

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Thaís Betina Slaviero

AFINADOR AUTOMÁTICO PARA CONTRABAIXO  
ACÚSTICO

Passo Fundo

2017

Thaís Betina Slaviero

# AFINADOR AUTOMÁTICO PARA CONTRABAIXO ACÚSTICO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Adriano Luís Toazza.

Passo Fundo

2017

Thaís Betina Slaviero

**Afinador automático para contrabaixo acústico**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Adriano Luís Toazza.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Adriano Luís Toazza - UPF

---

Prof. Dr. Paulo Sérgio Corrêa Molina - UPF

---

Prof. Ms. Edson Santos Acco - UPF

Este trabalho é dedicado aos meus pais Ibanir e Otilia Slaviero, por todo esforço que sempre fizeram para que eu pudesse chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter guiado meu caminho até a Engenharia Elétrica, e por ter me dado força, para superar e enfrentar as dificuldades.

Agradeço a meus pais Ibanir e Otilia Slaviero, por todo apoio, carinho, compreensão, e por estarem sempre dispostos a me ajudar, principalmente nos períodos mais difíceis.

Agradeço a meu amor Gabriel Antonio Pereira, por toda calma, carinho, compreensão, por toda ajuda também no desenvolvimento deste trabalho, e principalmente por ter me tornado pessoa e profissionalmente melhor.

Agradeço a Bartolomeu, por todo o companheirismo e por me mostrar, todo dia, que a felicidade se encontra nas coisas mais simples.

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia Elétrica por todo o conhecimento repassado ao longo desses anos, e em especial ao professor Doutor Adriano Luís Toazza, por ter acreditado em mim, por ter insistido para que eu desenvolvesse um trabalho que me fizesse feliz, e principalmente por toda ajuda e pelos ensinamentos passados a mim durante a realização deste trabalho.

Agradeço a Pedro Paulo Prezzotto, e ao Maestro Mauricio Castelli, por terem criado a Orquestra Sinfônica Getuliense. Ao Maestro, por todo conhecimento passado a mim durante vários anos, por tornar a música uma presença constante em minha vida, e por me incentivar a desenvolver este trabalho.

Agradeço a toda a equipe do CRAS (Centro de Referência e Assistência Social) de Getúlio Vargas - RS e também a Prefeitura Municipal, por terem me emprestado um Contrabaixo acústico. Em especial a Rita de Cassia Pessoa da Silva, por não ter medido esforços para disponibilizar o instrumento a mim pelo tempo que fosse necessário, e também ao Maestro Gleison Juliano Wojciekowski por apoiar o projeto.

Agradeço imensamente a Ivan Lavarda, que abriu mão do seu descanso para me auxiliar a desenvolver, da melhor forma possível, a parte mecânica do projeto.

Agradeço a Anderson Bilibio e a toda a equipe da Silicium Tecnologia, por todo o auxílio no projeto, e principalmente por todos os ensinamentos que sem dúvida nenhuma foram essenciais ao meu crescimento profissional.

Agradeço por fim, a todos os meus familiares, amigos, e colegas, que de uma forma ou de outra, seja por seu conhecimento, ou por alguma palavra de apoio, tornaram essa caminhada um pouco mais fácil e mais feliz.

“Seja lá o que você fizer, seja bom nisso”.

Abraham Lincoln

## RESUMO

O contrabaixo acústico é o instrumento cujo som grave torna sua presença nas orquestras e na música popular imprescindível, tanto para sustentação harmônica das melodias, como na marcação de ritmo. Para que o som produzido por ele seja agradável aos ouvidos, cada uma de suas quatro cordas deve soar em uma frequência específica, e por isso um contrabaixista deve sempre afinar o instrumento antes de iniciar sua performance. Essa tarefa, no entanto, é um pouco complicada, pois a sensibilidade do ouvido humano não é a mesma em todas as frequências, e piora fortemente abaixo de 300 Hz. Com o intuito de facilitar esse processo, este trabalho apresenta um equipamento capaz de automatizar o ajuste da afinação. Desta forma, foi desenvolvido um dispositivo microcontrolado que detecta a frequência das cordas do contrabaixo acústico através de um sensor piezoelétrico conectado em seu cavalete, e faz a comparação desta frequência com o padrão de afinação estabelecido pelo usuário, para, se necessário, ajustar a tração de cada uma das cordas do instrumento automaticamente, movimentando suas tarraxas através de um motor CC acoplado a elas e fixo por uma estrutura mecânica que é posicionada na voluta do contrabaixo. O instrumentista tem então, apenas a tarefa de tocar cada uma das cordas, enquanto acompanha o processo através de uma interface composta por um *display LCD touch screen*, que possibilita também o ajuste do tom de referência padrão de afinação, numa faixa de 435 Hz a 445 Hz.

Palavras-Chave: Contrabaixo Acústico. Afinação. Cordas. Frequência. Padrão de afinação.

## ABSTRACT

The double bass is the instrument whose grave sound makes its presence essential in the orchestras and popular music, both for melodies' harmonic support and rhythm marking. In order to sounds good to the ears, each of its four strings must sound on a specific frequency, so a bass player must always tune the instrument before beginning its presentation. This task, however, is a little complicated, as the sensitivity of the human ear is not the same at all frequencies, and worsens strongly below 300 Hz. In order to facilitate this process, this work shows an equipment that can automate the tuning adjustment. In this way, a microcontrolled device was developed to detect the frequency of the double bass' strings, through a piezoelectric sensor connected to his bridge, and it compare this frequency with the user's tuning pattern, in order to adjust the strings' traction automatically, moving its slots through a DC motor coupled to them and fixed by a mechanical structure that is positioned on the instrument's scroll. The musician just has the task to play each one of the strings, while accompanying the process through an interface composed by an LCD touch screen display, which also allows the adjustment of the standard reference pitch in a range from 435 Hz to 445 Hz.

