

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ALEXANDRE PINTO DE LARA
CARLA EDUARDA ORLANDO DE MORAES

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE CAPTURA DE ÁUDIO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

ALEXANDRE PINTO DE LARA
CARLA EDUARDA ORLANDO DE MORAES

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE CAPTURA DE ÁUDIO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Rosa

CURITIBA
2016

Alexandre Pinto de Lara
Carla Eduarda Orlando de Moraes

Desenvolvimento de equipamento de captura de áudio

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 15 de setembro de 2016.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Antonio Carlos Pinho, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Gules, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, criador de todas as coisas, por ter nos dado saúde e força para superar todas as dificuldades encontradas no desenvolvimento deste projeto e durante toda nossa graduação.

A universidade e seu corpo docente que oportunizaram adquirir os conhecimentos necessários para tornarmos engenheiros.

Ao nosso prezado orientador Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Rosa que nos guiou durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho, com sabedoria e paciência, sempre com muita atenção e dedicando seu tempo para nos ajudar.

Ao Prof. Dr. Roger Gules que não mediu esforços para nos ajudar e tirar nossas dúvidas mesmo quando repetidas.

Aos nossos amigos, os de longa data que muito compreenderam nossa ausência durante estes anos enquanto nos dedicávamos a provas e trabalhos. Aos que conhecemos durante a universidade, que foram um incentivo a seguir em frente, que muitas vezes nos deram uma palavra de ânimo e força, nosso muito obrigado.

Agradeço aos meus pais Antonio e Vanda, por nunca deixarem de me apoiar, independente de onde eu estivesse e por sempre me darem palavras de apoio e otimismo, me fazendo crescer e aproveitar o melhor da vida.

Agradeço a Duda, a companheira que Deus pos ao meu lado para me ajudar a subir os degraus da vida, sempre me dando forças, eu te amo.

Agradeço aos meus pais, Eni e José Carlos, por serem os maiores responsáveis por todas as minhas conquistas, por nunca medirem esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos. Obrigada por independente da distância sempre estarem presentes em minha vida.

Agradeço a minha irmã Juliana por toda força, obrigada por todas as orações e por ouvir minhas reclamações. Obrigada pelo presente mais lindo que já ganhei minha afilhada Gabriela, minha motivação para seguir sempre em frente.

Agradeço ao Alexandre, meu companheiro durante este trabalho e boa parte da graduação, com toda certeza você é o melhor presente da UTFPR. Obrigada pela paciência, pela força e por nunca me deixar desistir em nada que a vida me proporcione, eu te amo.

RESUMO

LARA, Alexandre Pinto. MORAES, Carla E. Orlando. **Desenvolvimento de equipamento de captura de áudio**. 2016 np. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento de captura de áudio que utiliza um microfone para aquisição de sinais analógicos enviando para o computador sinais digitais via Ethernet. O sistema em questão possui como premissas a aquisição e manipulação de sinais analógicos provenientes de sinais sonoros, enviando ao computador sinais digitais que possam ser processados nas mais diversas aplicações, visando o desenvolvimento de novas tecnologias na área. Uma vez que as placas dos computadores usuais são de qualidade insuficiente para estas aplicações profissionais, cria-se a necessidade do desenvolvimento de um equipamento de captura de áudio com qualidade. Ao longo do desenvolvimento deste, são analisadas e implementadas tecnologias utilizando eletrônica de potência, processamento de sinal, conversão A/D, microcontroladores e interfaceamento que viabilizem a implementação final do sistema de modo a atender os seus requisitos. Ao final apresenta-se uma solução implementada para o equipamento de captura de áudio proposto.

Palavras-chaves: Áudio, conversão A/D, Ethernet, Amplificação

ABSTRACT

LARA, Alexandre Pinto. MORAES, Carla E. Orlando. **Development of an Audio Capture Device**. 2016 60p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia de Controle e Automação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

This paper presents the development of an audio capture device that uses a microphone to acquire analog signals and send digital signals to the computer via Ethernet. The system in question has as premises the acquisition and manipulation of analog signals from sound signals, sending digital signals to the computer that can be processed in the most diverse applications, and the objective is the development of new technologies in this field. Since the common PC boards are not enough for these professional applications, this issue creates the need for developing an audio capture equipment with high quality. Over this development, technologies are analyzed and implemented using power electronics, signal processing, A/D conversion, microcontrollers and interfacing to enable the final implementation of the system to match its requirements. At the end, it has been presented a solution implemented for the proposed audio capture equipment.

Keywords: Audio, AD conversion, Ethernet, Amplification

"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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Foto da placa EK-TM4C1294XL.....	15
Figura 2: Amostra de voz do fonema /a/.....	16
Figura 3: N-bit SAR ADC arquitetura simplificada.....	17
Figura 4: Vista do corte transversal do microfone condensador.....	19
Figura 5: Esquemático do microfone condensador com bateria interna.....	19
Figura 6: Modelo C451B <i>small-diaphragm condenser microphone</i>	20
Figura 7: Padrões Polares.....	21
Figura 8: Esquemático de funcionamento do equipamento.....	23
Figura 9: Esquemático do regulador XL6009.....	25
Figura 10: Circuito conversor DC-DC.....	26
Figura 11: Esquemático simplificado do UA741.....	27
Figura 12: Esquemático simplificado do UA741.....	28
Figura 13: Circuito esquemático para configuração descrita.....	29
Figura 14: Circuito pré-amplificador primeiro projeto.....	30
Figura 15: Circuito pré-amplificador segundo projeto.....	31
Figura 16: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 500 Hz.....	32
Figura 17: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 1 kHz.....	32
Figura 18: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 2 kHz.....	32
Figura 19: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 4 kHz.....	33
Figura 20: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 8 kHz.....	33
Figura 21: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 16 kHz.....	33
Figura 22: Esquemático simplificado INA217.....	35
Figura 23: Circuito amplificador.....	36
Figura 24: Entrada e Saída do Amplificador – 500 Hz.....	36
Figura 25: Entrada e Saída do Amplificador – 1 kHz.....	37
Figura 26: Entrada e Saída do Amplificador – 2 kHz.....	37
Figura 27: Entrada e Saída do Amplificador – 4 kHz.....	37
Figura 28: Entrada e Saída do Amplificador – 8 kHz.....	38
Figura 29: Entrada e Saída do Amplificador – 16 kHz.....	38
Figura 30: Circuito filtro RC passa-baixa.....	39
Figura 31: Circuito de proteção.....	40

Figura 32: Exemplos presentes na IDE Energia.....	41
Figura 33: Comportamento de uma interrupção.....	42
Figura 34: Código de captura de dados.....	43
Figura 35: Função de leitura da porta analógica.....	44
Figura 36: Camadas TCP/IP.....	45
Figura 37: Acesso ao servidor via internet.....	46
Figura 38: Fonema /u/ no osciloscópio.....	47
Figura 39: Fonema /u/ no Matlab.....	58
Figura 40: Layout da placa de circuito impresso.....	58
Figura 41: Layout da placa de circuito impresso em 3D (cima).....	59
Figura 42: Layout da placa de circuito impresso em 3D (baixo).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de tensões referentes a pré-amplificação.....	35
Tabela 2: Valores de tensões referentes a amplificação.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

USB	<i>Universal Serial Bus</i>
DC	<i>Direct Current</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
TI	Texas Instruments
CI	Circuito Integrado
A/D	Analógico/Digital
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	MOTIVAÇÃO	11
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	11
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
1.4	JUSTIFICATIVAS	13
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO	15
2.1	PLACA DE AVALIAÇÃO – TIVA	15
2.2	CONVERSOR A/D	16
2.2.1	ADC por aproximações sucessivas	17
2.3	MICROFONES	18
2.3.1	Microfone Cardioide	19
2.3.2	Padrões Polares (ou Direcionais)	21
2.4	CIRCUITO DE POTÊNCIA	22
3	INTEGRAÇÃO DA PLACA DE ÁUDIO	23
3.1	DIAGRAMA DE BLOCOS DA SOLUÇÃO	23
3.2	CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO	25
3.3	SISTEMA DE AMPLIFICAÇÃO DO SINAL DE ÁUDIO	26
3.3.1	Alimentação simétrica	26
3.3.2	Sistema de Pré – Amplificação	28
3.3.3	Sistema de Amplificação	34
3.3.4	Filtro RC e sistema de proteção	39
3.4	ALGORITMOS IMPLEMENTADOS	NO
	MICROCONTROLADOR	40
3.4.1	Energia Software	41
3.4.2	Interrupções	42
3.4.3	Módulo Ethernet	44
3.4.4	Aplicação da arquitetura TCP/IP	45
4	RESULTADOS	47

5	DIFICULDADES ENCONTRADAS	49
5.1	DIFICULDADES NO CIRCUITO DE POTÊNCIA.....	49
5.2	DIFICULDADES NA CONVERSÃO ANALÓGICA DIGITAL.....	49
6	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE	55
	ANEXOS	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Com a evolução dos sistemas de telecomunicações e os avanços na busca por conhecimento sobre a aquisição e tratamento de áudio, se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias que ofereçam suporte a estas atividades.

A técnica de *microphone array* (Matriz de microfones) e de reconhecimento de voz fazem parte das diversas aplicações que o equipamento de captura de áudio pode ser empregado. A matriz de microfones consiste em múltiplos microfones que funcionam como uma antena acústica. Usando os princípios da propagação do som, as principais fontes de som no ambiente podem ser localizadas espacialmente e distinguidas uma das outras, aproveitando o fato de que uma onda acústica é recebida em cada um dos microfones em um momento ligeiramente diferente. Nesse método são aplicadas filtragens e combinações dos microfones presentes na matriz de microfones (MCCOWAN, 2010). Esta técnica utilizada em aplicações militares e de alta fidelidade de gravações originais.

Outra possibilidade para o equipamento de captura de áudio é da replicação deste para uso em mesas de som. Mesas de som oferecem a possibilidade de lidar com dois ou mais sinais para a mixagem destes, sendo uma aplicação que é muito utilizada em estúdios de gravações, onde se faz necessário o uso de mesas com vários canais para realização da mixagem de sinais de vários instrumentos e vozes.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Ao se tratar de captura de áudio, tem-se inúmeras barreiras a serem transpostas. Alguns dos equipamentos de captura presentes no mercado não possuem informações importantes para que se possa investigá-los a fundo, como a impedância de saída em seus terminais, deixando a pesquisa acerca destes instrumentos limitada.

Fazer a conversão de um sinal analógico para um sinal digital, sem distorções é um grande desafio, ainda mais se tratando de áudio, onde dentre outros fatores, tem-se uma frequência de amostragem e uma resolução bastante altas. Para um áudio de boa qualidade, tem-se uma frequência de amostragem de no mínimo 40 kHz, entretanto com os componentes escolhidos essa frequência era inatingível, portanto

se trabalhou com uma frequência padrão de 10 kHz e uma resolução de 12 bits. Os dois itens são muito importantes para o desenvolvimento de um bom equipamento de captura de áudio, entretanto o investimento feito em cada item, principalmente na resolução, precisa ser levado em conta. Porém, não há linearidade no preço dos componentes pois, por exemplo, um conversor analógico digital com 16 bits de resolução não custa o dobro de um ADC com 8 bits de resolução, este custa muito mais dependendo das outras funcionalidades disponíveis.

Para a conexão do equipamento com o computador, foi utilizada a conexão Ethernet, que é de fácil utilização, pois alguns componentes que foram utilizados no desenvolvimento do equipamento de captura de áudio possuíam protocolos de comunicação com a aplicação, como a placa de avaliação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento de captura de áudio com resolução de 12 bits e frequência de 10 kHz com conexão ao computador via Ethernet para comunicação.

No decorrer deste trabalho será apresentado o esquemático de funcionamento do equipamento em diagrama de blocos bem como a descrição de cada parte deste sistema.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar conceitos de Sistemas Microcontrolados, Conversão Analógica-Digital e Eletrônica;
- Realizar testes entre microcontrolador e conversor analógico-digital;
- Realizar testes entre microcontrolador e Ethernet;
- Realizar programação do microcontrolador;
- Interligação dos sistemas especificados acima;
- Implementação do sistema completo;
- Aplicar sinais conhecidos ao equipamento, como senóides, ondas quadradas e outros sinais utilizados para testes deste gênero, para avaliação das distorções produzidas pelo equipamento.

- Conclusão a partir dos dados.

1.4 JUSTIFICATIVAS

Desenvolver novas tecnologias que sejam acessíveis faz parte da missão de cada engenheiro, sendo assim no desenvolvimento deste projeto pode-se aprofundar nosso conhecimento na área de microcontroladores, processamento de sinais e circuitos elétricos, além da síntese de todo esse processo.

Para que se obtenha evoluções na área de processamento de áudio a captura deste se torna essencial, sendo assim o desenvolvimento de um equipamento que trabalhe com faixas de resolução e frequências com qualidade profissional é fundamental. Neste contexto, desenvolver essa tecnologia significa alcançar uma realização para as aplicações citadas anteriormente.

O reconhecimento de voz é uma destas aplicações, que em um futuro próximo pode se tornar um grande aliado da engenharia forense, já o *microphone array* também tem várias aplicações que ajudariam no desenvolvimento dos sistemas de processamento digital de sinais.

O processamento de sinal de voz ainda necessita de muita pesquisa e evolução, sendo assim se vê como extremamente necessária a busca pelo desenvolvimento desta área.

Além disso, o desenvolvimento deste equipamento nos permitiu o entendimento da aplicação dos conceitos teóricos aprendidos ao longo do curso em um projeto construtivo. Uma vez que a construção do equipamento foi realizada, este vai servir de base para futuros aprimoramentos dentro da UTFPR.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A revisão de literaturas é fundamental para a execução do projeto, assim como a especificação dos materiais para a construção do equipamento e testes para verificar o comportamento do circuito com os materiais escolhidos, conforme descrito nas etapas abaixo.

1ª Etapa: Revisão bibliográfica

Nesta etapa foram realizadas pesquisas de materiais a respeito dos temas levantados em livros, artigos, teses e dissertações. Também foram revisados

sistemas microcontrolados, sinais e sistemas, estatística, circuitos elétricos e programação, para desenvolvimento de um *software*.

2ª Etapa: Determinação de materiais

Nesta etapa foi feita a determinação de todos os componentes eletrônicos necessários para a fomentação do projeto, como conversor analógico-digital, microcontrolador, conector XLR para microfone, assim como as ferramentas para seu desenvolvimento.

3ª Etapa: Testes e Desenvolvimento

Para esta etapa foram realizados testes de cada parte do circuito utilizando uma conexão UART para geração de registro de eventos (*logs*) em computador de desenvolvimento, desde a comunicação do microfone com o sistema microcontrolado quanto à conversação da placa de circuito impresso com o computador a fim de ter o maior aproveitamento do sistema. Após definidos os equipamentos, foi montado um protótipo e desenvolvido um *software* supervisor para coleta de dados do sistema.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo do trabalho foi estabelecido o tema, a delimitação do escopo, os objetivos almejados, bem como as justificativas do projeto e o cronograma. Posteriormente, no capítulo dois, serão apresentadas as especificações do projeto e um detalhamento destas, onde será discorrido sobre a placa de avaliação, o conversor A/D, o microfone cardioide, as amplificações e o circuito de potência.

O capítulo três descreve a integração da placa de áudio. Neste capítulo será apresentado o diagrama de blocos da solução, bem como uma breve apresentação de suas respectivas funções dentro do sistema. Neste capítulo também são apresentados alguns dos algoritmos que serão implementados no microcontrolador como: interfaceamento Ethernet e aquisição analógica.

O capítulo quatro demonstra os resultados conseguidos com a finalização do projeto, e o último capítulo, o capítulo cinco, discorre um pouco sobre os problemas enfrentados durante o desenvolvimento do projeto.

2 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO

Este capítulo mostra as bases de todos os equipamentos utilizados no desenvolvimento do projeto, assim como as teorias utilizadas para fundamentar o projeto.

2.1 PLACA DE AVALIAÇÃO - TIVA

Como microcontrolador para realizar o controle dos processos, foi escolhido o TM4C1294NCPDT, que é embutido na placa de avaliação Tiva™ C Series TM4C1294 Connected LaunchPad Evaluation Board (EK-TM4C1294XL), como visto na figura 1, que é uma plataforma de avaliação para microcontroladores baseados em microcontroladores M4F ARM® Cortex™ da Texas Instruments. (TEXAS INSTRUMENTS, 2015).

