa de frequência entre 400 e 3.000 Hz. A faixa de frequência entre esses valores (400 e 3.000 Hz), as quais não são filtradas, são conhecidas como banda passante (“*passband*”) e a faixa de frequência que é bloqueada é conhecida como banda rejeitada (“*stopband*”).

Alguns filtros podem ser utilizados para realizar a estas operações de filtragem de sinal dentro de uma determinada faixa útil. Alguns exemplos são filtros de resposta finita ao impulso

(*FIR – Finite Impulse Response*), filtros de resposta infinita ao impulso (*IIR – Infinite Impulse Response*) e filtros adaptativos. (LUZ, 2010). A figura 27, mostra o painel do teste do filtro, aplicado a frequências mais baixas.

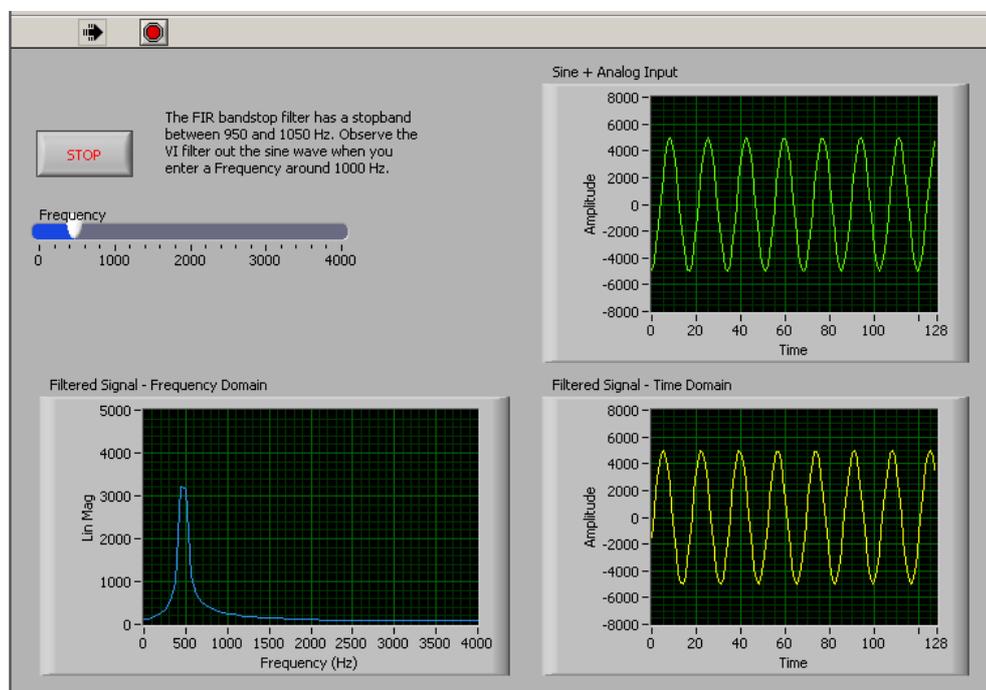


Figura 27 – Filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.

O filtro de parada de banda FIR apresenta algumas vantagens interessantes, quando se comparado por exemplo aos filtros IIR (Infinite Impulse Response). Podemos citar, por exemplo, o comportamento inerentemente estável, no qual ele não usa realimentação, a resposta em fase linear e também a facilidade de implementação (ASSEF et al.,). Temos na figura 28 a representação em diagrama de blocos do teste, com o painel de configuração usado no filtro.

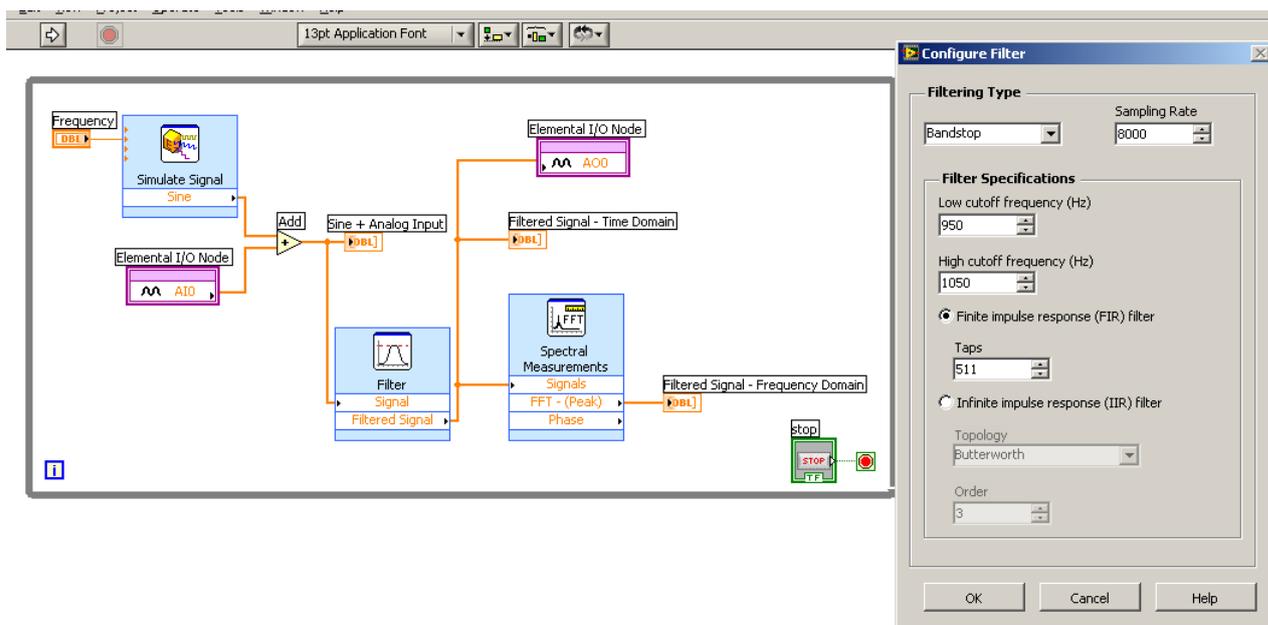


Figura 28 – Filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.