Keywords: Double Bass. Tuning. Strings. Frequency. Standard tuning.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Contrabaixista utilizando a técnica pizzicato	16
Figura 2 – Partes do contrabaixo acústico	18
Figura 3 – Arco do contrabaixo acústico	19
Figura 4 – Conjunto de cordas Mauro Calixto para contrabaixo acústico	20
Figura 5 – Formas de onda produzidas por alguns instrumentos	21
Figura 6 – Forma de onda produzida pelo Contrabaixo Acústico	21
Figura 7 – Estudo a respeito dos harmônicos do contrabaixo acústico	23
Figura 8 – Curva de mobilidade do contrabaixo acústico	24
Figura 9 – Resultados do teste de ressonância em seis diferentes partes do instrumento	25
Figura 10 – Sentido de rotação das tarraxas para realizar um ajuste agudo da afinação	29
Figura 11 – Cordas do contrabaixo acústico relacionadas com suas respectivas tarraxas	30
Figura 12 – Diapasão	30
Figura 13 – Afinadores Eletrônicos	32
Figura 14 – Afinador em aplicativo de celular	33
Figura 15 – Captador piezoelétrico	34
Figura 16 – Variação da sensibilidade à deformação em função da frequência	35
Figura 17 – Motor CC com caixa de redução	37
Figura 18 – Visão geral do projeto	38
Figura 19 – Diagrama do hardware do projeto	40
Figura 20 – Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Sol é tocada	41
Figura 21 – Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Ré é tocada	41
Figura 22 – Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Lá é tocada	42
Figura 23 – Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Mi é tocada	42
Figura 24 – Diagrama específico do bloco condicionador do sinal	43
Figura 25 – Circuito de pré amplificação do bloco condicionador do sinal	43
Figura 26 – Forma de onda de saída do pré amplificador quando a corda Sol é tocada	45
Figura 27 – Circuito de filtro com base no CI LTC1062	46
Figura 28 – Multiplexador analógico 74HC4052 chaveando diferentes resistores	48
Figura 29 – Forma de onda do sinal de saída do CI LTC1062	50
Figura 30 – Comparador com histerese	51
Figura 31 – Forma de onda de saída do comparador com histerese do projeto	53

Figura 32 – Tiva™ EK-TM4C123GXL LaunchPad	53
Figura 33 – Kentec Display	54
Figura 34 – Circuito de acionamento da campainha	55
Figura 35 – Ponte H completa de dois canais, cuja base é o CI L298N.	56
Figura 36 – Bateria utilizada para alimentar o sistema	57
Figura 37 – MC34163 na configuração de inversor de tensão	58
Figura 38 – Módulo de um conversor CC-CC elevador de tensão	59
Figura 39 – Circuito utilizado para energizar o sistema de maneira adequada	60
Figura 40 – Face superior da placa do projeto e módulo do CI 74LS14	61
Figura 41 – Fluxograma de firmware do projeto	63
Figura 42 – Estrutura mecânica utilizada no projeto	64
Figura 43 – Sensor piezoelétrico inserido no cavalete do contrabaixo acústico	65
Figura 44 – Estrutura mecânica posicionada nas quatro taraxas do instrumento	66
Figura 45 – Tela inicial do dispositivo	67
Figura 46 – Tela do ajuste do padrão de afinação do dispositivo	68
Figura 47 – Tela do processo de afinação do dispositivo	69
Figura 48 – Resposta em frequência para o filtro da corda Mi	70
Figura 49 – Resposta em frequência para o filtro da corda Lá	70
Figura 50 – Resposta em frequência para o filtro da corda Ré	71
Figura 51 – Resposta em frequência para o filtro da corda Sol	71

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Razões matemáticas entre cada intervalo musical

27

## LISTA DE SIGLAS

CC – Corrente Contínua

EEPROM – *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*

I/O – *Input/Output*

ISO – *International Standard Organization*

I2C – *Inter-Integrated Circuit*

LCD – *Liquid Crystal Display*

LED – *Light-Emitting Diode*

PWM – *Pulse Width Modulation*

PZT – Titanite de Zircônio

RAM – *Random Access Memory*

SPI – *Serial Peripheral Interface*

TFT – *Thin-Film Transistor*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA .....	15
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1 O CONTRABAIXO ACÚSTICO .....	16
2.1.1 Construção de um contrabaixo .....	17
2.1.2 Acústica .....	19
2.2 AFINAÇÃO .....	25
2.2.1 Método de afinação do contrabaixo acústico .....	28
2.2.2 Dispositivos que auxiliam a afinação .....	30
2.3 CAPTADOR DE SINAL .....	33
2.3.1 Sensor Piezoelétrico .....	34
2.4 ATUADOR.....	35
2.4.1 Motor CC .....	35
<b>3 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO .....</b>	<b>38</b>
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....</b>	<b>40</b>
4.1 HARDWARE .....	40
4.1.1 Sensor Piezoelétrico.....	40
4.1.2 Condicionador do Sinal.....	43
4.1.3 Microcontrolador.....	53
4.1.4 Interface com o usuário.....	54
4.1.5 Acionamento do motor .....	55
4.1.6 Motor CC .....	56
4.1.7 Fonte de alimentação.....	57
4.2 FIRMWARE.....	62

4.3 ACOPLAMENTO MECÂNICO.....	64
4.4 FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO .....	65
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A - HARDWARE COMPLETO .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE B - PROTÓTIPO CONSTRUÍDO .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A música é uma forma de arte, um jeito de se expressar, traz a calma, a alegria, a emoção, e assim de alguma maneira, mais ou menos intensa, está presente na vida de todas as pessoas. Existem aqueles que dentre outros gêneros apreciam a música clássica ou erudita, um dos principais repertórios das orquestras. Uma orquestra é um conjunto de músicos que interpretam obras musicais com diversos instrumentos que se dividem em quatro grupos: as cordas (violinos, violas, violoncelos, contrabaixos, arpas e pianos), as madeiras (flautas, flautins, oboés, entre outros), os metais (trombones, trompetes, trompas e tubas) e os instrumentos de percussão (tímpanos, pratos, entre outros).

O contrabaixo acústico, portanto, pertence ao grupo ou família das cordas, e é o seu maior e mais grave instrumento. Segundo Slatford (1980), pesquisas sobre a evolução do contrabaixo revelam centenas de anos de mudanças em seu *design*, dimensão, em suas cordas e ainda na forma de tocá-lo. Desde o seu surgimento no século XII, como *violone*, até a forma atual, totalmente difundida nas orquestras, seu aspecto foi se adaptando as mudanças de que a música necessitava: o aumento do número das partes de harmonia e o reforço das melodias mais graves dos arranjos.

No final do século XIX, com o avanço da música popular, o contrabaixo acústico passou a habitar também os palcos das bandas de jazz, blues, folk, entre outros, executando notas com o intuito de sustentar o pulso necessário a condução das músicas em conjunto com a percussão. Apesar do nascimento do contrabaixo elétrico em 1950, instrumento de menor custo e maior praticidade, a utilização do contrabaixo acústico permanece intransferível para muitos estilos musicais, e ainda preferível para outros, que não dispensam seu timbre e sua grande sonoridade.