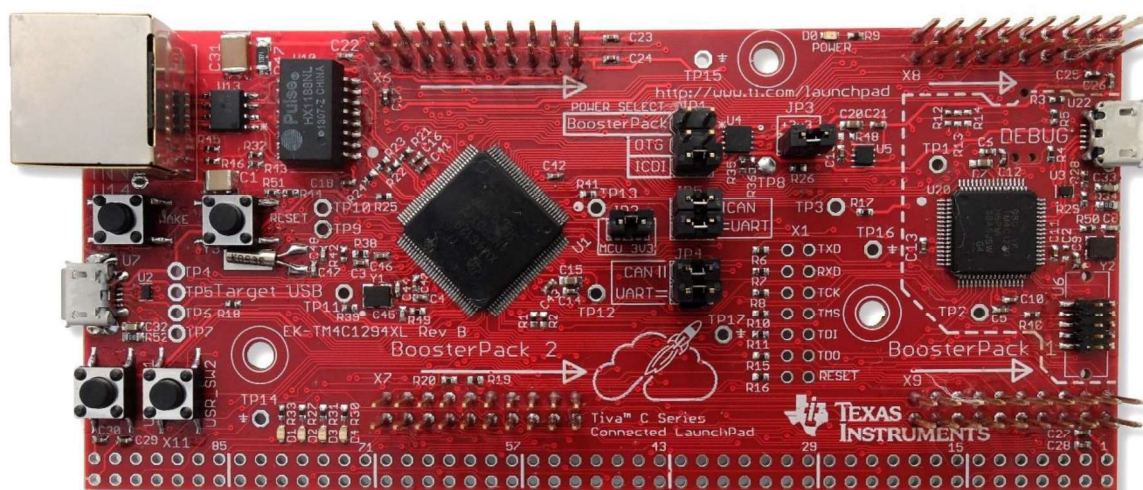


Figura 1: Foto da placa EK-TM4C1294XL

Fonte: Texas Instruments, 2015.

Essa placa de avaliação foi escolhida por ser de fácil acesso, pois pode ser adquirida da loja online da Texas por um preço acessível. Além disso por ser uma placa de avaliação, a placa tem disponível para *download* o software TivaWare™, que é um conjunto de softwares e ferramentas úteis para simplificar e melhorar o acesso do usuário com o produto, além de disponibilizar uma gama enorme de bibliotecas para vários tipos de aplicação.

A Texas Instruments também possui um fórum específico para esse tipo de placa de avaliação, o qual é frequentado por funcionários da área técnica, facilitando a busca de informações.

2.2 CONVERSOR A/D

A conversão analógica digital é um processo eletrônico no qual um sinal contínuo no tempo é convertido para um sinal multinível, sem que o sinal de entrada perca suas características. Dessa maneira, há no mercado dispositivos que fazem a conversão analógica digital de forma básica. O conversor Analógico Digital ou *ADC* onde se tem como entrada do dispositivo uma tensão que varia teoricamente dentre uma gama infinita de números, como por exemplo, a fala humana que pode assumir qualquer valor como pode ser visto na figura 2.

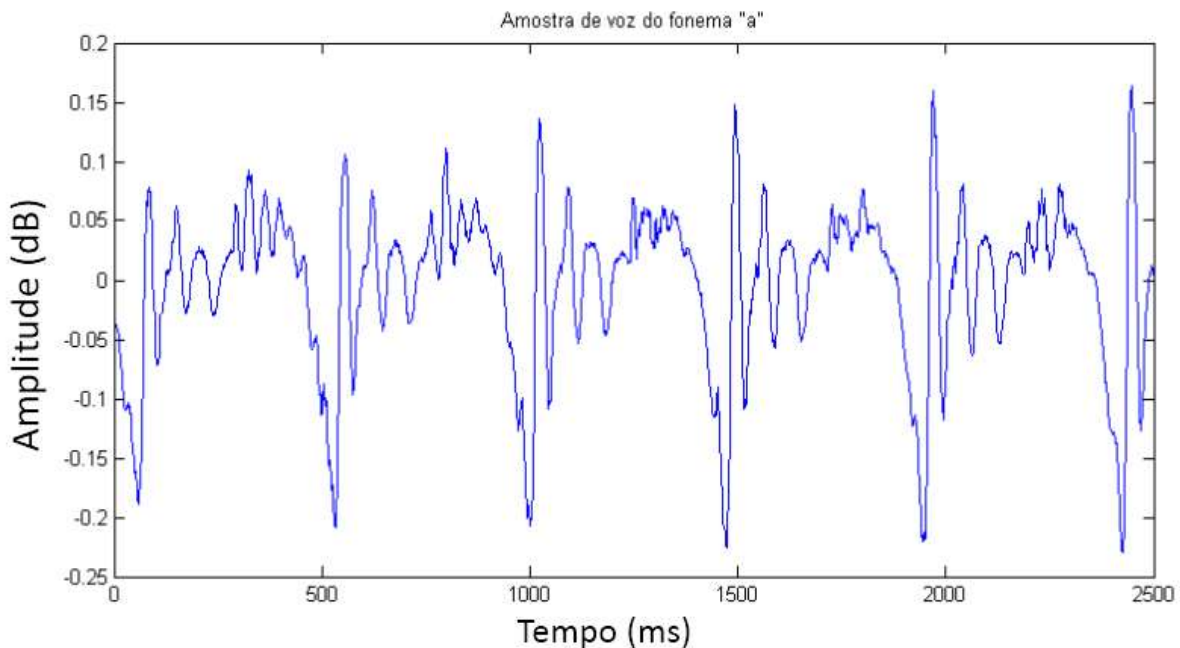


Figura 2: Amostra de voz do fonema /a/

Fonte: Autoria Própria, Matlab.

Como saída do conversor analógico digital, tem-se em contraste valores que possuem um estado ou nível definido. Os sinais digitais mais simples são representados na forma de zeros e uns, também chamados de representação binária. Qualquer número inteiro pode ser representado em forma binária, onde se formam cadeias de zeros e uns.

Os sinais digitais são mais aceitos pelo mundo da eletrônica, pois usualmente eles vêm de forma ordenada e com limites definidos, o que torna muito mais fácil para qualquer circuito eletrônico os distinguir de ruídos externos. Porém o mercado não oferece apenas um tipo de conversor analógico digital, pois esses dispositivos podem vir com diferentes velocidades de processamento, diferentes interfaces e prover um grau diferente de precisão. (TORRES, 2015). O tipo do conversor AD que foi utilizado é o conversor analógico digital por aproximações sucessivas, o qual é descrito abaixo.

2.2.1 ADC por aproximações sucessivas

O ADC por aproximações sucessivas (SAR ADC) é um dos mais utilizados quando falando de conversores com média e alta taxa de resolução, uma vez que a arquitetura lógica desse conversor permite, para alta performance, ADCs a serem micro encapsulados (MAXIM INTEGRATED, 2015).

O funcionamento de um SAR ADC é simples, como pode ser visto na figura 3. O valor analógico de entrada é primeiramente deixado em espera. Assim, para implementar a busca binária, o registrador é setado para uma escala mediana, para que o dígito mais significativo seja jogado para 1. Isso força o conversor digital analógico a ser $V_{ref}/2$, onde V_{ref} é a tensão de referência produzida pelo ADC. Desse modo, a saída do DAC é comparada com o valor de entrada analógica, que faz uma média e que é guardada no registrador novamente, e assim sucessivamente.

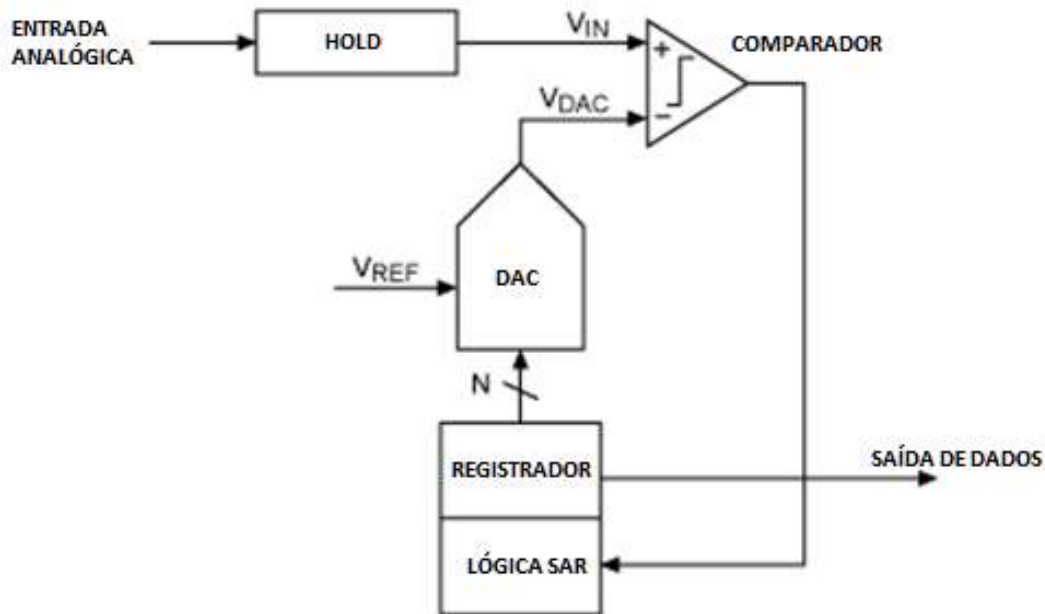


Figura 3: N-bit SAR ADC arquitetura simplificada

Fonte: MAXIM INTEGRATED, 2015.

2.3 MICROFONES

Microfones são dispositivos transdutores de ondas mecânicas, especificamente ondas sonoras, em sinais elétricos. Existem dois tipos de microfones: os dinâmicos e os condensadores, dos quais será tratado neste trabalho com destaque, o condensador que será o utilizado nesta aplicação. O microfone dinâmico não é um microfone sensível e suporta um alto nível de pressão sonora. Além disso, ele suporta um alto nível sonoro antes de ocorrer distorção e apresenta uma menor resposta de frequência. Devido a menor sensibilidade, este microfone exige um ganho maior no sistema pré-amplificador, gerando incremento no ruído.

Por ter características mais robustas, o microfone dinâmico é o mais utilizado em aplicações de áudio ao vivo, sendo o mais utilizado em show como exemplo, pois ele suporta mais impacto. Outra característica importante é que ele não precisa da alimentação *phantom power* que será descrita juntamente como o microfone condensador.

Além destas características que os distinguem, os microfones possuem diferentes padrões direcionais. Todas essas características devem ser observadas

quando se deseja escolher um tipo de dispositivo para uma determinada aplicação de captação de áudio.

2.3.1 Microfone Cardioide

Microfone condensador é o mais indicado para processamento de sinais sonoros com alta fidelidade, devido a sua capacidade de lidar com as variações na frequência, amplitude e atenuação dos sinais. Seu esquema mecânico consiste de duas finas membranas de diafragma posicionadas próximas a um disco de metal, o que cria um sistema capacitivo alimentado por uma fonte externa de alimentação, o que na eletrônica voltada para áudio profissional é denominado *phantom power*, que será descrito a seguir. O esquema descrito anteriormente é representado na figura 4.

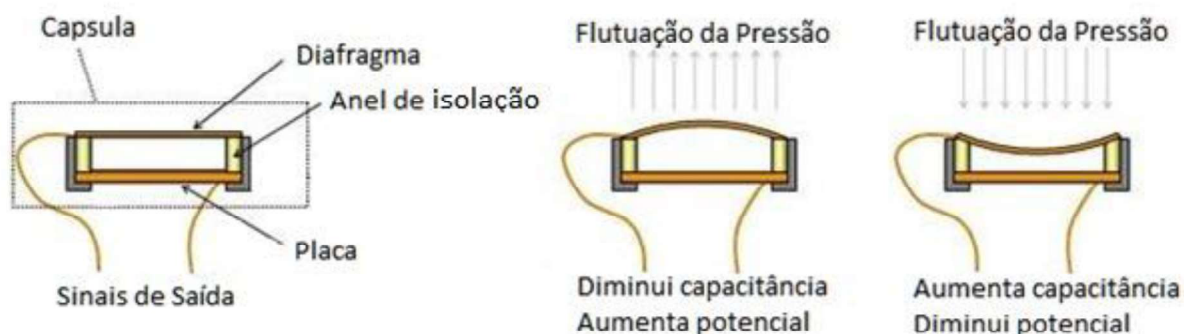


Figura 4: Vista do corte transversal do microfone condensador.

Fonte: Microphone Design & Operations, 2014.

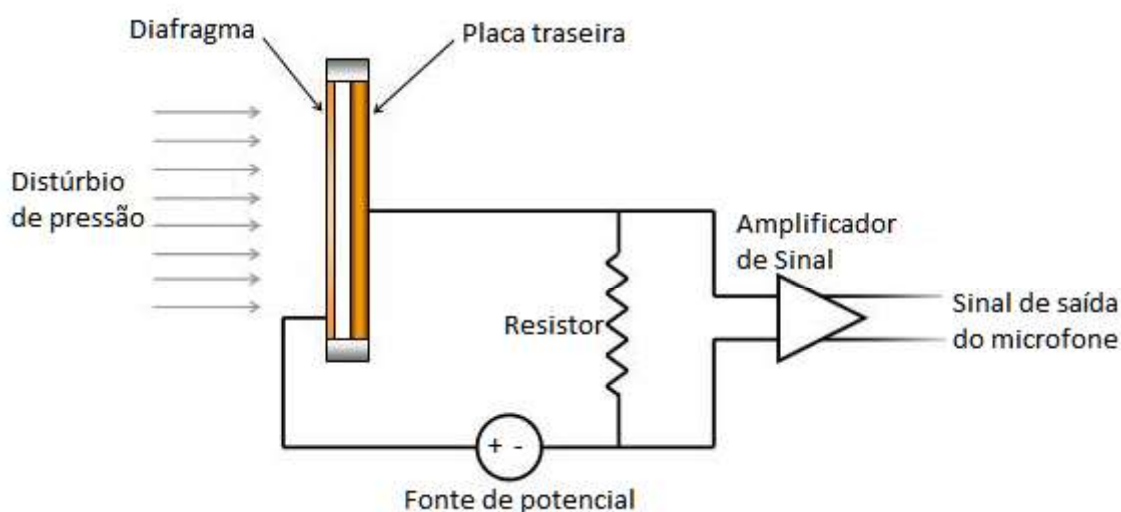


Figura 5: Esquema do microfone condensador com bateria interna.

Fonte: Microphone Design & Operations, 2014.

Quando ocorre uma pressão sonora no diafragma tem-se como resultado, uma variação na capacitância, gerando assim uma variação na tensão, e isto origina o sinal elétrico que será o sinal de saída do microfone, como visto na figura 5. Existe uma ampla gama de formas e tamanhos para estes microfones, porém todos obedecem basicamente estes princípios de funcionamento. A figura 6 ilustra um destes modelos disponíveis no mercado para este tipo de microfone.



Figura 6: Modelo C451B small-diaphragm condenser microphone.

Fonte: AKG Acoustics, 2009.

Retomando ao princípio de alimentação externa necessária neste tipo de microfone, tem-se que a tensão deve ser contínua, variando entre 40 e 50 volts dependendo do microfone. A tensão de alimentação é fornecida ao microfone quando este é conectado a uma mesa de som ou a um pré-amplificador de sinal, sendo comumente utilizado um conector XLR.

Entre os microfones condensadores existe uma subcategoria definida pelas propriedades direcionais, também conhecidas como direcionalidade. Neste quesito são subdivididos em omnidirecionais, unidirecionais e bidirecionais. Microfones unidirecionais podem ser divididos em cardioides, supercardioides e hipercardioides, e são caracterizados pelos seus padrões polares ou direcionalidade. Estas características indicam o quão sensível um microfone quanto aos sons chegando a ele em diferentes ângulos em relação ao seu eixo central.

2.3.2 Padrões Polares (ou Direcionais)

Padrões polares referem ao formato polar de cada tipo de direcionalidade. Como já dito anteriormente, existe uma categoria para cada tipo de propriedade direcional.