Temos nos monitores das figuras 29 e 30, o sinal de entrada filtrado e sua frequência, o sinal da entrada senoidal + analógica e na saída o sinal filtrado no domínio do tempo. A imagem a seguir demonstra a aplicação do filtro em frequências mais altas.

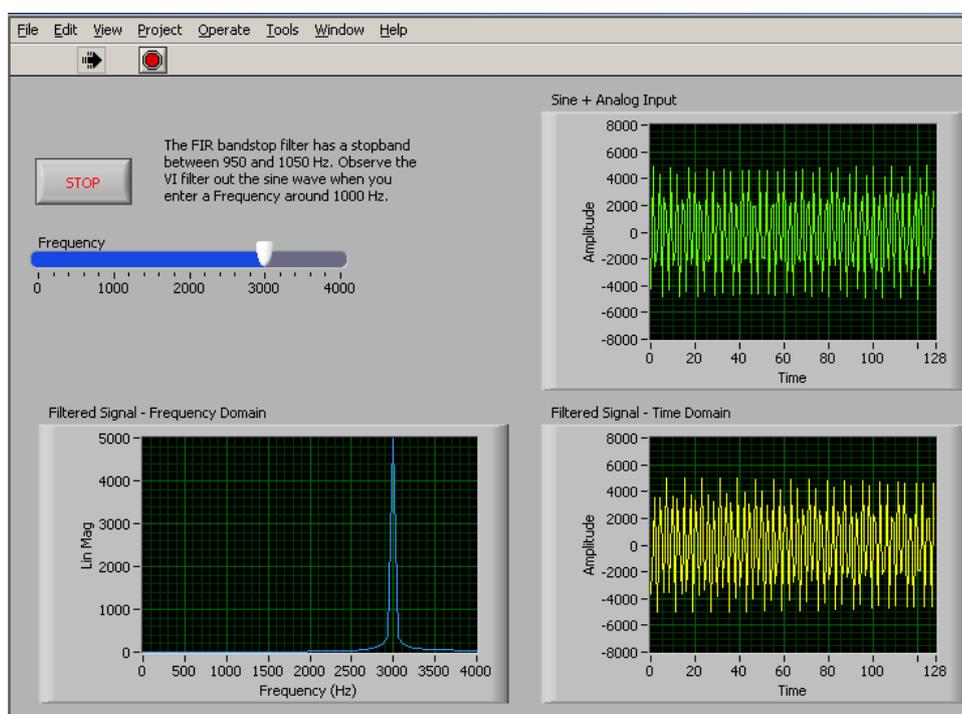


Figura 29 – Filtro de parada de banda com frequência mais alta

Logo em seguida, temos a configuração do sinal de entrada.

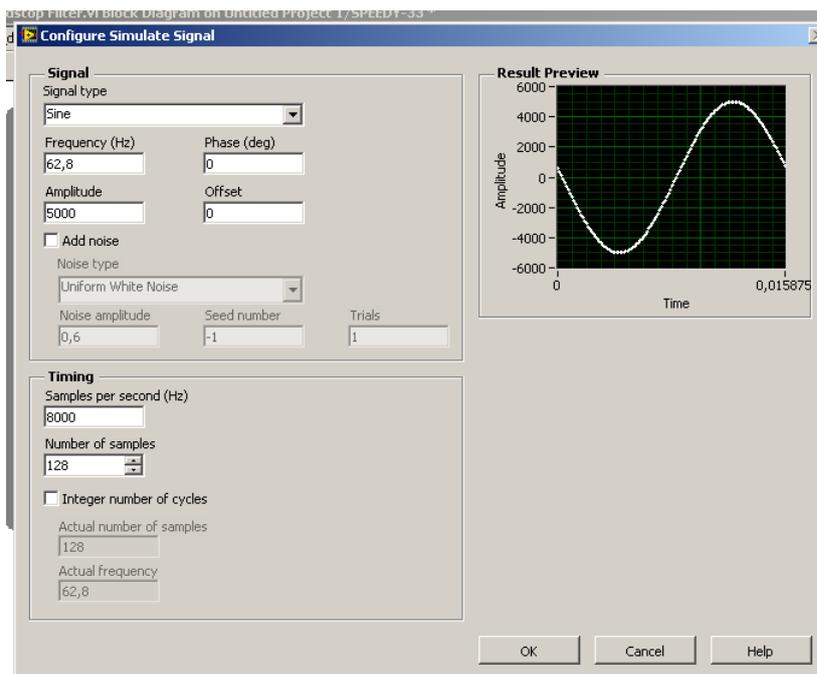


Figura 30 – Configuração don sinal de entrada do filtro de parada de banda. Fonte: Elaborada pelo autor.

Configurou-se neste caso o filtro FIR para operar em uma faixa de parada entre 950 e 1050 Hz. Observa-se o filtro VI tender para fora da onda senoidal ao inserir uma frequência em torno de 1000 Hz. Um filtro FIR com fase linear é utilizado principalmente para aplicações que desejam eliminar distorções em transmissões. Um filtro FIR de fase linear tem correspondência com a simetria da resposta ao impulso do filtro, pois a simetria garante que a resposta em frequência do filtro não altera a fase do sistema (PROAKIS; MANOLAKIS, 2007).

3.2.6 Filtro LMS

O filtro LMS (least mean square) é uma classe de filtro adaptativo usado para imitar um filtro desejado, encontrando os coeficientes de filtro relacionados à produção do quadrado mínimo médio do sinal de erro (diferença entre o sinal desejado e o real). Ele utiliza um método de gradiente estocástico, no qual o filtro é adaptado com base no erro no momento atual. Neste teste, temos na entrada dois geradores de varredura de frequência e um simulador de sinal DC uniforme. Na imagem 34 é mostrado as configurações usadas na entrada e a comparação entre a saída com o filtro ativo e inativo (figuras 31 e 32).