O fato de pertencer a família das cordas remete ao modo como a onda sonora é gerada no contrabaixo acústico. De acordo com Hoffer (2009), instrumentos deste gênero produzem sons através da vibração de suas cordas, sejam elas friccionadas por arco, ou ainda beliscadas com os dedos (*pizzicato*). A onda sonora gerada possui, além de alguns harmônicos que definem o timbre do instrumento, uma frequência fundamental que é convencionalmente determinada por suas características para que o som produzido seja agradável e harmonioso aos ouvidos. Para atingir esse objetivo, no entanto, é necessário manter o instrumento afinado.

Um contrabaixo afinado é aquele em que cada uma de suas quatro cordas estejam corretamente tracionadas por tarraxas de forma que as notas, da mais grave à mais aguda, soem, por padrão, em Mi (41,2 Hz), Lá (55 Hz), Ré (73,4 Hz) e Sol (98 Hz), ou ainda com

uma pequena variação para cima ou para baixo de acordo com as preferências do musicista. Existem várias formas de afinar um contrabaixo, e os métodos que mais se destacam atualmente são o “de ouvido”, com o uso de um dispositivo eletrônico ou ainda através de aplicativos de *smartphone*, sem qualquer acionamento automático. Esses sistemas se mostram funcionais, porém, o musicista costuma enfrentar problemas em relação a logística do instrumento e principalmente devido a baixa frequência das cordas.

Apesar da resposta em frequência do ouvido humano ser notável, atingindo uma faixa de 20 Hz a 20 kHz para pessoas mais jovens, a sensibilidade deste não é a mesma para todas as frequências e depende inteiramente do nível de pressão aplicado para que se tenha a mesma sensação do volume de som. A níveis mais altos a resposta é mais plana, constante com a frequência, já para níveis mais baixos, “o ouvido é mais sensível às frequências entre 3 kHz e 5 kHz, piorando fortemente em direção aos graves e piorando um pouco em direção aos agudos.” (VALLE, 2009, p. 47).

Isso acontece porque os ossículos do ouvido médio, martelo, bigorna, e estribo, funcionam como uma espécie de acoplamento entre o ouvido externo que capta as ondas sonoras e ouvido interno que manda o sinal para o cérebro, no que se chama de transmissão ossicular. Porém, abaixo de 300 Hz, as ondas são atenuadas por esse acoplamento e chegam ao ouvido interno através do ar, de forma que apenas o encéfalo é responsável por distingui-las. (SPADA, s.d.). Desta forma, é difícil para um instrumentista poder identificar a frequência de cada corda de um contrabaixo acústico sem o auxílio de um afinador, fato agravado pela proximidade em que as notas fundamentais das cordas se encontram, cerca de 15 a 30 Hz.

Além disso, o efeito da dilatação térmica, onde “as dimensões de um corpo aumentam quando sua temperatura aumenta [...] e diminuem quando reduzimos sua temperatura [...]”, (BISCUOLA e MAIALI, 1996, p. 288), é bastante presente nos instrumentos musicais de uma forma geral, ainda mais naqueles que são construídos com uso de vários materiais de coeficientes de dilatação térmica diferentes, como a madeira e o metal, no caso do contrabaixo acústico. Para que esse efeito não prejudique o trabalho de um musicista, é necessário que a afinação seja conferida várias vezes durante uma apresentação ou concerto. O tamanho do instrumento, no entanto, torna um pouco mais difícil essa tarefa para um contrabaixista.



## 1.1 OBJETIVOS

O presente projeto visa desenvolver um afinador portátil para contrabaixo acústico que permita o ajuste das tarraxas que tracionam suas cordas de maneira automática, enquanto o instrumentista apenas toque cada uma delas. O sistema será microcontrolado, contará com uma interface dada por um *display LCD touch screen*, e deverá capturar a vibração de cada uma das cordas, comparar o sinal obtido com o tom de referência estabelecido pelo usuário, e dependendo da conclusão obtida, ou seja, se identificar que a frequência fundamental da corda está mais alta ou mais baixa, ele atuará através de um motor CC com caixa de redução nas tarraxas do instrumento, girando-as no sentido horário ou anti-horário, uma a uma, para corrigir a afinação. O sistema contará ainda com uma estrutura mecânica que fará o acoplamento entre o motor e o instrumento, permitindo que o usuário faça o ajuste da localização do motor de maneira simples, antes de realizar a afinação de cada corda.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando a importância que a música de qualidade tem na vida das pessoas em geral, assim como na dos musicistas amadores e profissionais que desejam um bom desempenho do seu instrumento, o desenvolvimento de um afinador automático contribuirá a contrabaixistas de diversos níveis de estudo. Dentre eles, pode-se citar os que atuam profissionalmente em orquestras, bandas, e grupos e precisam garantir ao seu público um som apreciável, e também os iniciantes e professores de grandes grupos, já que o processo de afinação costuma tomar um tempo considerável, que pode ser utilizado no estudo do instrumento. Além disso, o projeto pode servir de base para criação de dispositivos semelhantes para os demais instrumentos da família das cordas, tais como violinos, violas e violoncelos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentados os conhecimentos fundamentais para o entendimento e desenvolvimento deste trabalho, tais como aspectos construtivos do contrabaixo acústico, conceitos de afinação e ainda informações sobre os dispositivos sensores e atuadores utilizados no projeto.

### 2.1 O CONTRABAIXO ACÚSTICO

Segundo Almeida (2015, p. 10), o contrabaixo acústico “é o maior e mais grave instrumento da família das cordas. Seu som é produzido pela vibração da corda ao ser friccionada com um arco, ainda que, também, possa ser tocado com a ponta dos dedos com a técnica do ‘pizzicato’.”. Devido a seu grande tamanho, que pode chegar a uma altura de até 1,8 metros, o contrabaixista pode sentar-se em um banco elevado ou se posicionar de pé ao lado do instrumento para tocá-lo, como mostra a figura 1.

Figura 1 - Contrabaixista utilizando a técnica pizzicato



Fonte: <http://www.maxanter.com/marius-beets.html>

O som dos instrumentos que possuem amplificação acústica é “influenciado por várias variáveis como, a madeira do instrumento, as cordas, a pressão e o ponto de contato do arco além da reverberação do ambiente, entre outros.” (CUNHA, 2006, p. 20). Por isso, nas seções subsequentes, serão apresentados de forma detalhada, os aspectos relevantes à sonoridade do contrabaixo: sua construção e acústica.