A primeira divisão é caracterizada pela capacidade de capturar ondas sonoras oriundas de diferentes direções. Sendo assim, o omnidirecional é caracterizado pelo microfone que tem a capacidade de captar ondas sonoras provenientes de qualquer direção, ou seja, ele pode capturar sons provenientes em toda sua redondeza. Já o bidirecional capta sons provenientes de duas direções, sendo que ele capta melhor sons que chegam a sua frente ou a suas costas, rejeitando os sons laterais. O unidirecional por sua vez, capta apenas sons oriundos de uma direção, rejeitando os provenientes de suas costas e laterais. Isso o torna o mais indicado para aplicações onde se deseja captar sons vindos de uma direção específica e com baixa interferência de ruídos do ambiente.

Na figura 7 estão ilustrados os padrões polares, onde se pode observar a região de captura de áudio de cada uma das categorias.

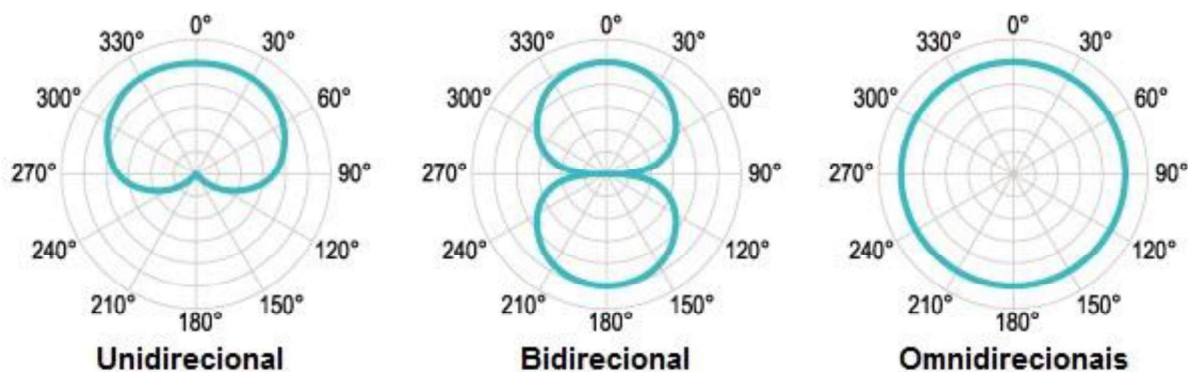


Figura 7: Padrões Polares.

Fonte: Yamaha Comercial Audio, 2016.

Dentro os microfones unidirecionais, existem as subcategorias descritas anteriormente, e entre elas a mais comum é o padrão cardioide.

Assim como os demais microfones, o microfone cardioide funciona como um transdutor de ondas sonoras em sinais elétricos. Porém este tipo de microfone tem características próprias, as quais são apresentadas e discutidas neste trabalho.

O microfone cardioide é denominado desta maneira porque seu padrão polar resulta em uma região de direcionalidade cardioide. Este tipo de microfone capta

melhor sons oriundos que ocorrem em sua frente, rejeitando os laterais e os traseiros. A capacidade de rejeitar os sons oriundos das suas partes traseiras e laterais faz com que o este microfone seja ideal para aplicações onde a captação sonora de todo o ambiente não é desejada. (MEDIA COLLGE, 2015).

Este tipo de microfone é utilizado tanto em estúdios quanto em uso ao vivo, pois como ele rejeita os sinais citados anteriormente existe uma diminuição de ruídos e *feedback*. São utilizados em diversas aplicações, principalmente atendendo ao efeito de proximidade. Sendo assim, escolhe-se utilizá-los, pois tem-se um sinal mais puro devido à alta sensibilidade do microfone.

2.4 CIRCUITO DE POTÊNCIA

Como apresentado anteriormente, todos os microfones condensadores necessitam de uma alimentação DC para seu funcionamento, o *phantom power*. Sendo assim, se faz necessário o desenvolvimento de um circuito de potência para gerar a tensão DC necessária para a alimentação do sistema.

Como a alimentação do sistema, equipamento de captura de áudio, vem exclusivamente da USB do computador quando este é conectado, ocorre a necessidade de um circuito de potência, como um conversor *Boost*, que tenha como entrada uma tensão DC de 5 volts fornecida pela USB e realize a elevação de tensão para os 40 volts requeridos pelo *phantom power* do microfone. O circuito deve apresentar uma variação de tensão máxima de 50 mV a fim de não provocar danos ao sistema, principalmente ao microfone, além disso, deve fornecer uma potência na ordem de miliwatts e trabalhar com correntes de grandeza na escala de miliampères.

3 INTEGRAÇÃO DA PLACA DE ÁUDIO

3.1 DIAGRAMA DE BLOCOS DA SOLUÇÃO

O diagrama de blocos da figura 8 apresenta a solução para o equipamento de captura de áudio desenvolvido, bem como as conexões dos componentes do sistema. Ele é composto pelo microfone, conector XLR, circuito de alimentação, porta USB, sistemas de alimentação simétrica, sistemas de amplificação, filtro e proteção, TIVA, roteador e computador.

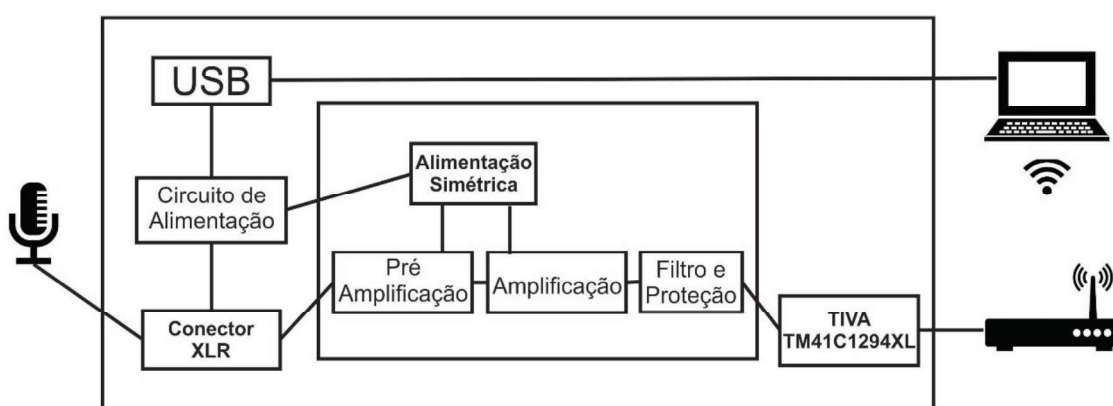


Figura 8: Esquemático de funcionamento do equipamento

Fonte: Autoria própria

O microfone é responsável por captar as ondas sonoras e transformá-las em sinais elétricos, em tensão AC, que posteriormente será tratada pelo restante do sistema. Além disso, a conexão deste ao sistema é realizada utilizando o conector XLR.

O conector XLR tem um papel fundamental em aplicações de áudio profissionais, além de ser uma parte fundamental em qualquer instrumento elétrico. Ele possui 3 pinos de conexão e foi desenvolvido especialmente para aplicações de áudio, sendo usado em praticamente todos os microfones com fio. Seus três pinos 1, 2 e 3 correspondem respectivamente ao aterramento, polaridade positiva, também conhecida como *hot*, e polaridade negativa, também conhecida como *cold*. (ENGINEERS GARAGE, 2015).

O circuito de alimentação fornece a tensão *phantom power* necessária para o microfone, além de tensão para alimentação do sistema de alimentação simétrica que

foi desenvolvido para alimentar os amplificadores operacionais dos sistemas de amplificação.

Um sistema de alimentação simétrica foi desenvolvido visto a necessidade deste tipo de alimentação para os amplificadores operacionais, para que estes operem dentro de sua região linear e conforme as configurações projetadas. A princípio a ideia era aplicar o conceito de *single supply voltage*, com o intuito de simplificar a alimentação dos amplificadores, porém devido as suas características e faixas de tensões produzidas pelo microfone, a ideia tornou-se inaplicável.

O sistema de amplificação foi dividido em duas partes, sendo elas pré-amplificação e amplificação. A primeira é responsável por criar um *offset* no sinal analógico proveniente do microfone para elevar o nível apenas para valores de tensão positivos, e o segundo para realizar a amplificação do sinal. O projeto de cada um destes sistemas será descritos em tópicos seguintes.

O filtro RC e a proteção foram desenvolvidos também a partir de necessidades constatadas a partir dos testes. No sistema de pré-amplificação, apesar de ser usado um amplificador operacional de alta qualidade e específico para altas frequências, foi constatado um forte ruído, sendo assim realizou-se a implementação do filtro que tornou o sinal com maior relação sinal-ruído. A proteção foi desenvolvida para proteger a placa de avaliação TIVA, pois esta suporta apenas tensões entre 0 e 3,3 V, logo quando ocorre uma tensão fora deste intervalo estabelecido o TIVA não é afetado.

Na placa de avaliação TIVA tem-se dois componentes fundamentais, sendo eles o conversor A/D e o microcontrolador. O conversor A/D realiza a conversão do sinal elétrico da tensão produzido pelo microfone em um sinal digital, que será enviado ao microcontrolador. Ele trabalha a uma frequência de 10 kHz e possui uma resolução de 12 *bits*. O microcontrolador é responsável pelo tratamento do sinal digital. Neste dispositivo são implementadas, na linguagem C++, todas as funções necessárias para o funcionamento do equipamento. Nas funções também são realizados os tratamentos das interrupções e definições dos periféricos.

A USB fornece a tensão necessária para a alimentação do sistema como um todo, inclusive servindo como tensão de entrada para o circuito elevador de tensão implementado para a alimentação *phantom power*. Além disso, a porta serial também pode ser utilizada para a comunicação do computador com o equipamento, com finalidade de monitorar o programa desenvolvido. Nesta aplicação, não foi utilizada a

porta USB para a comunicação, pois foi implementada uma arquitetura cliente-servidor com comunicação via Ethernet.

3.2 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO

O circuito de alimentação fornece a tensão necessária para a alimentação DC do microfone, o *phantom power*. Este circuito tem como tensão de entrada os 5 volts fornecidos pela porta USB, e realiza a elevação desta tensão a 40 volts, valor necessário para o funcionamento do microfone. Para isso foi adquirido um conversor DC/DC elevador utilizando o circuito integrado (CI) regulador XL6009. O CI XL6009 foi desenvolvido para aplicações de equipamentos eletrônicos portáteis. A figura 9 apresenta o esquemático do CI XL6009, nele se pode observar seu funcionamento.

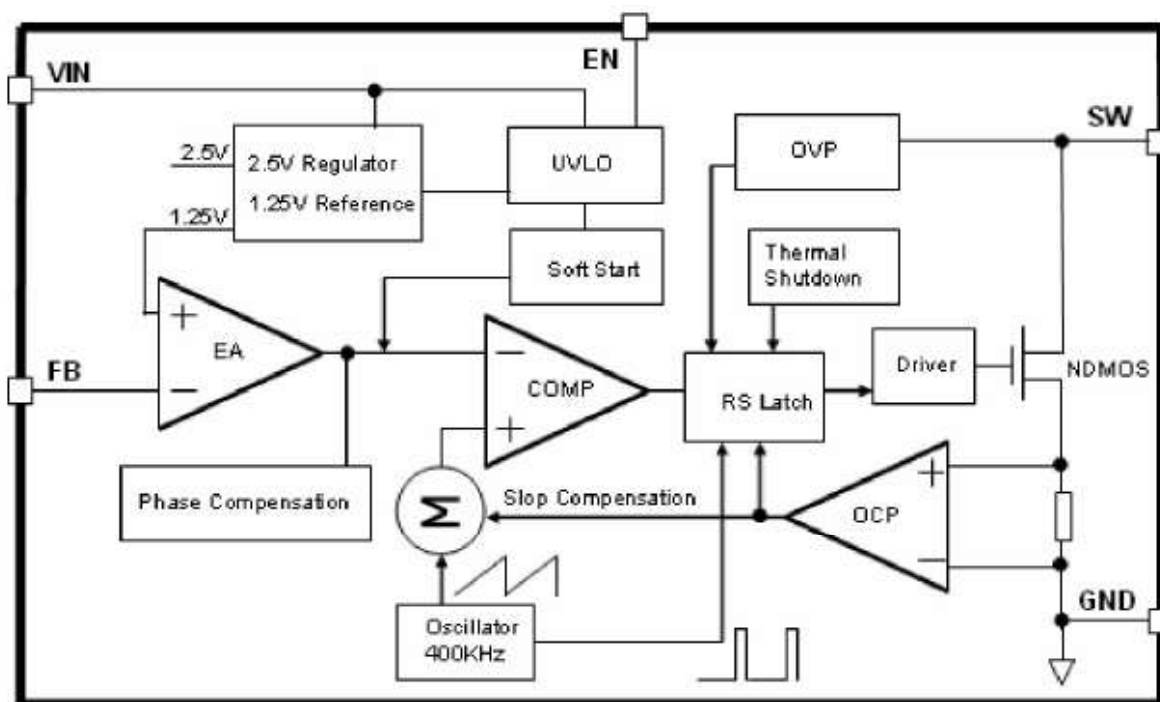


Figura 9: Esquemático do regulador XL6009

Fonte: 400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

Porém a princípio o modelo de conversor implementado por este CI que foi adquirido não realizava a conversão 5 V para 40 V, como era necessário. Sendo assim, foi implementado um dobrador de tensão no interior do circuito, como resultado da implementação tem-se o circuito apresentado na figura 10.

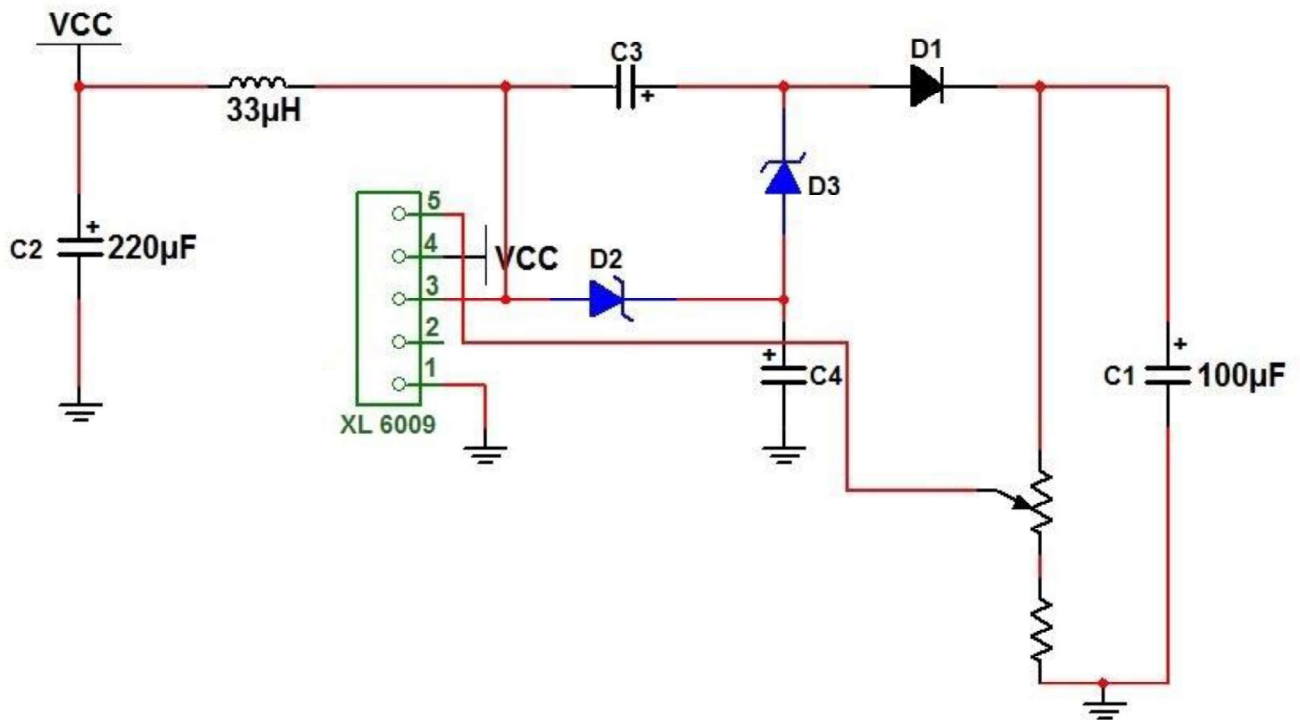


Figura 10: Circuito conversor DC-DC

Fonte: Autoria própria

Além disso, como já dito anteriormente, devido à necessidade de uma alimentação simétrica, foi derivada uma tensão de 20 V para a criação de uma fonte de alimentação simétrica que fornecesse +/- 10 V.