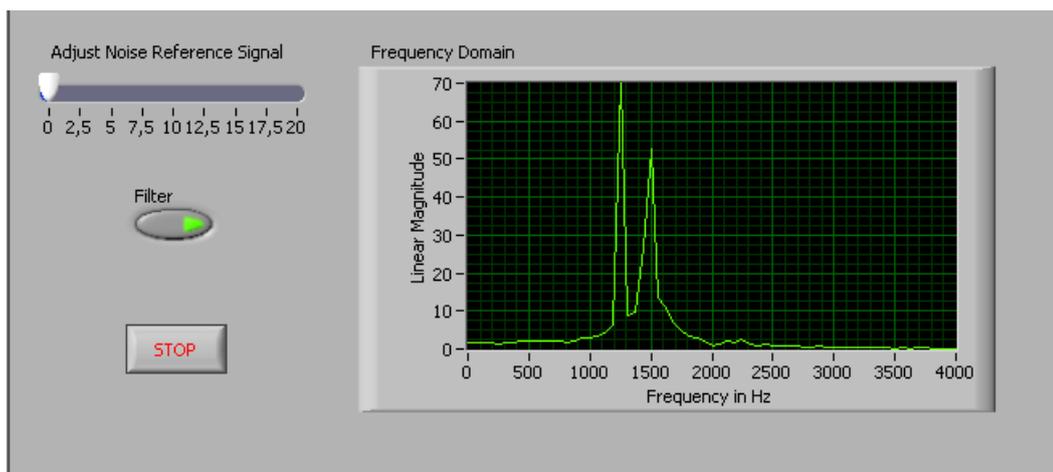


Figura 31 – Filtro LMS ativo. Fonte: Elaborada pelo autor.

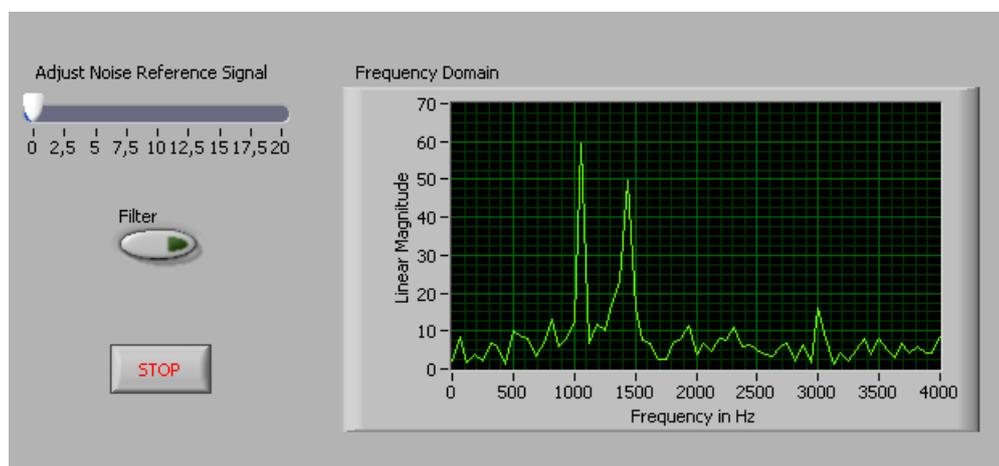


Figura 32 – Filtro LMS inativo. Fonte: Elaborada pelo autor.

Temos na figura 33, o diagrama de blocos do teste. Temos na entrada um gerador de sinais DC uniforme, com dois geradores de varredura de frequência. Estas entradas são somadas e aplicadas ao filtro, que na figura 33 está na posição central (*LMS.Delay Filter*).

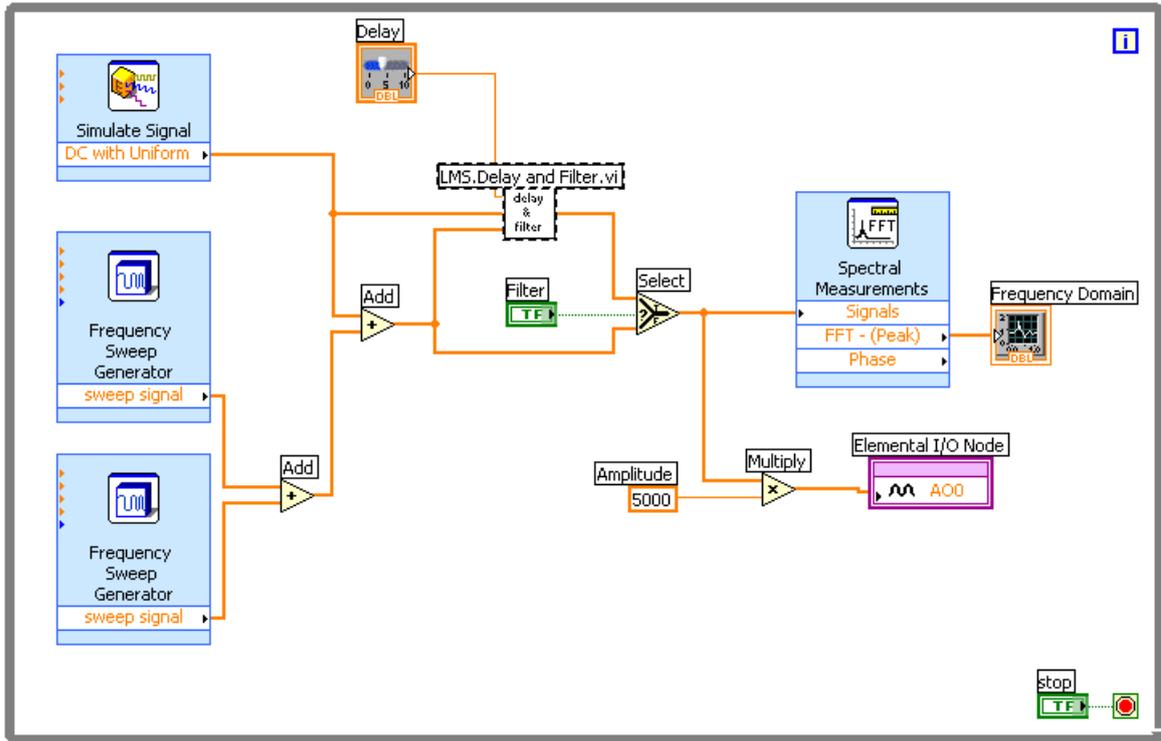


Figura 33 – Filtro LMS-Diagrama de blocos. Fonte: Elaborada pelo autor.