### **2.1.1 Construção de um contrabaixo**

A fabricação de um contrabaixo acústico é bastante delicada. A madeira, principal componente do instrumento, deve passar por um processo de preparo para possuir espessura, comprimento, curvatura correta, além de outros fatores, para que dois objetivos sejam atingidos: o contrabaixo precisa ter sustentação mecânica para que as cordas possam ser tracionadas; e principalmente precisa ser capaz de amplificar as ondas sonoras geradas por elas. Um instrumento de qualidade é aquele em que seu corpo de madeira amplifica o som produzido pelas cordas de tal maneira que toda a sua extensão de frequência soe na mesma intensidade.

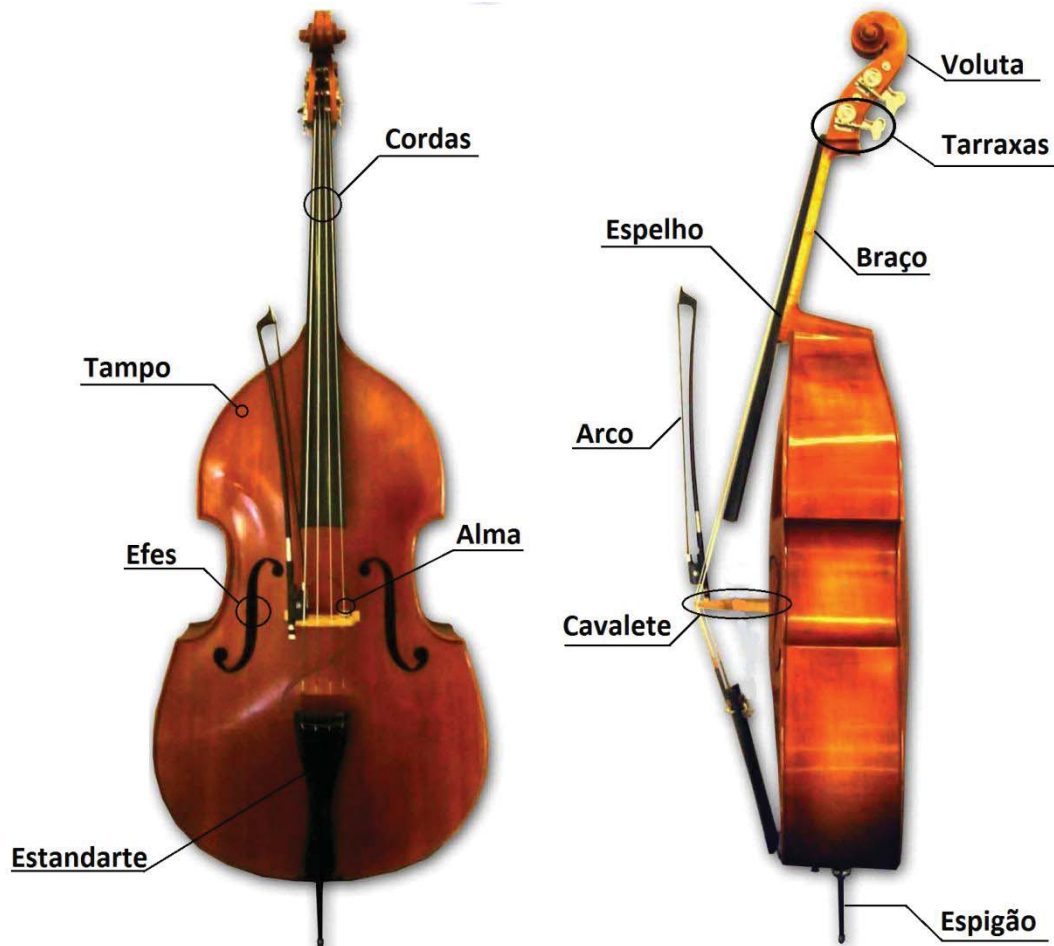
Assim, cada uma de suas partes desempenha uma função específica para que o musicista desenvolva seus solos ou acompanhamentos e desfrute da resposta sonora desejada. A figura 2 mostra detalhadamente as partes do contrabaixo acústico que são descritas a seguir.

As cordas, são as responsáveis pela geração das vibrações sonoras. Fixadas no instrumento pelo estandarte, da mais grave a mais aguda se chamam Mi (41,2 Hz), Lá (55 Hz), Ré (73,4 Hz) e Sol (98 Hz). Alguns modelos possuem cinco cordas, com o acréscimo de uma mais grave Si (30,9 Hz), ou então de uma mais aguda Dó (130,8 Hz). Existem cordas de vários materiais, podendo ser inteiramente metálicas, com núcleo sintético, com núcleo de tripa ou ainda de tripa pura. Atualmente, são utilizados principalmente os dois primeiros modelos.

O elemento que dá sustentação à elas no instrumento se chama cavalete, e “faz o trabalho de levar as vibrações das cordas até a superfície de madeira do instrumento” (CUNHA, 2006, p. 21), além de atuar como filtro acústico suprimindo certas frequências indesejáveis. Da superfície, denominada tampo superior, as vibrações são conduzidas pela alma até o tampo inferior do contrabaixo, para que possam ser amplificadas. A alma é uma estrutura interna de madeira, tal como um pequeno cilindro, que é posicionada abaixo do cavalete sob a corda mais tracionada (neste caso a corda Sol) e curiosamente se mantém ali apenas pela pressão da tração das cordas. Se por algum motivo todas as cordas forem soltas, a alma certamente irá cair.

As ondas sonoras percorrem então a caixa acústica, são amplificadas e saem pelos efes, que além de promoverem a comunicação do ar interno com o ar externo, fazem com que a pequena região de madeira entre eles tenha maior mobilidade (CUNHA, 2006), e ajude o cavalete a vibrar.

Figura 2 - Partes do contrabaixo acústico



Fonte: Adaptado de Alves (2009, p. 1)

Não menos importante, o espigão é um cilindro de metal ajustável que apoia e regula a altura do instrumento de acordo com as preferências do musicista. Já o espelho e o braço são os locais de apoio dos dedos que permitem ao instrumentista apertar a corda firmemente para produzir notas mais agudas (HOFFER, 2009). Há ainda a voluta, que abriga a estrutura mecânica que traciona as cordas, as chamadas tarraxas, e essas são as responsáveis pela afinação do contrabaixo.