3.3 SISTEMA DE AMPLIFICAÇÃO DO SINAL DE ÁUDIO

O sistema de amplificação é composto por um sistema de pré-amplificação e sistema de amplificação que são alimentados pela fonte de alimentação simétrica, além do filtro RC e sistema de proteção. Cada uma destas partes foi desenvolvida e projetada para atender particularidades do equipamento.

3.3.1 Alimentação simétrica

Como mencionado anteriormente, a princípio pensou-se em aplicar o conceito de *single supply voltage* na alimentação dos amplificadores operacionais. Isto porque não se tinha previamente tensões simétricas disponíveis; sendo assim ao criar um sistema simétrico poderia ocorrer um problema quanto às referências dos circuitos. O

conceito de *single supply voltage* seria viável, pois nele é aplicada uma tensão na alimentação positiva do amplificador operacional e a alimentação negativa é conectada na referência do sistema, gerando uma diferença de potencial elétrico que o alimenta.

Entretanto devido às características dos amplificadores utilizados constatou-se que sua região de operação linear, aquela em ele obedeceria a configuração projetada, não seria possível quando alimentados em *single supply voltage*. Sendo assim passou-se a desenvolver um circuito para alimentação simétrica.

Para tal, foi utilizado o amplificador operacional UA741. Este amplificador operacional tem como característica o fato de não agregar *offset* ao sinal de entrada, o que o torna ideal para diversas aplicações, além de ser indicado para aplicações nas quais é empregada a configuração do seguidor de tensão (*μA741 General-Purpose Operational Amplifiers*, 2015)

O esquemático da figura 11 apresenta o diagrama simplificado deste componente. Nele pode-se observar que ele funciona basicamente pelo conceito de comparador.

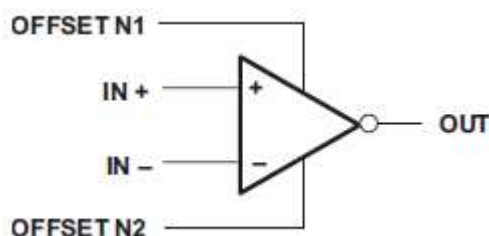


Figura 11: Esquemático simplificado do UA741.

Fonte: *μA741 General-Purpose Operational Amplifiers*, 2015.

A partir do esquemático base, proposto pelo *datasheet* fornecido pela TI, foi produzido uma configuração seguidor de tensão, na qual foi criado uma espécie de terra-virtual, mudando assim a referência do sistema. A partir do sistema de alimentação simétrica, abandonou-se a referência original do circuito elevador de tensão e passou a utilizar o terra-virtual para tal finalidade. Sendo assim a figura 12 apresenta o circuito desenvolvido.

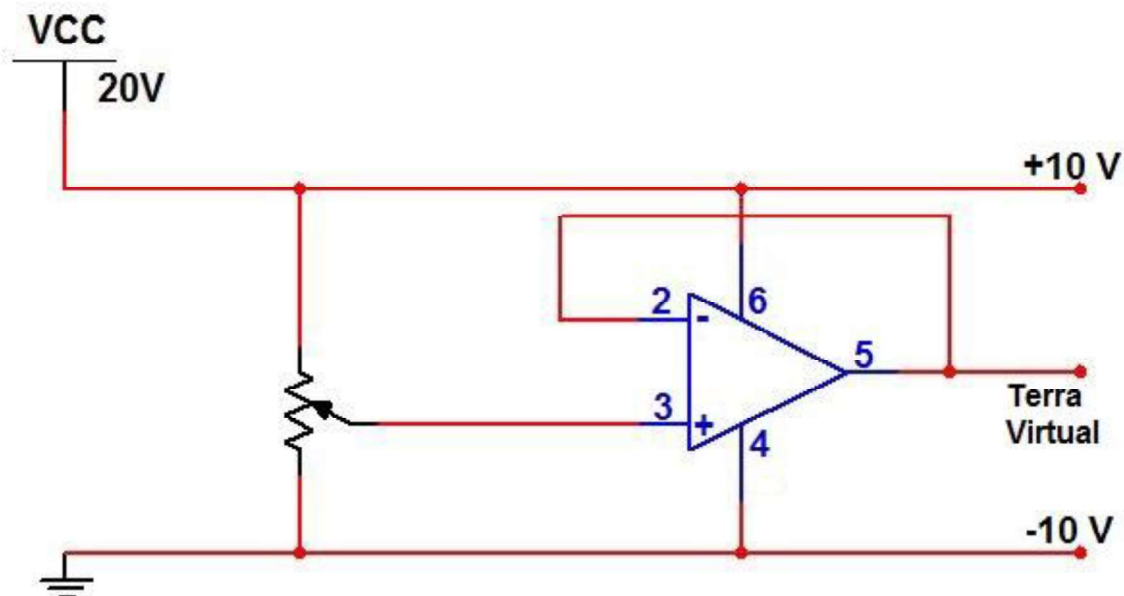


Figura 12: Circuito de alimentação simétrica.

Fonte: Autoria própria.

Como se pode observar através do circuito apresentado anteriormente, tem-se um divisor de tensão que transforma os 20 Volts derivados do circuito de alimentação e alimenta simetricamente a configuração. Para fins de maior precisão, foi empregado um potenciômetro para fino ajuste das tensões.

3.3.2 Sistema de Pré – Amplificação

O circuito de pré-amplificação é responsável por produzir um *offset* no sinal proveniente do microfone, com o objetivo de tornar positivos todos os valores de tensão do sinal, pois o TIVA trabalha com esse requisito. Sendo assim, foi projetada uma configuração de amplificadora somadora, que será descrita a seguir.

Medindo com o osciloscópio os valores máximos e mínimos produzidos pela voz no microfone, foi constatado que quando apenas se falava os valores de tensão eram em torno de -0,5 a 0,5 V e quando se gritava ou assoviava estes valores eram em torno de -2 a 2 V.

Sendo assim foram desenvolvidos dois circuitos distintos para pré – amplificação, um deles para quando seja necessário captar apenas sons na amplitude da fala, e outro para quando o som for proveniente de gritos ou assovios. A seguir são apresentados os dois projetos, utilizando o amplificador operacional OPA2137.

O primeiro projeto é para valores de tensão de entrada variando entre -0,5 a 0,5 V e tensões de saída variando entre 0 e 1,5 V, ou seja, quando o sinal de entrada produzido for de -0,5 V a configuração amplificadora entregará 0 V na saída, e quando for 0,5 V entregará 1,5 V.

Adotando a equação para o ganho do amplificador operacional como:

$$V_{OUT} = A.V_{IN} + B \quad (1)$$

Substituindo os valores de tensão descritos anteriormente na equação (1), tem-se a seguinte equação:

$$V_{OUT} = \frac{3}{2} V_{IN} + \frac{3}{4}$$

Utilizando como guia o artigo *Single-Supply Op. Amp. Design Techniques – Application Report* (TEXAS INSTRUMENTS, 2015) se observa que para o tipo de equação de ganho levantada o circuito será o apresentado pela figura 13.

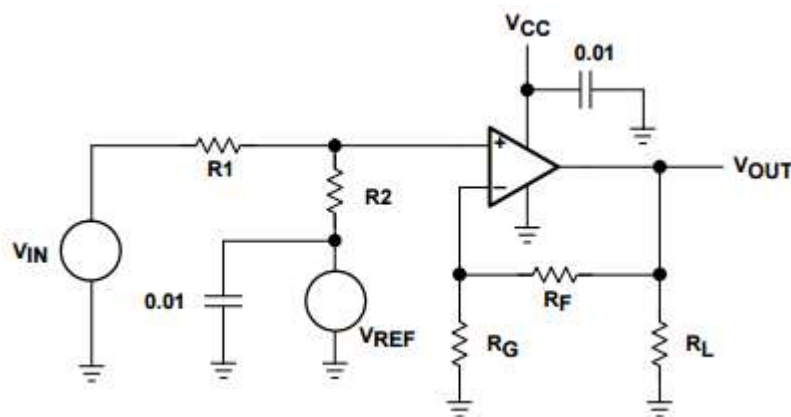


Figura 13: Circuito esquemático para configuração descrita.

Fonte: *Single-Supply Op. Amp. Design Techniques – Application Report*, 2001.

Além disso, o artigo traz as equações que relacionar os valores de A e B com os resistores a serem determinados, observando as seguintes relações.

$$A = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_f + R_g}{R_g} \right)$$

$$B = V_{ref} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_f + R_g}{R_g} \right)$$

Trabalhando as relações e utilizando um Vref de 5 V, se pode considerar $R_2 = 10R_1$ e $R_G = 1,538R_F$. Sendo assim, foram escolhidos resistores que obedecessem estas relações, sendo eles, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_G = 1,8 \text{ k}\Omega$ e $R_F = 1,2 \text{ k}\Omega$.

Apesar de estas técnicas apresentadas serem para aplicações operando em *single supply voltage*, pode-se aplicá-las em aplicações com alimentação simétrica sem nenhum prejuízo ou alteração. Logo o circuito da figura 14 apresenta o circuito implementado na aplicação.

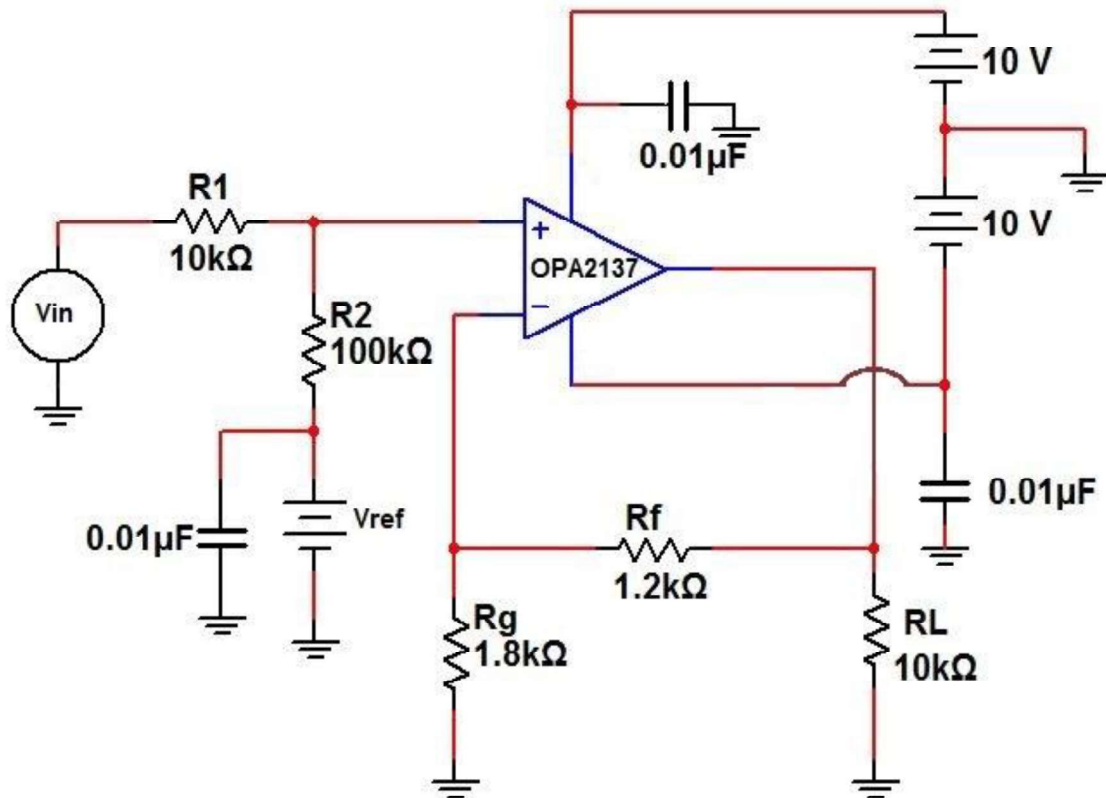


Figura 14: Circuito pré-amplificador primeiro projeto.

Fonte: Autoria própria.

O segundo projeto é para valores de tensão de entrada variando entre -2 a 2 V e tensões de saída variando entre 0 e 1,5 V, ou seja, quando o sinal de entrada produzido for de -2 V a configuração amplificadora entregará 0 V na saída, e quando for 2 V entregará 1,5 V.

Adotando novamente a equação (1) para o ganho do amplificador operacional e substituindo os valores de tensão descritos anteriormente, tem-se a seguinte equação:

$$V_{OUT} = \frac{3}{8} V_{IN} + \frac{6}{8}$$

Adotando os mesmos procedimentos e considerações realizados para o primeiro projeto, utilizando um $V_{ref} = 1$ V, foram escolhidos resistores que

obedecessem as relações determinadas, sendo eles, $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$, $R_G = 16 \text{ k}\Omega$ e $R_F = 2 \text{ k}\Omega$.

O circuito na figura 15 apresenta o esquemático implementado para o segundo projeto.

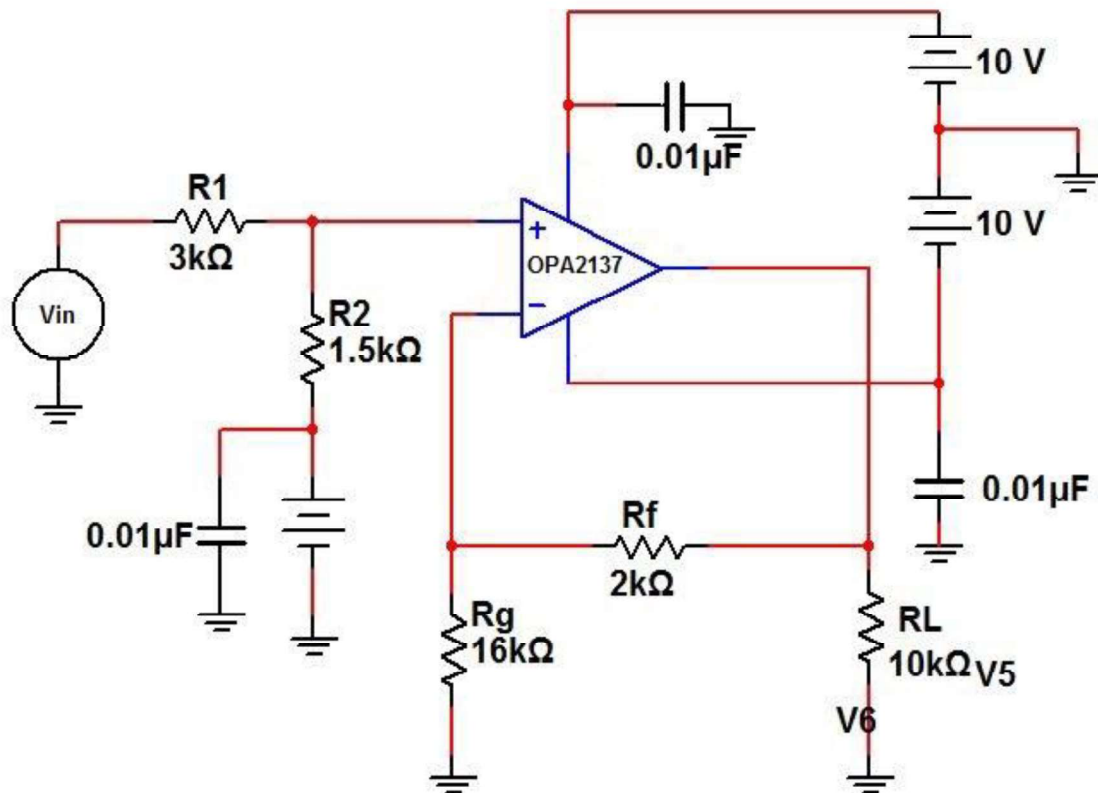


Figura 15: Circuito pré-amplificador segundo projeto.