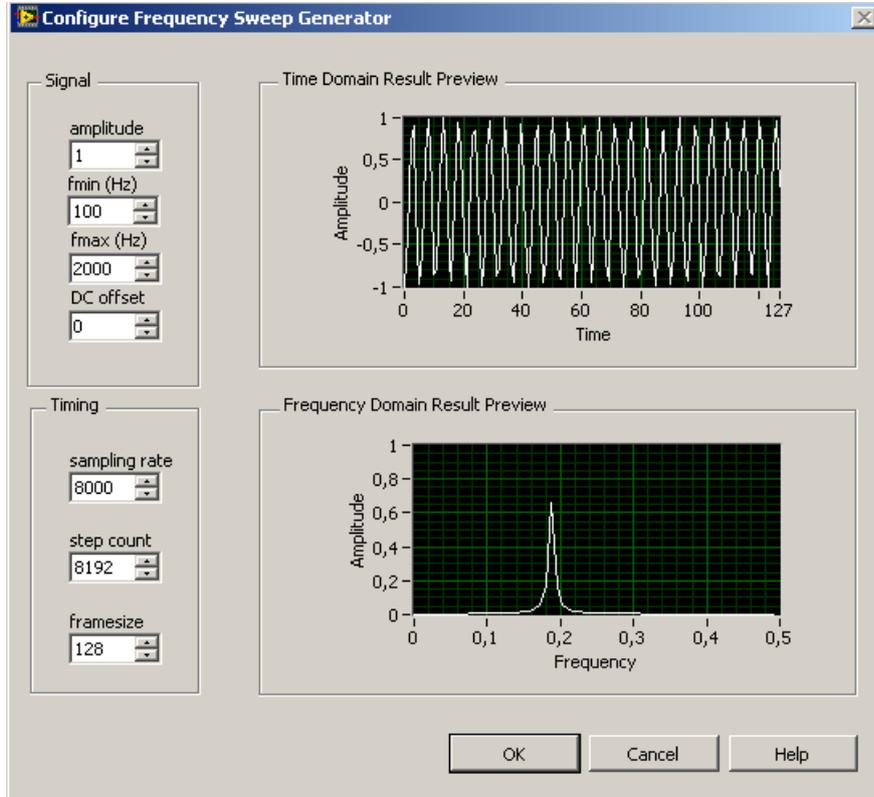


Figura 34 – Configuração do gerador de varredura de frequência. Fonte: Elaborada pelo autor.

Temos na figura 34 a configuração do gerador de varredura de frequência. Expandindo-se

o filtro (que é um Sub VI), temos as suas configurações mostradas na figura 35 a seguir:

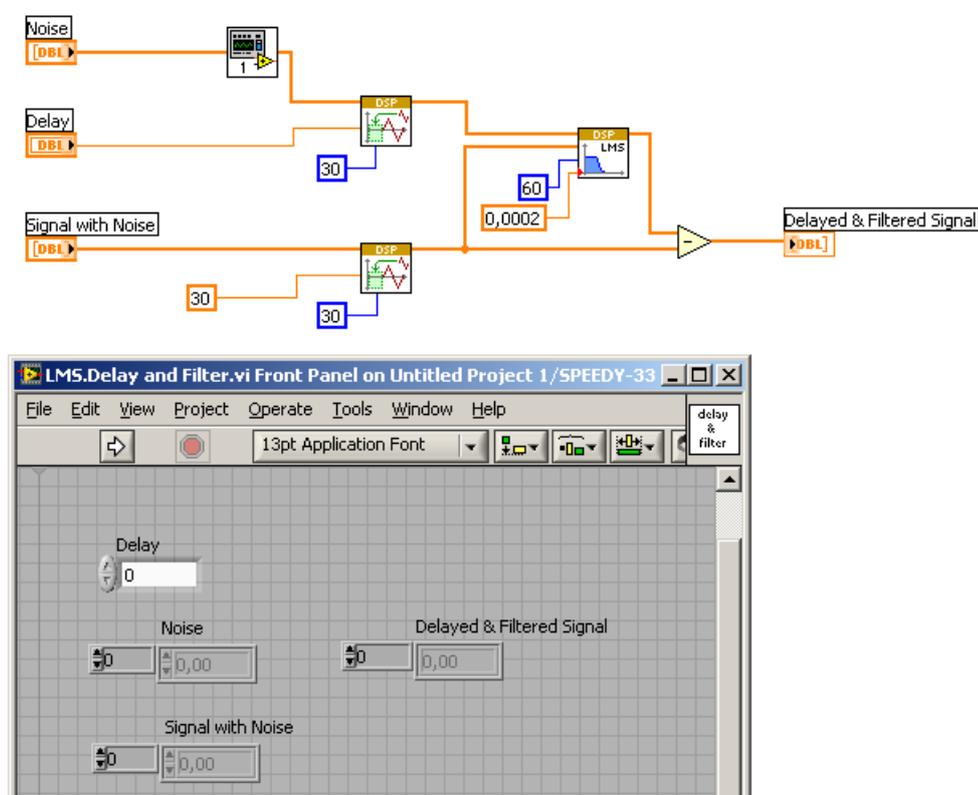


Figura 35 – Configuração do filtro utilizado. Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.7 Filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem (Fourth-Order Chebyshev low pass filter)

Os filtros Chebyshev são filtros analógicos ou digitais que possuem um aumento na atenuação e uma maior ondulação na banda passante. Os filtros Chebyshev possuem a propriedade de minimizarem o erro entre as características do filtro idealizado e o atual com relação à faixa do filtro, porém com ondulação na banda passante. Seu nome vem da derivação dos polinômios de Pafnuty Chebyshev, como também das suas características matemáticas (JR, 2015).