Já na figura 3, é possível distinguir as partes de um arco para contrabaixo acústico, que pesa geralmente entre 130g e 140g (ALMEIDA, 2015). A vara é feita de madeira e deve

ser maleável, para permitir que se tenha a tensão e a curvatura correta para tocar. Acoplada a ela está a crina, que tem esse nome pois “nada mais é que uma porção de crina de cavalo disposta ao longo da madeira.” (CUNHA, 2006, p. 22). Na verdade, atualmente nos arcos de menor qualidade, a crina é feita de um material sintético como o nylon, e a sua tensão é regulada através do parafuso próximo ao talão. Ainda assim, nenhum som será obtido se o instrumentista não aplicar uma resina chamada de breu na crina do arco, que faz com que este “agarre” a corda melhor (HOFFER, 2009). A almofada serve apenas de apoio para os dedos do instrumentista.

Figura 3 - Arco do contrabaixo acústico



Fonte: <https://voilamarques.wordpress.com/category/orientacoes-contrabaixisticas-acustico/page/9/>

O arco do contrabaixo acústico é um dos responsáveis por promover a vibração das cordas e caso não se tenha o ângulo correto entre o cavalete e o arco e ainda da crina para com a corda, ou caso fatores como tensão descarregada na corda e velocidade dos movimentos estejam incorretos, o som pode ficar comprometido.

### 2.1.2 Acústica

De acordo com Oliveira (2004, p. 1), “o som é medido fisicamente por três grandezas; a intensidade, a frequência e o timbre.”. A seção anterior relatou brevemente que cada uma das cordas do instrumento vibra em uma frequência diferente.

A frequência de ressonância de uma corda é aquela gerada por um movimento simples e de pequena amplitude em uma corda tensionada e fixa em duas extremidades. Ela depende de quatro fatores principais: o comprimento, o diâmetro, a tração em que a corda está submetida e o seu material. (CATELLI e MUSSATO, 2014). Desta forma, cordas de maior diâmetro, mais compridas e menos tracionadas geram frequências mais graves, e do contrário, as frequências serão mais agudas.

Nos instrumentos musicais, um dos fatores responsáveis pela frequência de ressonância de cada corda é fixo. No caso do contrabaixo, esse fator é o comprimento que é o mesmo em

suas quatro cordas, mas o diâmetro e a tração de cada uma delas sofrem variação. O diâmetro é responsável por limitar as cordas a uma certa faixa de frequência de trabalho, enquanto a tração realizará apenas o ajuste fino da frequência fundamental desejada, através das tarraxas que estão presentes na extremidade superior do instrumento. Tudo funciona em equilíbrio, e caso o diâmetro esteja errado, será necessário muito menos ou muito mais tração nas cordas para que a frequência desejada seja atingida, se é que isso poderá acontecer sem que a corda ou o instrumento seja prejudicado. É por isso que os conjuntos de cordas vendidos no mercado possuem certos tipos de referência, geralmente cores, que auxiliam a diferenciar claramente uma corda da outra. A figura 4, mostra um encordoamento onde se percebe a diferença nos diâmetros das cordas e ainda uma legenda de cores que auxilia o instrumentista a identificá-las.

Figura 4 - Conjunto de cordas Mauro Calixto para contrabaixo acústico



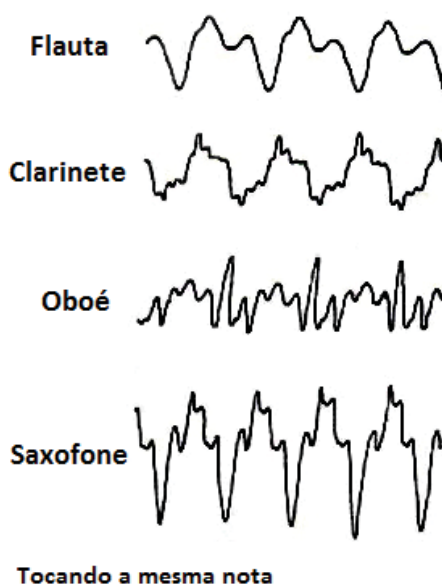
Fonte: <https://hpgmusical.com/encordoamento-mauro-calixto-contrabaixo-acustico.html>

Assim, as cordas corretas estando presentes em seus lugares e feito o ajuste fino até a frequência fundamental de cada uma delas, cabe ao instrumentista obter notas mais agudas posicionando os dedos sobre o espelho do contrabaixo, pois ao apertar a corda, restará um menor comprimento em que ela pode vibrar. Desta maneira, a maior nota que pode ser alcançada no contrabaixo acústico é tipicamente o Sol, 392 Hz (ZEVIN, 2012).



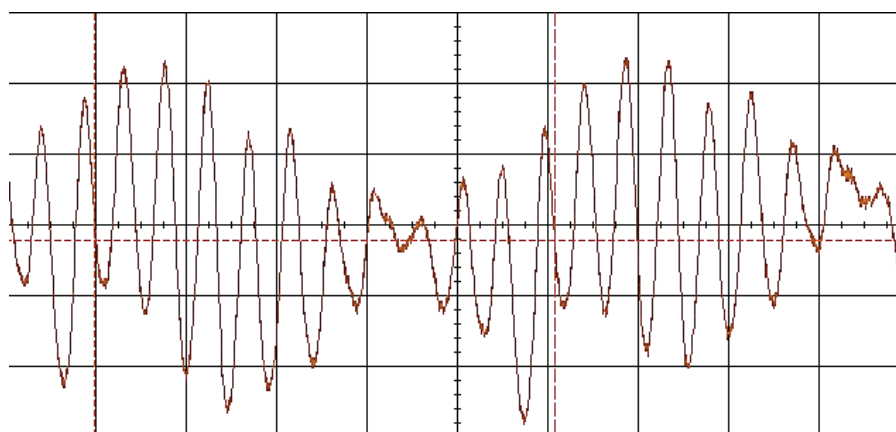
Outra grandeza que define o som é o timbre, termo que o dicionário denomina como “qualidade que distingue dois sons de mesma altura e de mesma intensidade”. Sabe-se que cada nota musical ou frequência é representada como uma onda senoidal pura, mas Lazzarini (1998, p. 23), declara que “este tipo de onda é obtido apenas de forma eletrônica. Já os sons da natureza são de uma natureza mais complexa”. Observando as ondas sonoras produzidas por vários instrumentos no domínio do tempo, como na figura 5, e também pelo próprio contrabaixo acústico, como mostra a figura 6, é possível perceber que elas têm um comportamento muito diferente da forma senoidal, e apesar de emitirem a mesma frequência são diferentes entre si.