Fonte: Autoria própria.

Após a implementação do circuito de pré-amplificação, aplicou-se sinais conhecidos, senóides, a fim de se observar o comportamento do circuito. Sendo assim, com o auxílio de um gerador de função conectado a entrada do circuito simulando o sinal produzido pelo microfone, foram produzidas ondas senoidais em diferentes frequências. Foram produzidas ondas em diferentes frequências para observar o comportamento do sistema diante de alterações em frequência, sendo assim foram simuladas as frequências de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz e 16 kHz, as quais representam os valores que a voz pode assumir.

As figuras 16 a 21 apresentam os resultados obtidos, sendo possível observar tanto a amplificação do sinal quanto ao *offset* produzido no sinal de entrada.

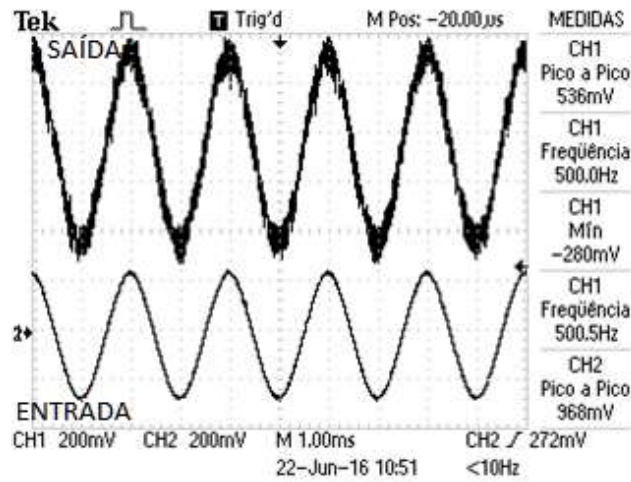


Figura 16: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 500 Hz

Fonte: Autoria própria.

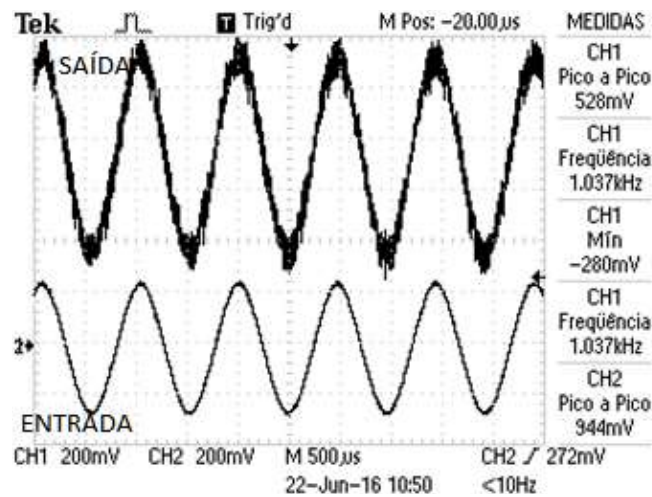


Figura 17: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 1 kHz

Fonte: Autoria própria.

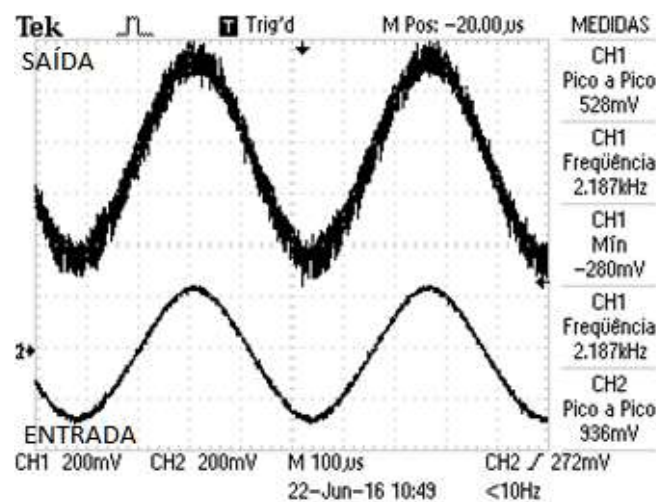


Figura 18: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 2 kHz

Fonte: Autoria própria.

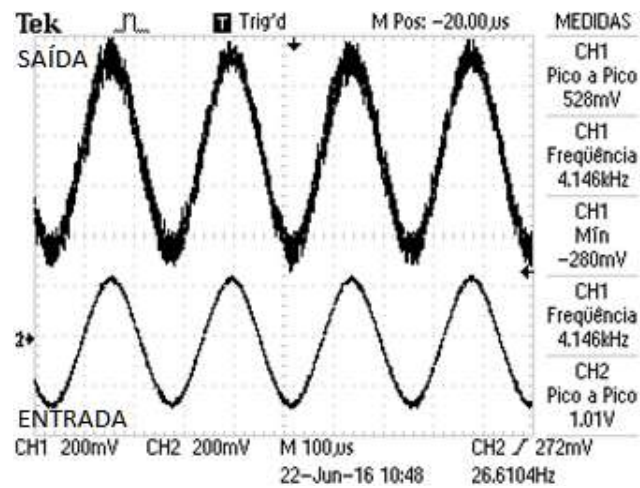


Figura 19: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 4 kHz

Fonte: Autoria própria.

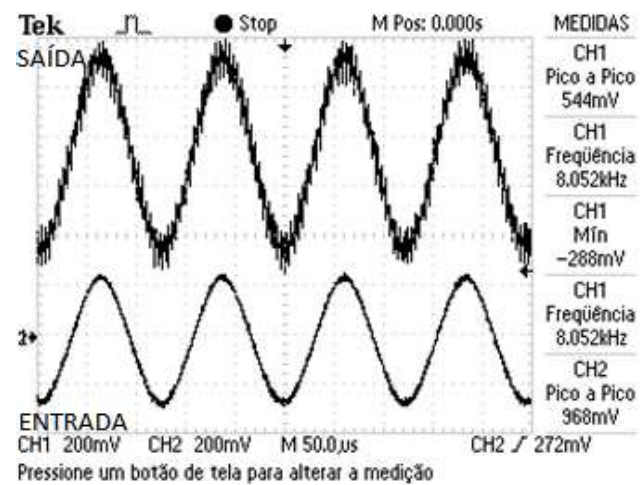


Figura 20: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 8 kHz

Fonte: Autoria própria.

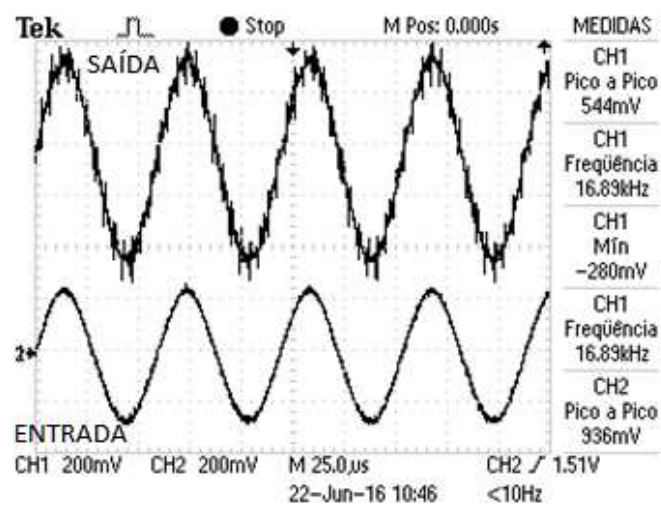


Figura 21: Entrada e Saída do Pré-Amplificador – 16 kHz

Fonte: Autoria própria.

A tabela 1 apresenta os valores de tensão de pico a pico obtidos para a entrada e saída do sistema de pré-amplificação. Nela se pode observar a proximidade dos valores obtidos quando ocorre variação na frequência. Como se pode observar, os valores pouco se alteram com a variação da frequência.

Frequência	Tensão de Pico a Pico (Entrada)	Tensão de Pico a Pico (Saída)
500 Hz	536 mV	968 mV
1 kHz	528 mV	944 mV
2 kHz	528 mV	936 mV
4 kHz	528 mV	1,01 V
8 kHz	544 mV	968 mV
16 kHz	544 mV	936 mV

Tabela 1: Valores de tensões referentes a pré-amplificação

Fonte: Autoria Própria

Para o segundo projeto, obtiveram-se as mesmas formas de onda diferindo apenas nos valores de pico a pico, pois para o segundo projeto foram utilizadas como sinais de entrada, tensões com amplitude de -2 a 2 V, variando as frequências nos mesmos valores do primeiro projeto.

3.3.3 Sistema de Amplificação

O sistema de amplificação é responsável por realizar uma amplificação no sinal proveniente do sistema de pré-amplificação, como este sinal já vem com um *offset*, a configuração apenas aplica um ganho ao sinal.

Para este sistema foi selecionado o amplificador operacional INA217, que é um componente de baixa distorção, baixo ruído e indicado para aplicações de áudio de alto nível. A figura 22 apresenta o esquemático simplificado do componente.

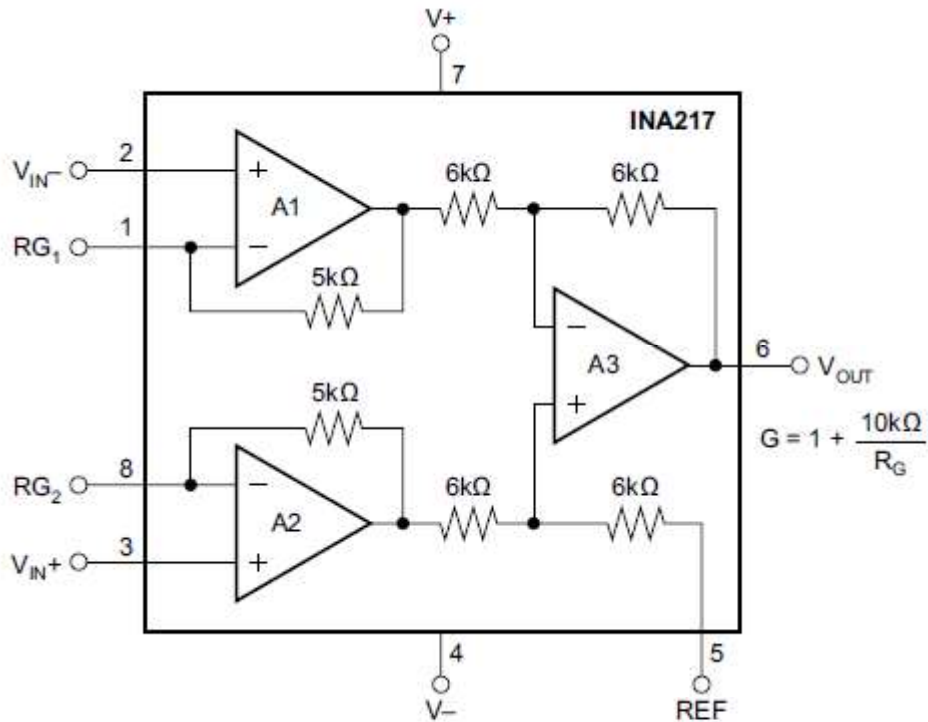


Figura 22: Esquemático simplificado INA217.

Fonte: *INA217 Low-Noise, Low-Distortion Instrumentation Amplifier Replacement for SSM2017*, 2015.

Analisando o esquemático, se observa que ele possui um ganho ajustável. Este ganho é definido pela equação $G = 1 + 10k/R_G$, sendo assim para se alterar o ganho deve-se ajustar R_G . Como o sinal de entrada do sistema de amplificação varia entre 0 e 1,5 V e o TIVA é capaz de ler valores de tensão entre 0 e 3,3 V, determinouse que o ganho seria no valor 2. Logo o resistor R_G foi ajustado em 10 kΩ, obtendo assim um ganho no valor 2.

O esquemático na figura 23 apresenta o circuito do sistema de amplificação, nele se pode observar as conexões realizadas.

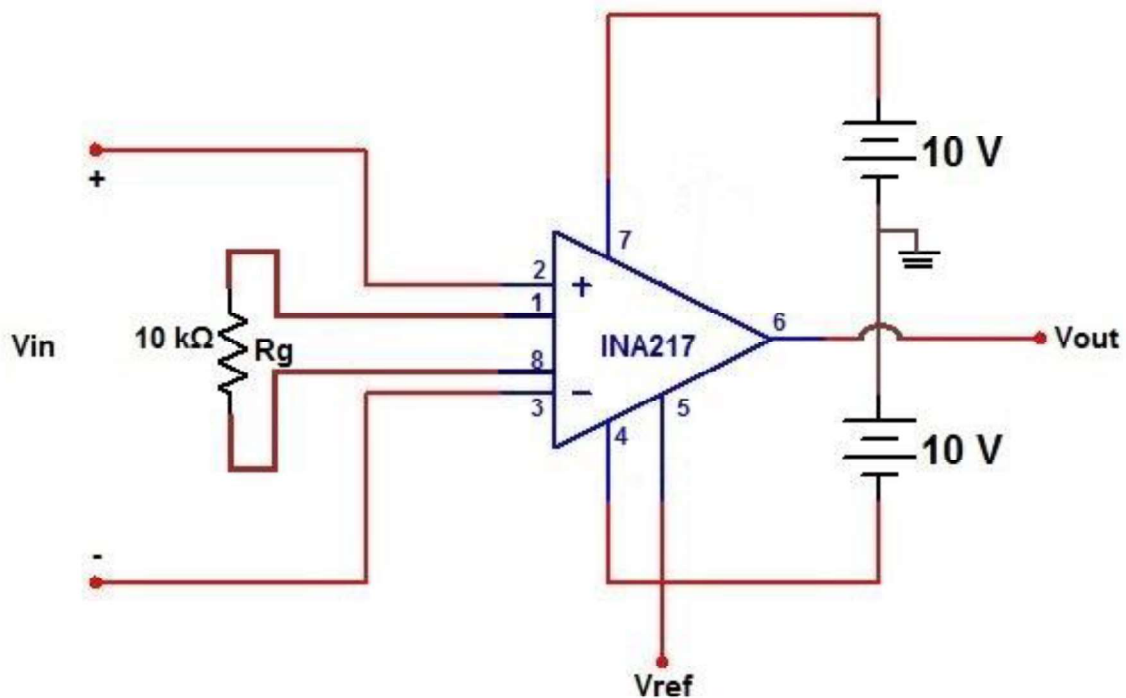


Figura 23: Circuito amplificador.

Fonte: Autoria própria.

Após a implementação do circuito de amplificação, assim como no de pré-amplificação, aplicou-se sinais conhecidos a fim de se observar o comportamento do circuito. Assim se acoplou o sistema ao circuito anterior, e foram realizadas as mesmas aquisições para as frequências descritas anteriormente.

As figuras 24 a 29 apresentam os resultados obtidos, sendo possível observar a amplificação.

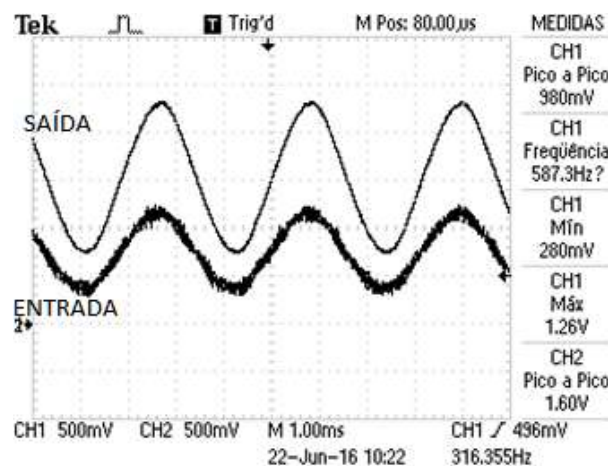


Figura 24: Entrada e Saída do Amplificador – 500 Hz

Fonte: Autoria própria.