Este exemplo implementa um filtro digital passa-baixa Chebyshev de quarta ordem através do uso de filtros de baixo nível com estágios biquadrados, representados pela função de transferência mostrada a seguir:

$$H(z) = \frac{0.001836 (1 + z^{-1})^4}{(1 - 1.4996 z^{-1} + 0.8482 z^{-2}) (1 - 1.5548 z^{-1} + 0.6493 z^{-2})}$$

Figura 36 – Função de transferência do filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem. Fonte: Elaborada pelo autor.

A equação acima é um componente do Sub Vi do filtro de Chebyshev (é gerada ao adicionar o componente). Nos filtros de Chebyshev, o número de máximos na banda passante é o número de polos do filtro. Ele possui uma resposta de ondulação igual na banda passante e decresce continuamente na banda de rejeição. Todos os zeros do filtro de Chebyshev estão no infinito. O número de máximos na banda passante é o número de polos do filtro.

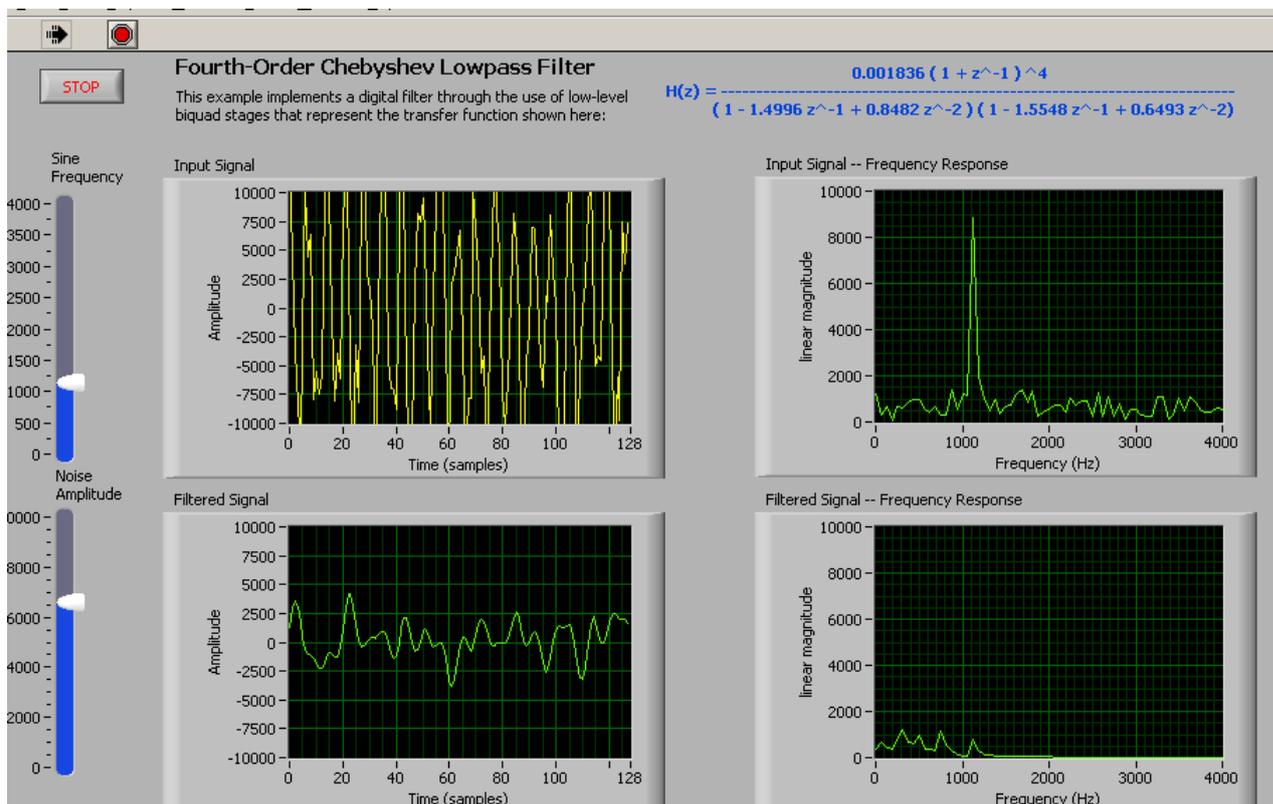


Figura 37 – Painel do filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem. Fonte: Elaborada pelo autor.