Figura 5 - Formas de onda produzidas por alguns instrumentos



Fonte: <http://dadler.co/engineering-beauty/can-kanye-fft/>

Figura 6 - Forma de onda produzida pelo Contrabaixo Acústico



Fonte: Próprio Autor

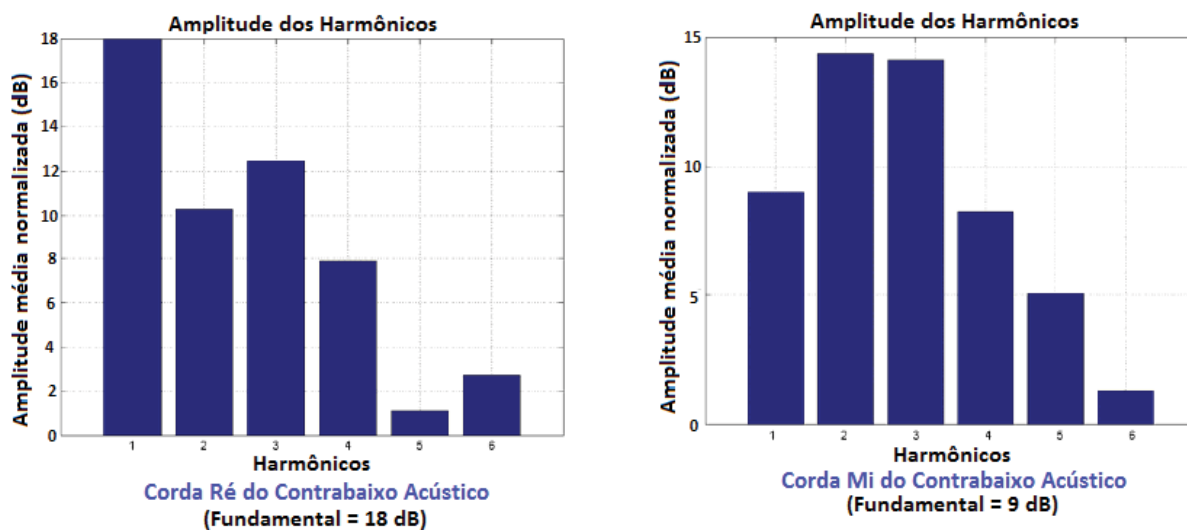
Portanto, o timbre de um instrumento é definido pelo fator que causou as mudanças nas formas de onda vistas acima: a presença de uma variedade de componentes harmônicos somados aos sinais. Harmônicos são componentes senoidais de frequência múltiplos inteiros da frequência fundamental do sinal, que possuem amplitudes diferentes e menores que esta (HEWITT, 2015). Assim, o primeiro harmônico de vibração é a nota fundamental, o segundo possuirá frequência igual ao dobro da fundamental, o terceiro então, terá o triplo desta frequência e assim por diante, até que sua amplitude seja tão pequena que não cause mudanças significativas no sinal.

A série de Fourier é a forma matemática de determinar os harmônicos e prova que qualquer onda periódica como as representadas na figura 5, pode ser decomposta em um conjunto único de componentes senoidais, compostos por parâmetros de frequência, amplitude, e fase relativa a fundamental. Embora as relações de fase tenham um efeito menor na percepção do timbre, os dois primeiros parâmetros são de grande importância em sua definição (LAZZARINI, 2015). Além disso a transformada de Fourier torna possível a representação gráfica de um sinal no domínio da frequência, tornando possível determinar com mais clareza a influência dos componentes harmônicos em qualquer instrumento.

O estudo de Zevin (2012), apresentado na figura 7, analisou o conteúdo harmônico de um contrabaixo acústico. Sete notas foram gravadas, tocadas com o uso do arco e também com o uso de *pizzicato*, dentre as quais se situavam as notas emitidas das cordas do instrumento Mi, La, Ré e Sol, ou seja, aquelas geradas sem qualquer dedilhado do musicista. As gravações foram então processadas utilizando o programa MATLAB®, e gráficos de amplitude normalizada versus harmônicos oriundos das cordas Mi (41,2 Hz) e Ré (73,4 Hz) foram apresentados. Devido às limitações dos equipamentos de gravação em baixa frequência, o harmônico fundamental da menor frequência obtida no contrabaixo (41,2 Hz), teve sua amplitude menor que os demais, mas geralmente o primeiro harmônico tem a maior amplitude e os demais harmônicos decaem em amplitude (ZEVIN, 2012).



Figura 7 - Estudo a respeito dos harmônicos do contrabaixo acústico

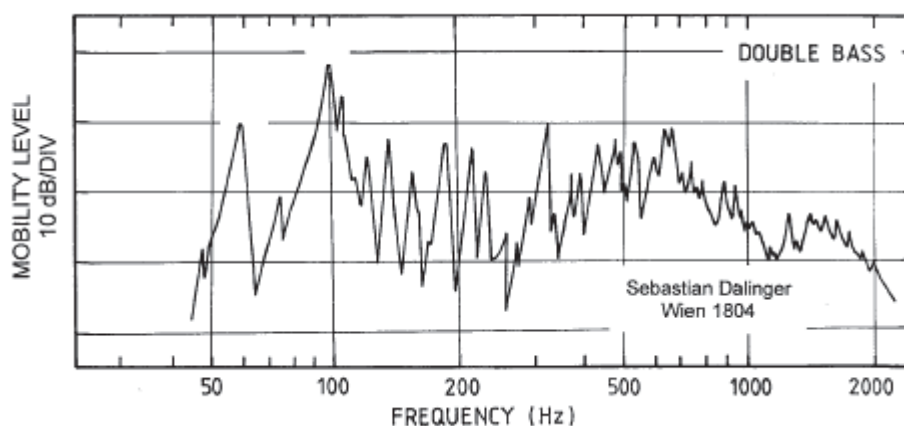


Fonte: Adaptado de Zevin (2012, p. 3)

Por fim, a última grandeza a definir o som é a sua intensidade. No contrabaixo acústico, “a vibração da corda não é suficiente para produzir um som forte (com mais volume)” (DUPONT et al., 2014, p. 7) e portanto, é necessária a amplificação das ondas sonoras. O próprio nome do instrumento sugere a resolução da questão. A amplificação é realizada pelo seu corpo, na chamada caixa acústica.

O modo como isso acontece remete a um conceito muito importante em diversas áreas do conhecimento: a ressonância. Se o corpo do instrumento é capaz de vibrar com a mesma frequência gerada pelas cordas, diz-se que ocorre a ressonância acústica (DUPONT et al., 2014) e portanto a amplificação. O fato é que dificilmente haverá a mesma intensidade de som em toda a extensão de frequências do instrumento, sendo comum a existência de picos de ressonância, sempre mais presentes nos instrumentos de melhor qualidade. A figura 8, mostra a curva de mobilidade de um contrabaixo acústico feito por Sebastian Dalinger, na cidade de Viena em 1804. Os picos do sinal se situam nas frequências onde ocorre a ressonância no instrumento (ROSSING, 2010).