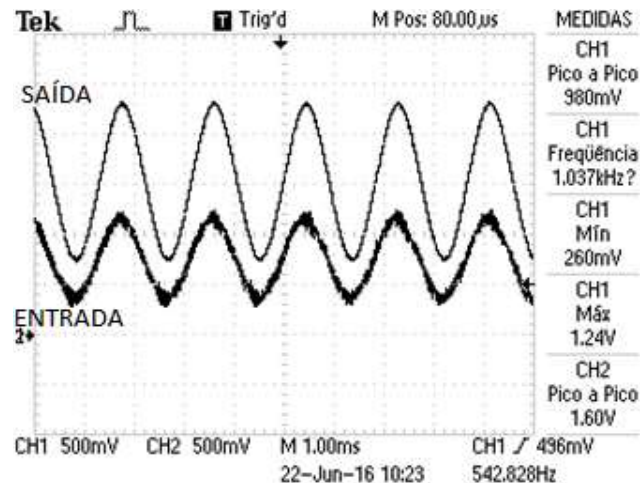


Figura 25: Entrada e Saída do Amplificador – 1 kHz
 Fonte: Autoria própria.

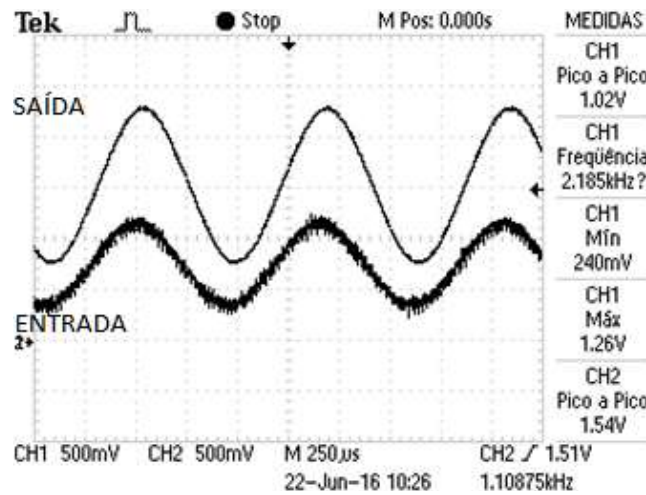


Figura 26: Entrada e Saída do Amplificador – 2 kHz
 Fonte: Autoria própria.

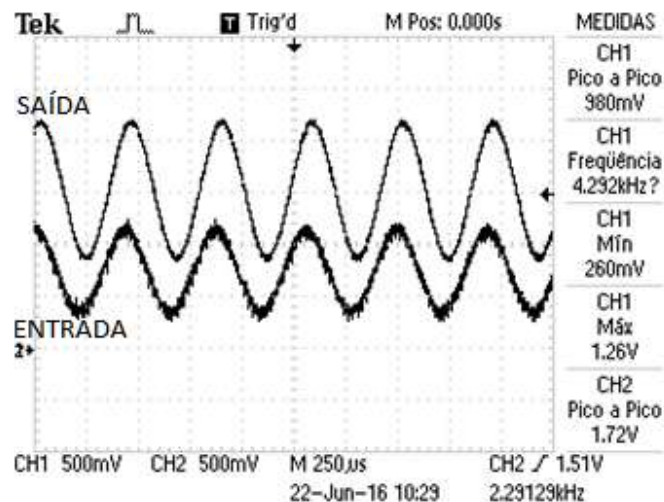


Figura 27: Entrada e Saída do Amplificador – 4 kHz
 Fonte: Autoria própria.

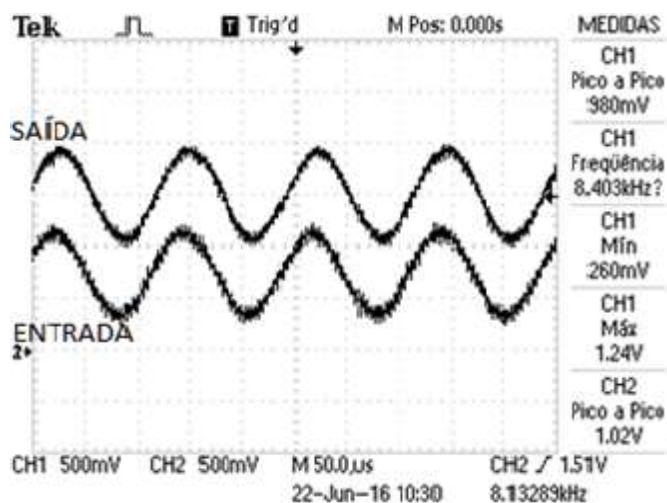


Figura 28: Entrada e Saída do Amplificador – 8 kHz

Fonte: Autoria própria.

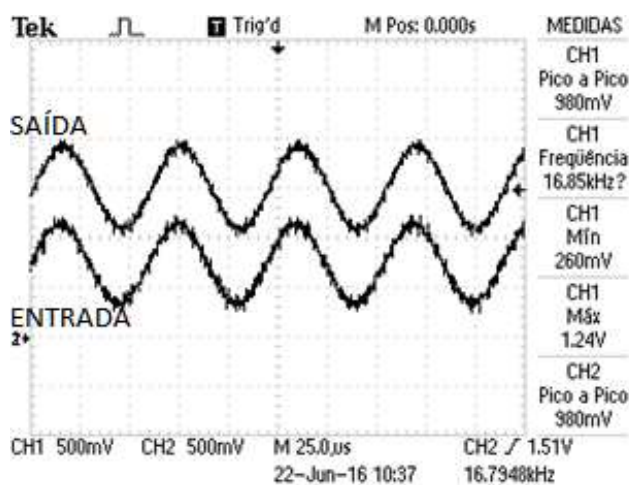


Figura 29: Entrada e Saída do Amplificador – 16 kHz.

Fonte: Autoria própria.

A tabela 2 apresenta os valores de tensão de pico a pico obtidos para a entrada e saída do sistema de amplificação. Nela se pode observar que existe muita variação entre os valores obtidos quando ocorre variação na frequência. Além disto, o ganho que deveria ser no valor de 2 não ocorreu, isso se deve a tolerância dos resistores utilizados, que não são precisos.

Frequência	Tensão de Pico a Pico (Entrada)	Tensão de Pico a Pico (Saída)
500 Hz	980 mV	1,60 V
1 kHz	980 mV	1,60 V

2 kHz	1,02 V	1,54 V
4 kHz	980 mV	1,72 V
8 kHz	980 mV	1,02 V
16 kHz	980 mV	980 mV

Tabela 2: Valores de tensões referentes a amplificação

Fonte: Autorial Própria

Analisando as formas de onda obtidas para entradas e saídas pode-se observar a concordância entre o projeto e o resultado, infelizmente não foi possível gerar uma senóide de -0,5 a 0,5 V devido a limitações dos geradores de funções disponíveis.

3.3.4 Filtro RC e sistema de proteção

Apesar de serem amplificadores operacionais robustos e de alta qualidade, o OPA2137 acrescentou ao sinal amplificado um ruído indesejável, que pode ser observado nas formas de ondas apresentadas anteriormente. Além disto, a frequência do sinal analógico deveria estar dentro dos valores possíveis de leitura pelo conversor A/D.

Adotando o teorema de Nyquist, tem-se que a frequência do sinal de entrada deve ser igual ou menor que a metade da frequência de amostragem. Como sinais de áudio podem chegar a 20 kHz e a frequência de amostragem é de 10 kHz, se fez necessário um filtro passa-baixa. Sendo assim foi adotado a configuração do filtro RC passa-baixa com frequência de corte de 5 kHz. A figura 30 ilustra o esquemático do circuito.

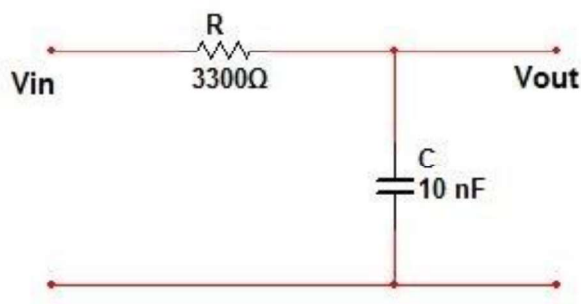


Figura 30: Circuito filtro RC passa-baixa.

Fonte: Autorial própria.

A frequência de corte se relaciona com os valores de resistência e capacitância pela equação apresentada a seguir.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

Sabendo que a frequência de corte é de 5 kHz, se pode determinar valores para o resistor e capacitor que obedeçam a equação (2). Sendo assim, foram empregados um resistor de 3,3 k Ω e um capacitor de 10 nF.

O sistema de proteção, como já citado, foi desenvolvido para proteção de sobre tensão no TIVA. Para isso utilizou-se uma configuração típica para este tipo de aplicação, na qual emprega dois diodos, um com seu cátodo em 3,3 V e ânodo no pino do TIVA, e o segundo com o ânodo no terra e o cátodo no pino. Esta configuração pode ser observada na figura 31.

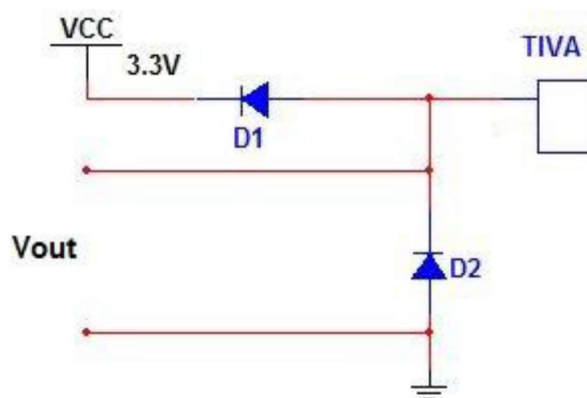


Figura 31: Circuito de proteção.

Fonte: Autoria própria.

3.4 ALGORITMOS IMPLEMENTADOS NO MICROCONTROLADOR

Além das interconexões físicas entre os dispositivos, foi necessária a implementação de algoritmos para que os objetivos do projeto fossem atingidos. Os códigos escritos para este projeto foram feitos na linguagem C++. Para a compilação base do projeto foi utilizado o software Energia, criado a partir das bibliotecas presentes no software TivaWare fornecido pela Texas Instruments, porém com uma interface feita na linguagem Java e com grande aplicabilidade em Arduino. Foram utilizadas algumas bibliotecas prontas fornecidas pelo software, salvo algumas modificações feitas para adaptação na placa de avaliação TIVA TM4C1294XL.

Alguns dos algoritmos utilizados estão explicados abaixo, como interrupções e o módulo Ethernet cliente-servidor bem como uma breve descrição do software.

3.4.1 Energia Software

Energia é uma IDE (*Integrated Development Environment*) de código aberto, guiada e desenvolvida pelos utilizadores dos fóruns da Texas Instruments. A IDE fornece um ambiente intuitivo de código assim como aplicações e bibliotecas de uso extremamente intuitivos. O Energia suporta muitos processadores desenvolvidos pela Texas e permite a integração de muitas placas de desenvolvimento, assim como a TIVA-C *Launchpad* (TEXAS INSTRUMENTS, 2014). O código aberto está hospedado no gerenciador de versões de arquivos GitHub e qualquer pessoa pode ter acesso e fazer uma cópia sem nenhuma restrição. Além disso, o ambiente de desenvolvimento já oferece inúmeros exemplos de códigos já prontos e integrações pré desenvolvidas, como códigos para servo motores, controle de infravermelho, telas de cristal líquido e outras. Algumas dessas aplicações podem ser observadas na figura 32 abaixo.

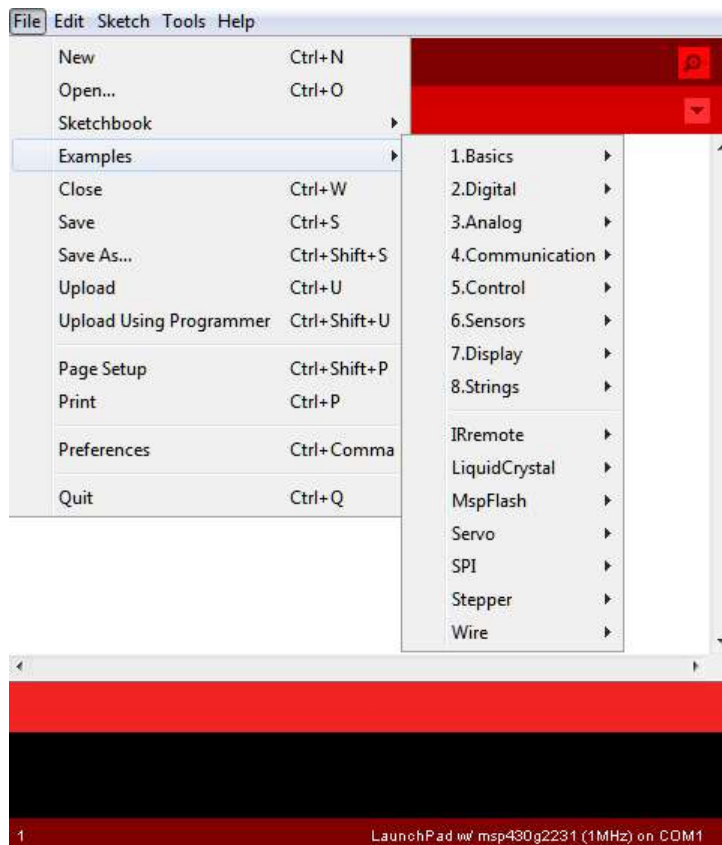


Figura 32: Exemplos presentes na IDE Energia

Fonte: Autoria própria

3.4.2 Interrupções

Uma interrupção é uma quebra no fluxo normal de execução de programas dentro de um microprocessador/microcontrolador a partir de um sinal ou condição pré-programados para tal fim, como pode ser visto na figura 33.

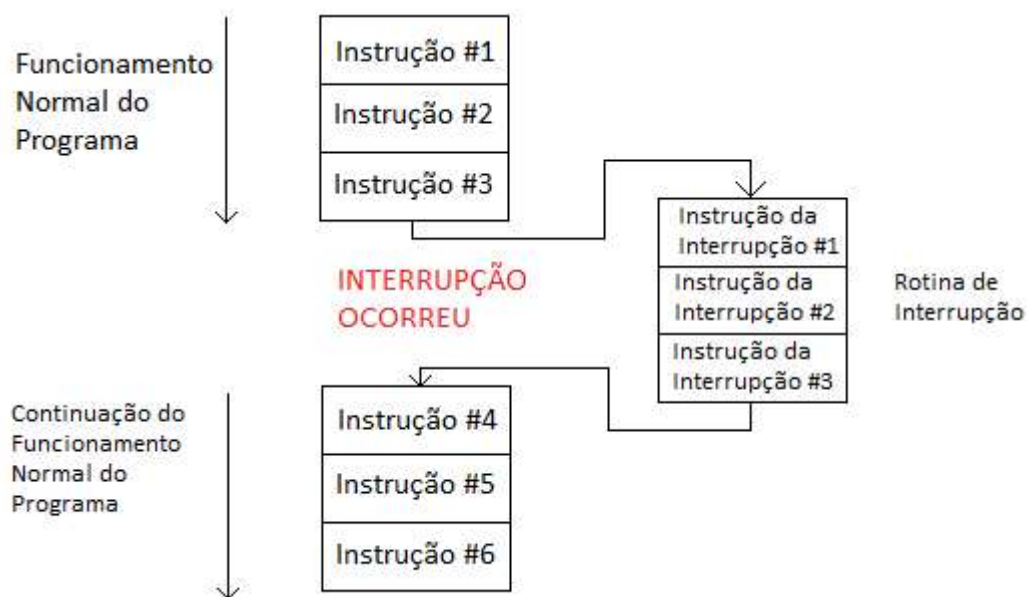


Figura 33: Comportamento de uma interrupção

Fonte: Autoria própria

Como um exemplo comum, se podem citar os microprocessadores. Os microprocessadores seguem uma lista de instruções pré-definidas até que um sinal ou uma condição sejam detectados. A partir dessa detecção, as condições impostas dentro da interrupção são seguidas sem parar o processo todo. O que traz a ideia de *multitasking*, ou seja, o usuário pode fazer o uso de vários processos dentro do mesmo computador ao mesmo tempo.

Dentro dos microprocessadores, há uma parte importante do código chamada *interrupt handler* que não é nada mais que uma lista de prioridades para as interrupções e como elas devem ser acionadas. Há também interrupções que podem ser acionadas usando o temporizador do microcontrolador. Desse modo, pode-se programar as interrupções de modo que elas ocorram em um intervalo regular de tempo. (EMBEDDS, 2010).