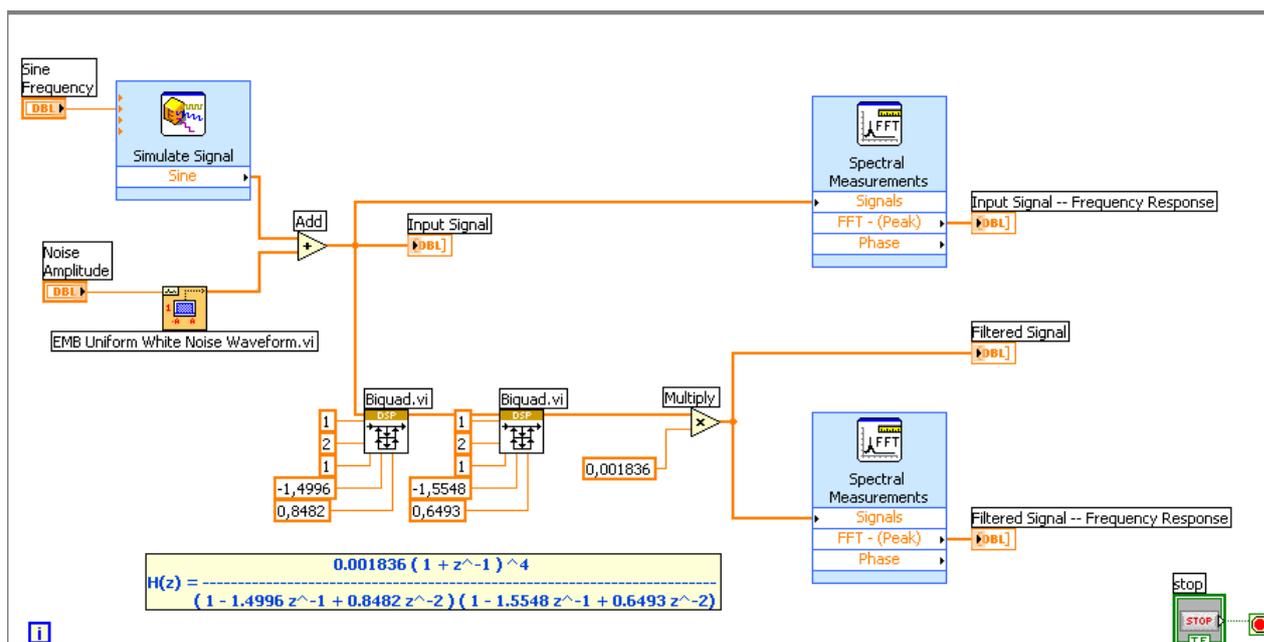


Figura 38 – Diagrama de blocos do filtro passa-baixa Chebyshev de quarta ordem. Fonte: Elaborada pelo autor.

A implementação do Chebyshev oferece um *roll-off* (queda suave da resposta a zero em cada extremidade da faixa de frequência de um equipamento de áudio) muito mais íngreme, porém possui ondulações na banda de passagem, portanto, não é útil em sistemas de áudio. No entanto, é muito superior em aplicações onde existe apenas uma frequência presente na banda passante, mas várias outras que precisam ser removidas (por exemplo, derivar uma onda senoidal de uma onda quadrada filtrando os harmônicos)³. Existe uma implementação mais popular, chamada Elliptical Filter, bem mais complexa de se implementar, e, portanto, não será discutida neste trabalho. Semelhante à resposta de Chebyshev, apresenta ondulação na banda passante e rolagem severa à custa da ondulação na banda parada.

3.2.8 Music Composer

Existe uma forte conexão entre a música e a matemática que vem da mais remota antiguidade. De acordo com a notícia on-line do jornalista José Evangelista, viabilizada pelo site O Povo⁴, historicamente temos:

"Pitágoras e seus discípulos, cinco séculos antes de Cristo, observaram que os sons de cordas vibrantes são agradáveis aos nossos ouvidos quando combinados em grupos nos quais as frequências seguem proporções de números inteiros pequenos, como 3/2 ou 5/4. Essa escala natural, ou pitagórica, foi substituída por outra na qual as frequências sonoras estão igualmente divididas em intervalos

³ Editado. Disponível em: <http://www.simonbramble.co.uk/techarticles/active_filters/active_filter_design.html> Acesso em: 28 de dez. de 2019.

⁴ Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/jornal/colunas/aquitemciencia/2017/06/visualizando-os-acordes-musicais.html>> Acesso em: 16 de nov. de 2019.

iguais. Essa é a escala dita temperada, usada desde a Renascença. Na escala temperada, as relações entre as frequências das notas aproximam-se, mas não são iguais, a frações de números inteiros."

Nota-se que a frequência é a materialização numérica da relação direta entre música e matemática. Para (ROEDERER, 1998), a fonte sonora e sua propagação no meio determinam a recepção do receptor. Então, ao pensar essas questões em termos auditivos, ampliamos para outras áreas de estudo, como por exemplo no universo das sensações e da conexão do sujeito ao meio de modo dialético. A partir desse breve relato histórico podemos perceber tal evidência. Este teste fora embasado de acordo com o teste Music Composer disponibilizado no livro *EEE 101-SPEEDY-33, EXPERIMENTS*, (KARAM L. J. MOUNSEF, 2006). Este experimento demonstra a capacidade do LabVIEW de gerar alturas definidas de sons musicais (notas) usando um processador de sinal digital. Com isso, consegue-se, por exemplo, simular um piano pressionando as teclas no painel frontal para gerar uma combinação de notas musicais. Quando uma onda senoidal é emitida para a saída de áudio, o usuário ouve um tom contínuo no alto-falante. A intensidade do tom é determinada pela amplitude da onda. O campo é definido como a frequência da onda. Na verdade, o piano possui 88 teclas que abrangem a faixa de frequência de 27,5 Hz (A0) a 4186 Hz (C8). A seguir vemos este experimento, o qual foi usado a geração de forma de onda senoidal no LabVIEW para gerar tons musicais usando a módulo DSP e a placa.

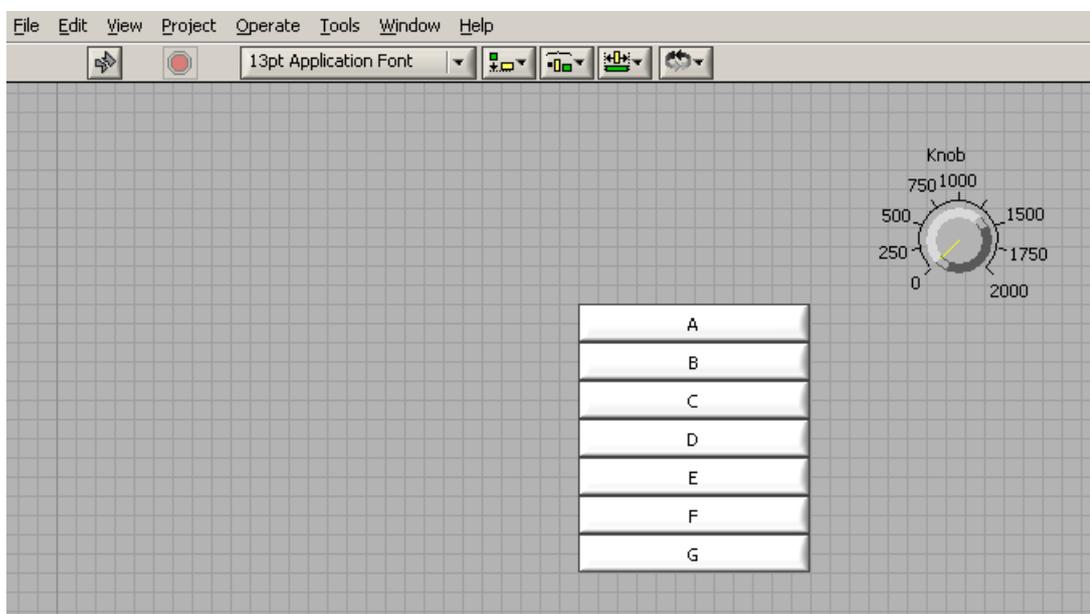


Figura 39 – Music composer-Painel. Fonte: Elaborada pelo autor.