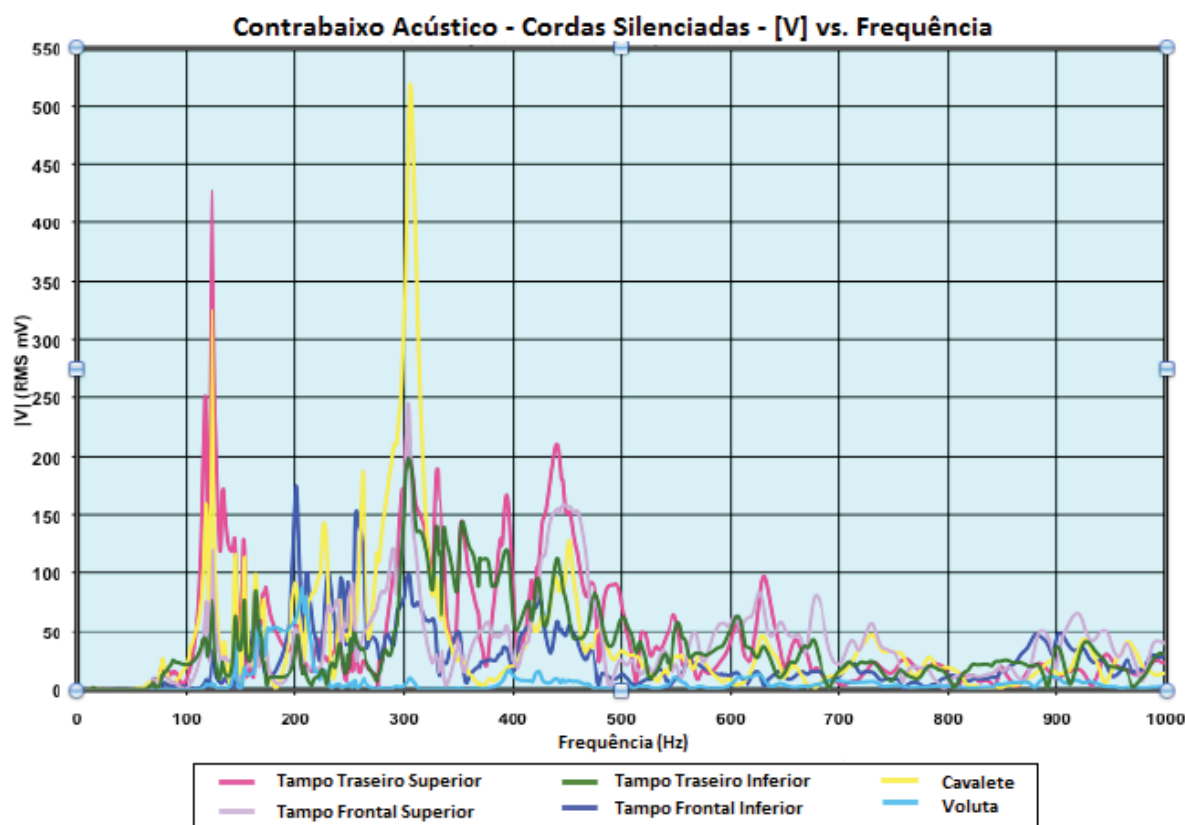
Figura 8 - Curva de mobilidade do contrabaixo acústico



Fonte: Adaptado de Rossing (2010, p. 263)

Nesse sentido, Zevin (2012), realizou outro estudo bastante considerável. Ele montou um mapa de ressonâncias considerando várias partes do instrumento, como a voluta, o cavalete, e as partes inferior e superior do tampo frontal e do tampo traseiro. Para testar apenas a ressonância do corpo do contrabaixo, este necessitou ser suspenso através de seu braço e espigão e suas cordas foram silenciadas. Por fim, eletrodos foram inseridos nas partes do instrumento já descritas e um sinal de 1 V de amplitude e de frequência variando entre 10 Hz e 1000 Hz, a passos de 1 Hz foi enviado a eles. Frequências mais altas não foram necessárias porque a maioria dos harmônicos gerados pelo instrumento ficam abaixo de 500 Hz (ZEVIN, 2012). A resposta obtida pode ser vista na figura 9.

Figura 9 - Resultados do teste de ressonância em seis diferentes partes do instrumento



Fonte: Adaptado de Zevin (2012, p. 7)

Através do gráfico é possível perceber que a máxima ressonância ocorre no cavalete em 300 Hz, com pico de 525 mV RMS. Por volta de 125 Hz o cavalete e o tampo superior traseiro também mostram um forte pico de ressonância em 425 mV RMS. Outro resultado relevante é a pequena ressonância na voluta, provavelmente devido a sua rigidez e por sua construção ornamentada. (ZEVIN, 2012).

## 2.2 AFINAÇÃO

A afinação costuma ser definida de diversas maneiras, dependendo inclusive do contexto cultural a que está inserida (SOBREIRA, 2002). O dicionário a descreve como o “estado de perfeito acordo entre todas as notas de um instrumento, de uma orquestra, de um grupo vocal, de um conjunto musical ou da voz humana” ou ainda é o “ajuste de um instrumento ao tom de outro ou de uma voz”. Já Ulloa (2008, p. 55), prefere interpretar o ato de afinar como “ajustar Sons em um determinado número de oscilações.”.

O número de oscilações por segundo, ou seja, a frequência das notas deve ser mesmo perfeita, pois qualquer desvio, por menor que seja, pode não soar bem aos ouvidos. É por esse motivo que diversas culturas desenvolveram seu próprio conceito ou padrão de afinação, muito relacionado com a matemática, tudo porque:

Para elaborar uma melodia, não basta tomar arbitrariamente notas de altura (frequência), intensidade e valor diferentes, e agrupá-las: o resultado dificilmente seria música de qualidade. A razão disto é que as notas devem, além de formar um ritmo, ter entre suas frequências certas proporções numéricas, obedecendo a uma sequência denominada *escala musical*. (VALLE, 2009, p. 25).

A escala, portanto, “se caracteriza por relações numéricas simples entre as frequências e suas notas.” (VALLE, 2009, p. 25). Existem diversos tipos de escalas, e a razão de frequência entre cada uma de suas notas se denomina intervalo. O semitom é o menor intervalo usado na música ocidental, seguido pelo tom, que equivale a dois semitons. Intervalos maiores são obtidos somando-se mais semitons, dando origem a 2ª e 3ª maior e menor, a quarta e quinta justa, a 6ª e 7ª maior e menor, ao trítone e a oitava, além de vários outros mais complexos. A quarta justa, por exemplo é a soma de cinco semitons, a quinta justa é a soma de sete, enquanto a oitava, é formada por todos os doze semitons existentes.