Os usos das interrupções no projeto estão implícitos na aplicação de captura de dados analógicos, previamente desenvolvida, porém algumas modificações foram

realizadas, pois a aplicação foi inicialmente desenvolvida para a integração com a placa de avaliação TM3C123, também da Texas Instruments. Na figura 34 segue o trecho de código alterado para comunicação e correta configuração do TIVA.

```
uint16_t analogRead(uint8_t pin)
{
    uint8_t port = digitalPinToPort(pin);
    uint16_t value[1];
    uint32_t channel = digitalPinToADCIn(pin);
    if (pin == NOT_ON_ADC) { //invalid ADC pin
        return 0;
    }
    ROM_SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_ADC0);
    ROM_GPIOPinTypeADC((uint32_t) portBASERegister(port), digitalPinToBitMask(pin));
    ROM_ADCSequenceConfigure(ADC0_BASE, 3, ADC_TRIGGER_PROCESSOR, 0);
    ROM_ADCSequenceStepConfigure(ADC0_BASE, 3, 0, channel | ADC_CTL_IE | ADC_CTL_END);
    ROM_ADCSequenceEnable(ADC0_BASE, 3);

    ROM_ADCIntClear(ADC0_BASE, 3);
    ROM_ADCProcessorTrigger(ADC0_BASE, 3);
    while(!ROM_ADCIntStatus(ADC0_BASE, 3, false))
    {
    }
    ROM_ADCIntClear(ADC0_BASE, 3);
    ROM_ADCSequenceDataGet(ADC0_BASE, 3, (unsigned Long*) value);
    return value[0];
}
```

Figura 34: Código de captura de dados

Fonte: Autoria Própria

Anteriormente, como o código era baseado em outra arquitetura de microcontrolador, não era possível a aquisição dos dados pela placa TM4C1294XL, pois os módulos de conversão analógica digital e os *sequencers* utilizados não estavam de acordo com o microcontrolador utilizado. Dessa forma foram adicionadas linhas de código para a correta inicialização dos módulos. Assim, a função *analogRead* pode ser utilizada necessitando apenas do pino como argumento, como pode ser visto na figura 35.



```
File Edit Sketch Tools Help
AnalogReadSerial $
/*
  AnalogReadSerial
  Reads an analog input on pin 0.
  */

void setup() {
}

void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0);
}
```

Figura 35: Função de leitura da porta analógica

Fonte: Autoria Própria

Assim, as interrupções estão rodando dentro do código da captura de dados analógicos, que por sua vez está implementado em uma função básica de ser utilizada.

3.4.3 Módulo Ethernet

Aproveitando o uso da interface Ethernet presente na placa de avaliação adquirida para este projeto, conseguiu-se a transmissão dos dados utilizando um cabo de rede.

A IDE Energia disponibiliza uma biblioteca ethernet para que seja possível a integração de um Arduino com um Arduino Ethernet Shield. Entretanto, aproveitando a estrutura de códigos já presente na IDE, alguns módulos de comunicação foram modificados a fim de criar um servidor dentro do TIVA, que pudesse comunicar com *hosts* que tivessem acesso a mesma rede da placa de avaliação.

Já que o TIVA possui uma placa de rede interna, foi utilizado o protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) para a completa configuração e transmissão de dados para o dispositivo.

3.4.4 Aplicação da arquitetura TCP/IP

O protocolo TCP/IP foi escolhido por se tratar de um protocolo de fácil utilização e com aplicações não limitadas a rede local de computadores. Basicamente o protocolo é o conjunto de vários outros pequenos protocolos que trabalham em equipe de forma a entregar o serviço de rede nos computadores. O protocolo é composto de camadas que interagem entre si e estão divididas em quatro camadas, que podem ser vistas na figura 36.

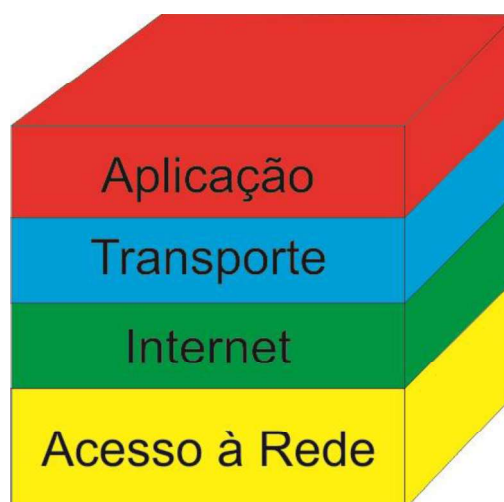


Figura 36: Camadas TCP/IP

Fonte: Autoria Própria

A camada de acesso à rede é a camada mais próxima do dispositivo e a camada de aplicação é a mais perto do usuário, portanto a configuração do TIVA foi realizada na primeira camada do protocolo, com a definição de qual camada física iria ser utilizada, neste caso a Ethernet, bem como o endereço físico do dispositivo, representado por seu *MAC address*. Após isso, na camada de Internet foram definidos os endereços de IP do servidor, de forma que ele tivesse um endereço para servir de entrada para os usuários.

Na terceira camada, a camada de transporte, foi definido como os bits seriam transmitidos, que no caso deste projeto foi escolhido a TCP por ser o protocolo mais usual e já previamente programado nas bibliotecas da IDE. E por último, na camada de aplicação, foi escolhido o protocolo Telnet para a comunicação do usuário com o

servidor, por se tratar de um protocolo padrão de Windows e Linux, o que tornou fácil a integração final.

Outro motivo pelo protocolo TCP/IP ter sido escolhido, é pela facilidade de ser acessado, uma vez com conexão à internet. Considerando que a placa de avaliação esteja conectada em um roteador com acesso à internet, qualquer pessoa de qualquer lugar do mundo pode requerer o início da captura de dados da aplicação, tendo o endereço de IP externo com as portas Telnet devidamente redirecionadas e um login de autenticação. Este esquema está ilustrado na figura 37.



Figura 37: Acesso ao servidor via internet

Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS

Após a realização de todos os testes necessários em todos os módulos do equipamento, foram recolhidos dados para a demonstração da correta funcionalidade do mesmo e as seguintes respostas foram obtidas, vista na figura 38.

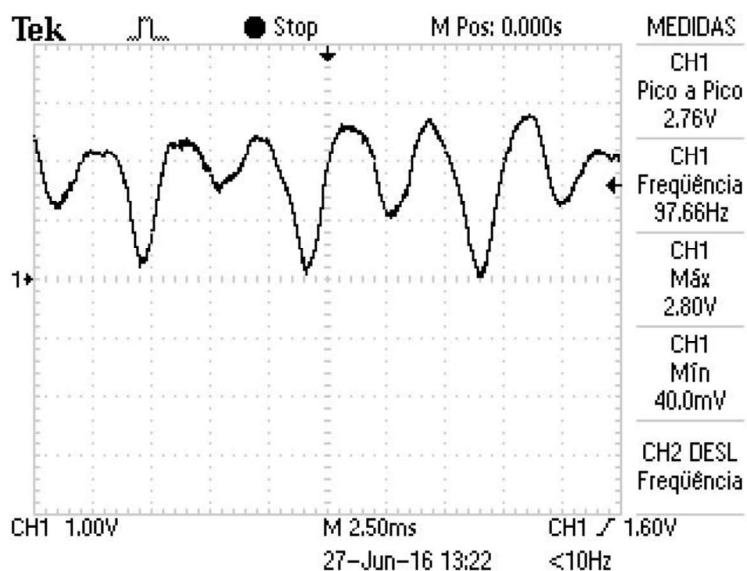


Figura 38: Fonema /u/ no osciloscópio

Fonte: Autoria Própria

A imagem da figura 37 demonstra o correto funcionamento do sistema utilizando a pronúncia da vogal /u/ no microfone. Sem os tratamentos de dados, ampliações e filtros, o gráfico teria um aspecto ruidoso do fonema demonstrado acima, pois a amplitude de saída é aproximadamente quatro vezes menor. Além disso, para comprovar o funcionamento da transmissão de dados, a voz foi coletada via telnet pela API desenvolvida e os dados foram transferidos para o Matlab, que gerou a figura 39.

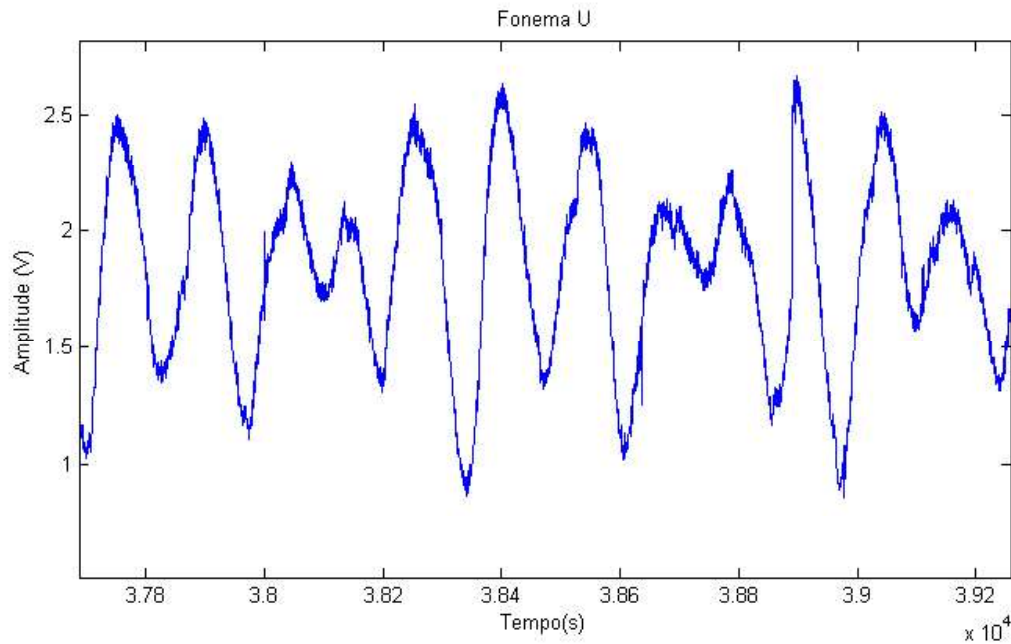


Figura 39: Fonema /u/ no Matlab

Fonte: Autoria Própria

Assim, com a demonstração da mesma onda capturada no osciloscópio reproduzida no Matlab, pode-se dizer que tanto a parte física do projeto quanto a parte de programação satisfazem os requisitos previamente sugeridos. Em adição as imagens do osciloscópio, é sugerido um layout de placa de circuito impresso para evitar a montagem do circuito em protoboards, o que ocasiona o surgimento de ruídos, algumas vezes muito difíceis de serem eliminados. A figura 40 nos anexos, mostra o layout completo da PCI. Além disso, as figuras 41 e 42, também nos anexos, mostram uma representação em três dimensões da placa.

5 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Apesar dos objetivos terem sido atingidos, foram enfrentados muitos percalços, principalmente no circuito de potência e na conversão analógica digital.

5.1 DIFICULDADES NO CIRCUITO DE POTÊNCIA

Quanto ao circuito de potência, a maior dificuldade encontrada foi na estabilidade do sistema. Como ele deveria ser um conversor *Boost* com uma tensão de saída (40 V) muito maior que a tensão de entrada (5 V), foram implementadas várias alternativas, porém sem muito sucesso.

Após algumas tentativas em construir um conversor, optou-se por realizar a adaptação de um adquirido. Esta adaptação foi descrita em tópicos anteriores.

5.2 DIFICULDADES NA CONVERSÃO ANALÓGICA DIGITAL

A primeira proposta do trabalho era utilizar um conversor analógico digital externo, com uma resolução de 24 bits e uma frequência de 48 kHz. Para isso, seria utilizado o componente PCM 1807 da Texas Instruments, um conversor analógico digital específico para áudio. Além disso, a comunicação entre o conversor AD e a placa de avaliação iria utilizar o protocolo I²S, específico para áudio também.

Contudo, após várias tentativas de utilizar esse componente, foi sugerida uma alternativa, por funcionários da TI, ao uso do conversor analógico digital do próprio microcontrolador utilizado, que segundo eles é extremamente potente e rápido para uma aplicação que não pretende ser comercializada.

Dessa forma, a busca pela integração do conversor analógico digital externo com a placa de avaliação foi descontinuada, ficando como sugestão para trabalhos futuros, pois essa integração não funcionou.

6 CONCLUSÃO

Fazendo uso da metodologia proposta e baseando-se na revisão bibliográfica, foi possível atingir o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

O estudo preliminar em eletrônica e programação foi fundamental para a concepção deste projeto, visto que vários conceitos aqui apresentados fazem parte da ementa destas disciplinas.

O desenvolvimento do equipamento foi dividido em partes, as quais foram descritas anteriormente, cada parte foi testada após sua implementação, sendo assim, quando finalizadas a integração foi concluída facilmente.

Unindo os conceitos de eletrônica, circuitos e sinais e sistemas, pode-se desenvolver a alimentação adequada ao microfone e os sistemas de amplificação. O sistema de alimentação foi fundamental para o funcionamento do microfone, e o sistema de amplificação foi responsável por tratar os sinais de nível de tensão em mili Volts e transformar em sinais na ordem de Volts.

Devido ao ruído produzido pelo componente OPA2137, que em pesquisas preliminares foi apresentado como indicado para aplicações de áudio, mas na implementação se mostrou menos eficaz, ocorreu a necessidade de um filtro RC passa-baixa. Além de fornecer um sinal melhorado, este sistema adequa a frequência do sinal a frequência de leitura do conversor A/D, seguindo o teorema de Nyquist.

A captura de dados feita pelo conversor A/D da placa de avaliação se mostrou eficiente, porém sem poder ser utilizado em sua totalidade, devido a IDE utilizada. A IDE utilizada não possui as interrupções com fácil acesso para edição, o que limita a velocidade de captura dos dados, podendo em um trabalho futuro ser utilizado o método μ DMA, o que deixaria a aquisição de dados melhor, uma vez que os dados seriam coletados diretamente da memória, deixando de lado passos de envio e retirada de dados de um *buffer*.

Além disso, a transmissão de dados coletados pelo microfone via Ethernet utilizando o protocolo TCP/IP teve sucesso, abrindo uma variedade enorme de aplicações para trabalhos futuros, como reduzir o tamanho do equipamento a fim de utilizá-lo em uma escuta, por exemplo.

Outra sugestão para trabalho futuro seria a de implementar um protocolo Wi-Fi, onde ao invés de um cabo de rede, a placa de avaliação faria uso de um dongle Wi-Fi para transmissão de dados.

REFERÊNCIAS

AKG Acoustics, *C451B small-diaphragm condenser microphone*. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AKG_C451B.jpg> Acesso em 02 de jul. 2016.

BAI, Y., *Practical Microcontroller Engineering With Arm*, p. 469. Wiley-IEEE Press, 2015.

BAKER, Bonnie. *How Delta-Sigma ADCs work, Part 1. Analog Applications Journal*. 2011. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slyt423/slyt423.pdf>>. Acesso em 17 nov. 2015.

BAKER, Bonnie. *How Delta-Sigma ADCs work, Part 2. Analog Applications Journal*. 2011. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slyt438/slyt438.pdf>>. Acesso em 17 nov. 2015.

BERLIN, Howard M. **Aplicações para o 555**. São Paulo: Editora Técnica Eletrônica Ltda, 1983.

CORMEN, Thomas H. et al. *Introduction to Algorithm, Second Edition*. Massachusetts: The MIT Press, 2001.

ELECTRIC IMP, *Introduction to the Standard Serial Bus*. Disponível em: <<https://electricimp.com/docs/resources/uart/>>. Acesso em 20 nov. 2015.

EMBEDDS. *Basic Understanding of Microcontroller Interrupts*. Disponível em: <<http://www.embedds.com/basic-understanding-of-microcontroller-interrupts/>>. Acesso em 19 nov. 2015.

ENGINEERING ACOUSTICS, *Microphone Design and Operations*. Disponível em: <https://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Microphone_Design_and_Operation> Acesso em 02 jul. 2016.

ENGINEERS GARAGE. *Insight - How XLR Connector Works*. Disponível em: <<http://www.engineersgarage.com/insight/how-xlr-connector-works?page=1>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

FUTURE ELECTRONICS, *What is a PLL?*. Disponível em: <<http://www.futureelectronics.com/en/wireless-rf-radio-frequency/pll-phase-locked-loop.aspx>> Acesso em 29 nov. 2015.