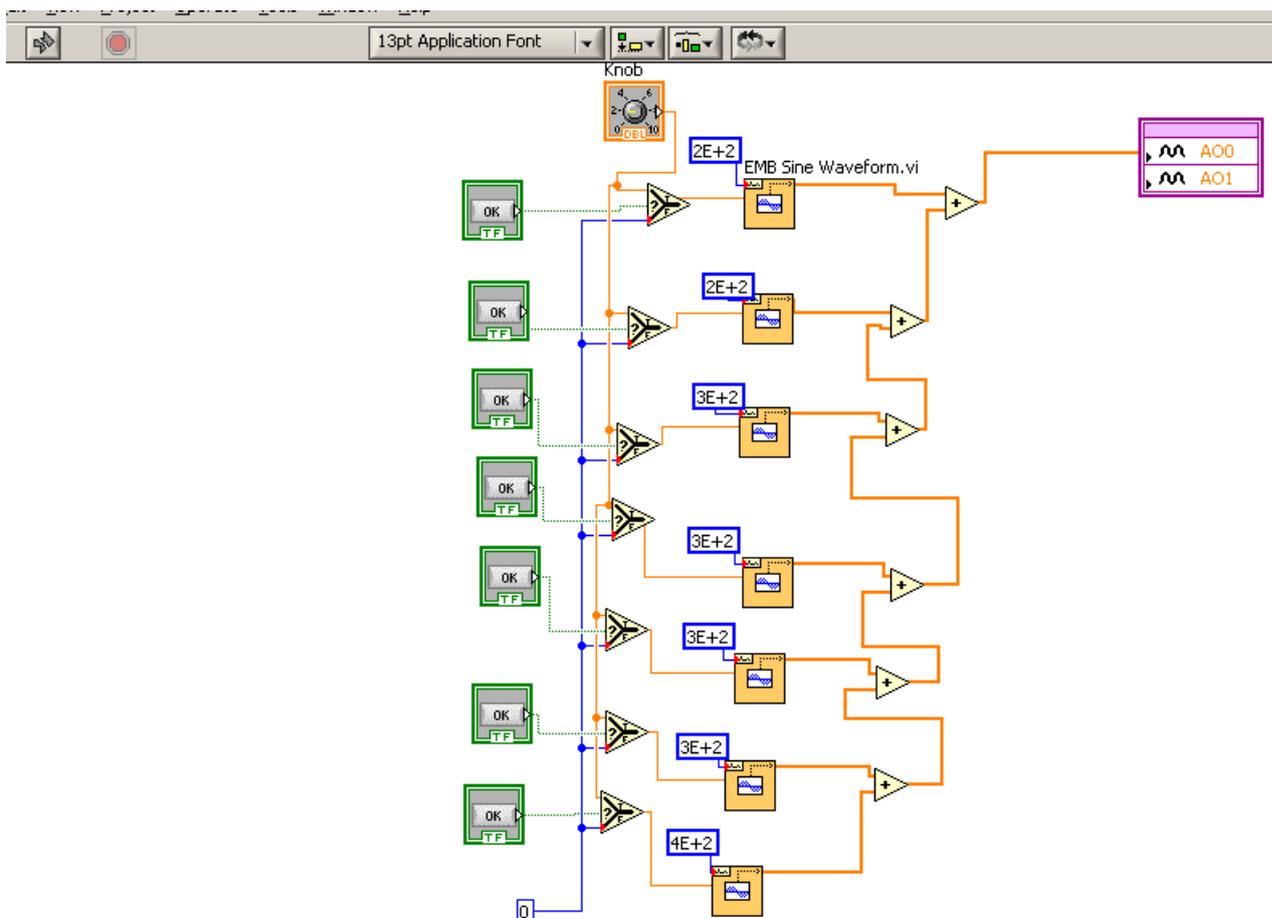


Figura 40 – Music composer-Diagrama de blocos. Fonte: Elaborada pelo autor.

A frequência de cada onda senoidal foi modificada para corresponder a cada nota do piano, conforme especificado pela tabela de frequências da figura 7. Quando uma tecla do piano não é pressionada, a amplitude da nota correspondente deve ser zero. Portanto, inseriu-se a constante zero. Outro recurso adicionado foi a possibilidade de controlar a intensidade do tom, adicionando-se um botão para controlar o nó de amplitude do bloco de ondas senoidais EMB. O último passo é enviar os tons para as tomadas de áudio na placa DSP Implementado, adicionando-se uma saída analógica e configurando-a para ter duas amostras de canal e uma amostra de 8000 Hz de frequência.

4 CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho o desenvolvimento e a funcionalidade do módulo DSP do LabVIEW, aplicado a filtros digitais e efeitos sonoros, juntamente com a placa NI SPEEDY 33. Os testes desenvolvidos e detalhados nas seções anteriores serão disponibilizados juntamente com uma cópia da máquina virtual aos alunos que poderão aproveitar em aulas práticas ou caso queiram dar continuidade no trabalho que pode vir a trazer uma experiência relevante no aprendizado.

O desenvolvimento desse trabalho mostra também que a gama de recursos que esses laboratórios possuem é imensa. Há possibilidade de abranger não só o conteúdo de sinais e sistemas, mas também teoria de controle (assim como mostrado na imagem 8), a representação em diagrama de blocos e a função de transferência do sistema, no qual [Boquera \(2016\)](#) implementou um filtro mesclando características de um IIR (do inglês Infinite Impulse Response, que é um filtro digital com resposta ao impulso de duração infinita.) com um passa-banda (band-pass) para implementar um ressonador).