MAXIM INTEGRATED, *Understanding SAR ADCs: heir Architecture and Comparison with Other ADCs*. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1080>>. Acesso em 16 nov. 2015.

MCCOWAN, I. Disponível em: <<http://www.idiap.ch/~mccowan/arrays/arrays.html>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

MEDIA COLLEGE. *Directional Properties*. Disponível em: <<http://www.mediacollege.com/audio/microphones/directional-characteristics.html>>. Acesso em: 6 nov. 2015.

NPTEL, *Mechatronics and Manufacturing Engineering Automation – Module 2: Sensors and signal processing – Lecture 8: Data conversion devices*. Disponível em: <<http://nptel.ac.in/courses/112103174/module2/lec8/2.html>>. Acesso em 15 nov. 2015.

PHILLIPS SEMICONDUCTORS, *I²S bus specification*. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>>. Acesso em 18 nov. 2015.

RISLEY M. et al., *Dual-SPI Emulating I2S on Tiva™ C Series TM4C123x MCUs*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/spma042b/spma042b.pdf>>. Acesso em 11 nov. 2015.

SIMPLE MACHINES, *How do I use FTP?*. Disponível em: <http://wiki.simplemachines.org/smf/FTP_-_How_do_I_use_FTP>. Acesso em 29 nov. 2015.

TEXAS INSTRUMENTS, *INA217 Low-Noise, Low-Distortion Instrumentation Amplifier Replacement for SSM2017*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina217.pdf>> Acesso em 10 abr. 2016.

TEXAS INSTRUMENTS, *LM555 datasheet*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

TEXAS INSTRUMENTS, *PCM 1807 datasheet*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm1807.pdf>>. Acesso em 11 nov. 2015.

TEXAS INSTRUMENTS, *Single-Supply Op. Amp. Design Techniques – Application Report*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/sloa030a/sloa030a.pdf>> Acesso em 03 mai. 2016.

TEXAS INSTRUMENTS, *Tiva™ C Series TM4C1294 Connected LaunchPad Evaluation Kit – User's Guide*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/spmu365b/spmu365b.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

TEXAS INSTRUMENTS, *TivaWare™ USB Library User's Guide*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/spmu297a/spmu297a.pdf>> Acesso em 29 nov. 2015.

TEXAS INSTRUMENTS, *μA741 General – Purpose Operational Amplifiers*. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>> Acesso em 15 mar. 2016.

TORRES, Gabriel, *How Analog-to-Digital Converter (ADC) Works*. Disponível em: <<http://www.hardwaresecrets.com/how-analog-to-digital-converter-adc-works/>> Acesso em 12 nov. 2015.

YAMAHA COMERCIAL AUDIO, *Which types of Microphones Are Used with PA Systems?* Disponível em: <
http://www.yamahaproaudio.com/global/en/training_support/selftraining/pa_guide_beginner/microphone/ > Acesso em 02 de jul. 2016.

APÊNDICE

Código base desenvolvido na IDE Energia para captura de dados.

```

/*
  TCC 2 - Capture Audio Device with TELNET client and TCP/IP

  A program that sends data captured from ADC0 through ADC3
  to the TELNET client connected. Used with TI TIVA TM4C1294XL

  Circuit:
  * Analog inputs attached to pins A0 through A5 (optional)

  Created in April, 25th.
  See release logs on releaseNotes.txt

  Created by:
  Alexandre Lara (delara.alexandre@gmail.com)
  Carla Eduarda (carlaeduarda.orlando@gmail.com)

  Free distribution
  */

#include <Ethernet.h>
#include <EthernetClient.h>
#include <EthernetServer.h>

// Enter the MAC address of your TIVA below(paper sticker on TIVA)
// in hex format
byte mac[] = {0x00, 0x1A, 0xB6, 0x02, 0xEF, 0xD1 };

// Enter the IP address you want for you TIVA (it depends on your
// local network)
IPAddress ip(192,168,25,100);

// Enter the default gateway ** OPTIONAL
IPAddress gateway(192,168,25,1);

// Enter the subnet mask ** OPTIONAL
IPAddress subnet(255,255,255,0);

//Defining the TELNET server
EthernetServer server(1023);
boolean alreadyConnected = false; // whether or not the client was
connected previously
const int analogInPin = A0; // Analog input pin that the microphone
is attached to

int micValue = 0; // value read from the mic

```

```

void setup() {
  // initialize the ethernet device
  Ethernet.begin(mac, ip, gateway, subnet);
  // start listening for clients
  server.begin();

  Serial.begin(9600);

  Ethernet.enableLinkLed();
  Ethernet.enableActivityLed();
}

void loop() {
  // wait for a new client:
  EthernetClient client = server.available();

  // when the client sends the first byte, say hello:
  if (client) {
    if (!alreadyConnected) {
      // clear out the input buffer:
      client.flush();
      client.println("Hello, client! I knew you'd come back :)");
      client.println("Press return key to continue");
      alreadyConnected = true;
    }

    char thisChar = 'j'; //default

    if (client.available() > 0) {
      //client.writeMenu();
      // read the bytes incoming from the client:
      thisChar = client.read();

      //Code to clear the screen where \u001B means ESC and [2J is a
special sequence

      switch(thisChar){
        case '1':
          client.write("\u001B[2J");
          client.write("Press spacebar at anytime to stop reading");
          delay(2000);
          client.write("\u001B[2J");
          do{
            micValue = analogRead(analogInPin);          //PE3
            // print the results to the serial monitor:
            client.print("sensor = ");
            client.println(micValue);
            Serial.println(micValue);
            delay(10);
          }

```

```
        }while(client.read() != 'p'); //Change this later
        client.write("Those values have been saved to your
directory!");
        delay(2000);
        client.write("\u001B[2J");
        thisChar = ',';
        break;

    case '2':
        client.write("\u001B[2J");
        client.write("See you later!");
        delay(1000);
        client.stop();
        break;

    case '3':
        client.write("\u001B[2J");
        client.write("This project was developed as a final
project work for the conclusion\r\n");
        client.write("of Control and Automation Engineering. It is
an audio capture device\r\n");
        client.write("using a condenser microphone to capture the
audio signal. The analog\r\n");
        client.write("signal is read by the TIVA's analog-to-
digital converter, and sent to\r\n");
        client.write("the computer by a TELNET session. A pre-
amplifier circuit is used to\r\n");
        client.write("make signal to become readable by the
ADC.\r\n\r\n");
        client.write("Press any key to return\r\n\r\n");
        thisChar = ',';
        break;

    default:
        client.write("\u001B[2J");
        client.writeMenu();
        client.write("Type the desired option: ");
        thisChar = client.read();
        break;
    }
}
}
```

ANEXOS

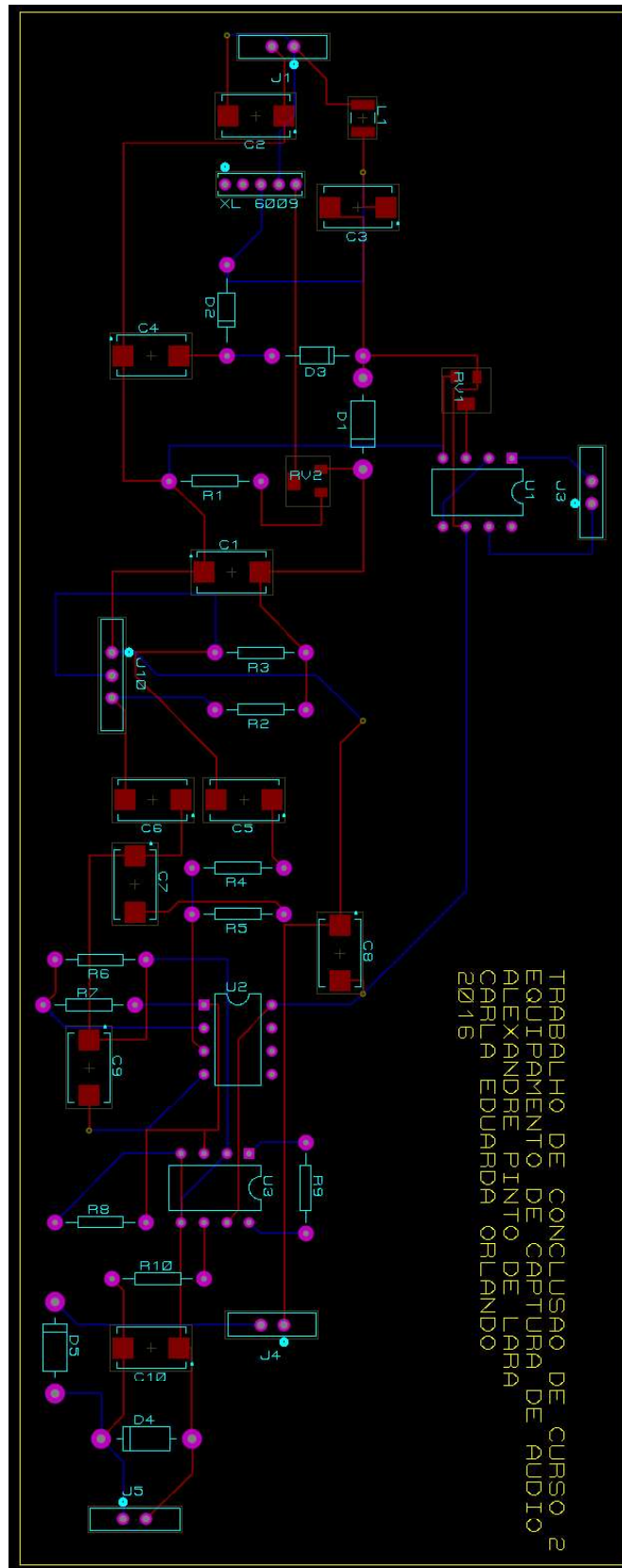


Figura 40: Layout da placa de circuito impresso
 Autoria Própria

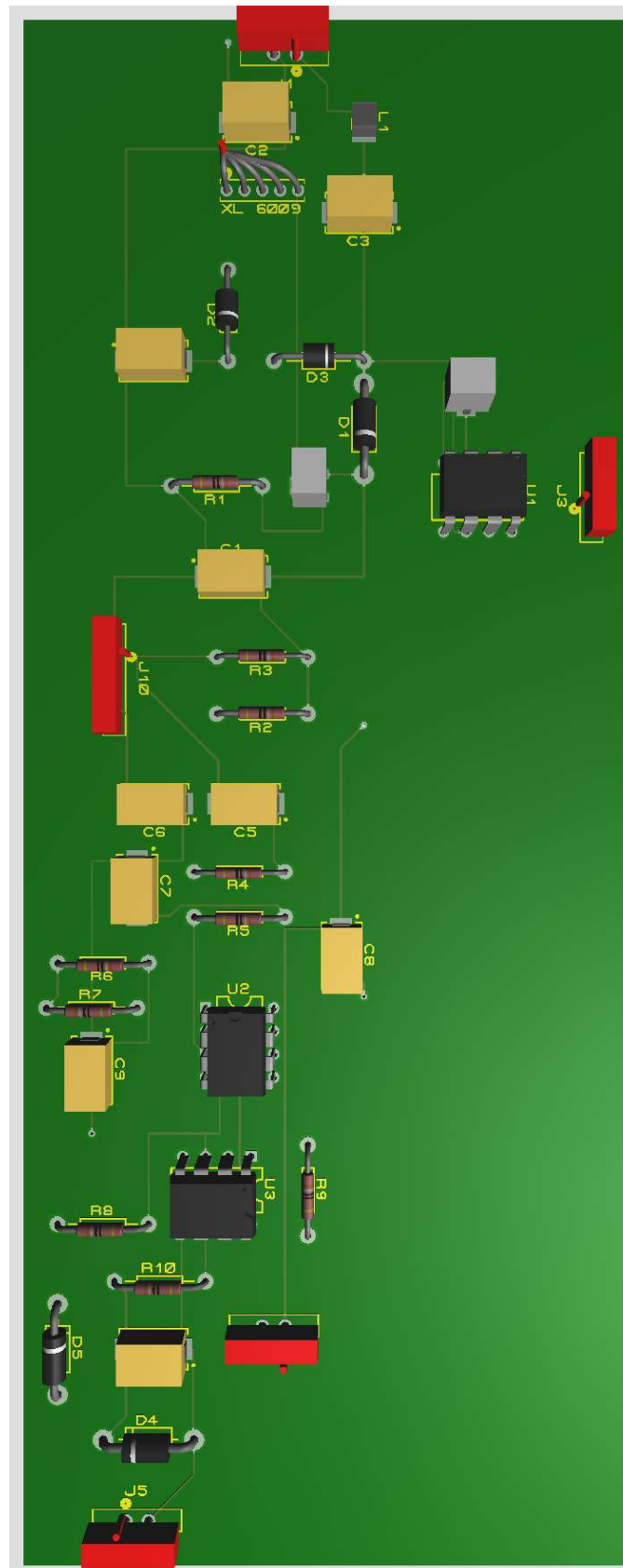


Figura 41: Layout da placa de circuito impresso em 3D (cima)

Autoria Própria

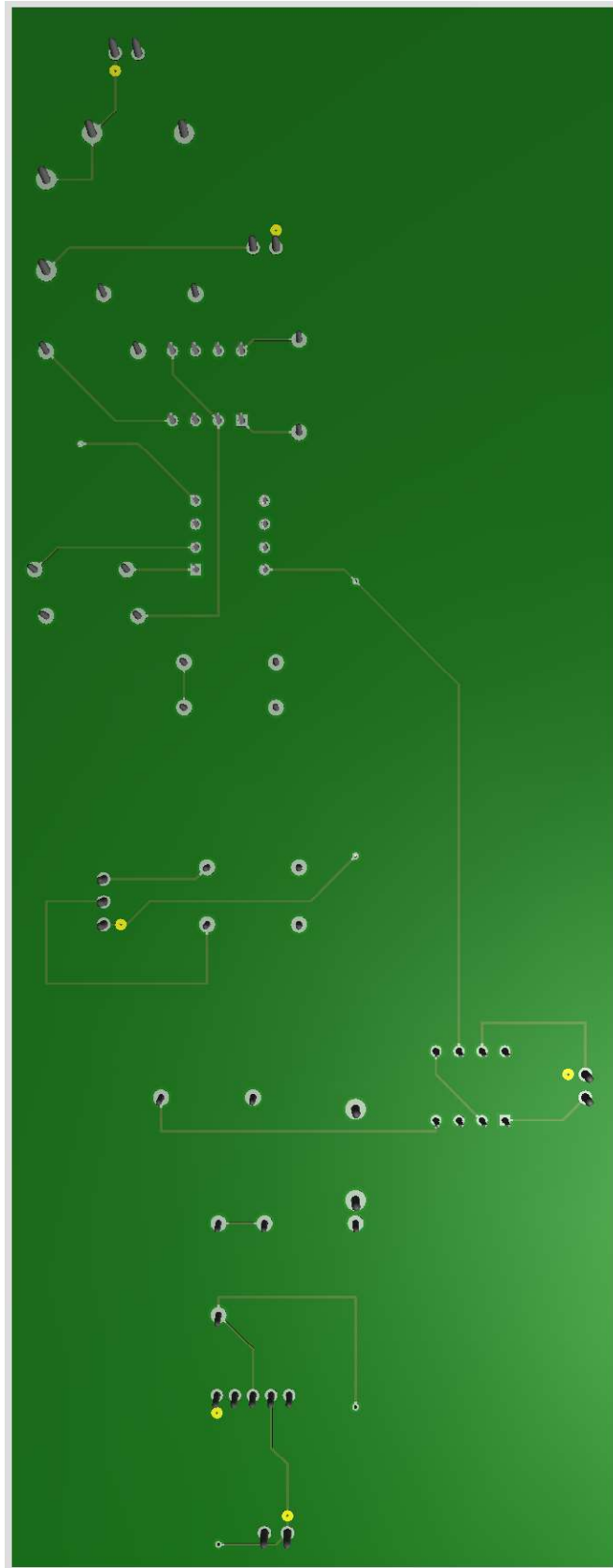


Figura 42: Layout da placa de circuito impresso em 3D (baixo)

Autoria Própria