Nos testes realizados o usuário pode projetar e executar testes com diversos filtros como filtros passa-baixa e passa-alta, com resposta a várias frequências. Os filtros Band Pass e Band Stop podem ser implementados com amplificadores operacionais únicos usando técnicas semelhantes às mostradas, mas este escopo não é tratado no presente trabalho. A prática em laboratórios virtuais possibilita que usuários remotos tenham interações práticas em aplicações diversas com maior acessibilidade, permitindo uma melhor absorção de conhecimento ao se estudar sinais e sistemas.

Na era da tecnologia e da informação no qual computadores pessoais são acessíveis e dispõem de uma gama de recursos que oferecem possibilidades de interatividade homem-máquina. Ao aplicar elementos auditivos e gráficos, juntamente com hardware, o LabVIEW+DSP permite todos esses aspectos em uma única interface. Por outro lado, tendo em vista esta vasta possibilidade para a aplicação de tais recursos, observa-se que há uma carência de estudos na área de sinais e sistemas aplicados a áudio.

4.1 Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros usando essa metodologia dentro dessa área serão facilitados de certa forma, pois o ambiente virtual já foi implementado, necessitando apenas de algumas melhorias para melhor fluidez. Recomenda-se adicionar outros módulos externos. Isso é possível e foi realizado por [Kyesswa et al. \(2011\)](#) que conectou uma placa externa em um teste. Alguns recursos foram implementados de maneira não ideal devido a alguns problemas e instabilidades da máquina virtual. Uma possível evolução seria implementar matematicamente filtros mistos

usando a ideia de Boquera (2016) e implementá-los no LabVIEW e aplicá-los aos exemplos apresentados. Também é possível implementar recursos adicionais, como entradas em estéreo, saídas de alta definição e com caminho de processamento, que permitem uma melhor análise.

Uma implementação interessante seria aplicar um PID de alto nível, que utiliza o erro para calcular três componentes da saída (que correspondem ao feedback do proporcional integral e derivativo), utilizando as ferramentas de identificação do sistema LabVIEW e o Control Design and Simulation Toolkit.¹ Estes modelos podem ser gerados para sistemas de ordem diversos além de serem utilizados para formas de ondas de entradas genéricas. O mais complexo nível de identificação do sistema pode ser feito em tempo real utilizando outras funções e módulos externos. Porém deve-se levar em conta a complexidade dos métodos analíticos usados nesse caso e para programar o ganho do PID.

Outra área muito promissora e que tem necessitado de estudos é a de filtros aplicados para coleta e análise de ruídos ou barulhos (DF1 IIR, por exemplo). Assim é possível sugerir técnicas de redução destes, como, por exemplo, um controle ativo de ruído, que visa reduzir ruídos acústicos compostos por frequências baixas.

¹ Disponível em : <http://www.ni.com/tutorial/9861/pt/>

REFERÊNCIAS

- ASSEF, A. et al. Projeto de um filtro digital fir passa-baixa em fpga para aplicações de processamento de sinais de ultrassom. Citado na página 40.
- BACKUS, J. *The acoustical foundations of music*. 2. ed. New York: W.W. Norton Company, 1997. Citado na página 23.
- BARRERO, F.; TORAL, S.; GALLARDO, S. edsplab: remote laboratory for experiments on dsp applications. *Internet Research*, 2008. Emerald Group Publishing Limited, v. 18, n. 1, p. 79–92, 2008. Citado na página 15.
- BOQUERA, G. A. Implement a chorus effect in a real time embedded system. 2016. Universitat Politècnica de Catalunya, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 10, 24, 25, 50 e 51.
- CERQUEIRA, A. S.; VIEIRA, M. B. Filtros digitais aplicados em sinais de audio. 2007. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 18.
- DVIR, Z. Web-based remote digital signal processing (dsp) laboratory using the integrated learning methodology (ilm). In: IEEE. *2006 International Conference on Information Technology: Research and Education*. [S.l.], 2006. p. 211–216. Citado na página 15.
- FERREIRA, S. A. de S. *Sistema Especialista Para Reconhecimento De Acordes Musicais Em Tempo Real Para Violão Elétrico Utilizando Técnicas de DSP*. Tese (Doutorado) — Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal da . . . , 2006. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 23.
- HERRERA, C. G. *Projeto de Sistemas de Processamento Digital de Sinais de Áudio Utilizando Metodologia Científica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. Citado na página 16.
- JR, A. P. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos-8*. [S.l.]: Bookman Editora, 2015. Citado na página 45.
- JÚNIOR, A. P. *Eletrônica analógica: amplificadores operacionais e filtros ativos. Sexta Edição*. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2003. Citado na página 24.
- KARAM L. J. MOUNSEF, N. *EEE 101 SPEEDY-33 Experiments*. 3. ed. Arizona: Arizona State University - IRA A. Fulton School Of Engineering., 2006. Citado 3 vezes nas páginas 10, 22 e 48.
- KYESSWA, M. et al. An online digital filters and sound effects laboratory utilizing ni speedy 33 and labview dsp module. In: IEEE. *2011 Eighth International Conference on Information Technology: New Generations*. [S.l.], 2011. p. 620–625. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 50.
- LACERDA, O. Teoria elementar da música. *São Paulo: Ricord Brasileira*., 1961. 1961. Citado na página 23.
- LUZ, A. G. da. *Aplicação de Algoritmos Heurísticos na Ordenação e Particionamento de Coeficientes em Arquiteturas de Filtros FIR*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PELOTAS, 2010. Citado na página 40.

NALON, J. A. *Introdução ao processamento digital de sinais*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 10, 19 e 24.

NUNES, R. A. A. et al. *Introdução a processadores de sinais digitais-dsp. Apostila Da CBPF, Rio De Janeiro*, 2006. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. *Digital signal processing*. upper saddle river. *New Jersey*, 2007. v. 7458, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 42.

ROEDERER, J. G. *Introdução à física e psicofísica da música*. [S.l.]: Edusp, 1998. Citado na página 48.