As razões matemáticas que definem cada intervalo podem ser estabelecidas pelos sistemas de afinação descritos na tabela 1. É possível observar que elas diferem consideravelmente umas das outras e isso acontece por que “o menor intervalo (relação de frequência) perceptível pelo ouvido humano normal é de cerca de 1/9 de tom, e é chamado de 1 coma” (VALLE, 2009, p.31). Assim, sendo o tom composto por 9 comas (um valor ímpar), é impossível obter um semitom exato, ou ele tem 4, ou tem 5 comas, o que causa um erro em todos as formas de afinação. Como os sistemas pitagórico, justo e mesotônico, mostrados nas três colunas da direita possuem semitons com 4 comas e outros com 5, a afinação proposta por eles é chamada de não temperada (de semitons diferentes). Já a primeira coluna, mostra o sistema temperado, utilizado atualmente porque busca resolver a ambiguidade dos sistemas anteriores dividindo a oitava em doze intervalos iguais.

Tabela 1 - Razões matemáticas entre cada intervalo musical

Intervalo	Nº de Semitons	Temperado		Pitagórico		Justo		Mesotônico	
		Razão	Centos	Razão	Centos	Razão	Centos	Razão	Centos
Uníssonos	0	1:1	0	1: 1	0	1: 1	0	1: 1	0
2ª menor	1	1: 1.059	100	1: 1.053	90	1: 1.067	112	1: 1.070	117
2ª maior	2	1: 1.122	200	1: 1.125	204	1: 1.125	204	1: 1.118	193
3ª menor	3	1: 1.189	300	1: 1.185	294	1: 1.200	316	1: 1.196	310
3ª maior	4	1: 1.260	400	1: 1.265	408	1: 1.250	386	1: 1.250	386
4ª justa	5	1: 1.335	500	1: 1.333	498	1: 1.333	498	1: 1.337	503
Trítono	6	1: 1.414	600						
5ª justa	7	1: 1.498	700	1: 1.500	702	1: 1.500	702	1: 1.496	697
6ª menor	8	1: 1.587	800	1: 1.580	792	1: 1.600	814	1: 1.600	814
6ª maior	9	1: 1.682	900	1: 1.687	906	1: 1.667	884	1: 1.672	890
7ª menor	10	1: 1.792	1000	1: 1.778	996	1: 1.800	1018	1: 1.789	1007
7ª maior	11	1: 1.888	1100	1: 1.898	1109	1: 1.875	1088	1: 1.869	1083
Oitava	12	1: 2	1200	1: 2	1200	1: 2	1200	1: 2	1200

Fonte: Adaptado de Lazzarini (1998, p. 46)

Assim, a razão  $R$  entre os intervalos proposta pelo sistema temperado, pode ser calculada através da equação (1), quando  $m$  é o número de semitons. Por isso, um semitom é equivalente a  $1: 2^{1/12}$ . Já a equação (2) demonstra como encontrar essa mesma razão em função do cento, outra grandeza apresentada na tabela 1, sendo este descrito pela letra  $c$ . O cento é uma unidade utilizada para determinar intervalos bem pequenos de afinação, mais precisamente  $1: 2^{1/1200}$ , tanto que um semitom possui sempre 100 centos, e uma oitava 1200 (LAZZARINI, 1998). Essa definição também foi um importante ajuste do sistema temperado, pois como mostra também a tabela 1, nos demais métodos não se tinha um valor fixo dessa unidade.

$$R = 2^{m/12} \quad (1)$$

$$R = 2^{c/1200} \quad (2)$$

Conhecendo-se o sistema temperado de afinação, torna-se possível obter qualquer nota a partir de um tom de referência. Houve um longo período onde este não era padronizado e mudava de lugar para lugar ou ainda com o passar do tempo, dificultando a vida dos músicos. Por isso, no século XX, o Lá em 440 Hz foi definido como tom de referência padrão para

música de concerto no mundo ocidental, fato reafirmado pela Organização Internacional de Normalização (ISO). (CAVANAGH, s.d.).

O fato é que, atualmente, muitos grupos musicais desejam obter um som mais brilhante ou mais agudo, e em outros casos, desejam soar de forma mais escura ou grave relembrando a música antiga. Por isso, é comum serem encontradas afinações com Lá em 442 Hz, 446 Hz, ou ainda 435 Hz. Aí se vê novamente a importância do centos, já que essas variações de frequência são muito menores que um semitom. Por isso, quando a afinação padrão é alterada, a forma de obter a nova frequência da corda de um instrumento é demonstrada pelas equações (3) e (4). (ARAKAWA, s. d.)

$$c = \frac{1200}{\log_{10} 2} \log_{10} \frac{A}{B} \quad (3)$$

$$f_{\text{corda}} = R \cdot f_{\text{padrão}} \quad (4)$$

A equação 3 mostra como calcular a variação do número de centos  $c$  de cada nota musical quando a frequência padrão  $B$ , que é sempre 440 Hz for alterada para  $A$ , a frequência do Lá que se deseja utilizar. A partir desse valor, é possível encontrar a razão  $R$  proposta na equação 2, que será o fator de multiplicação da frequência padrão da corda do instrumento desejado, que no caso do contrabaixo poderia ser 41,2, 55, 73,4 ou 98 Hz, gerando a nova frequência da corda, cujo cálculo é apresentado na equação 4.

Baseado em toda a teoria apresentada, cada instrumento musical possui seu próprio modo de afinação, auxiliado muitas vezes por dispositivos externos, os chamados afinadores. Nas próximas duas subseções, esses tópicos serão tratados em detalhes.

### 2.2.1 Método de afinação do contrabaixo acústico

Diferentemente dos outros instrumentos de cordas de uma orquestra, com o violino, a viola e o violoncelo, afinados em quintas, o contrabaixo acústico é afinado em quartas (LONG, 2016). Isso remete ao intervalo de quarta justa mostrado na última seção, ou seja, existem cinco semitons entre cada uma das notas de suas cordas. De forma simplificada, partindo da corda mais grave Mi, e contando-se quatro notas a frente, tem-se a corda Lá (Mi, Fá, Sol, Lá). Da mesma forma encontra-se a corda Ré (Lá, Si, Dó, Ré) e por fim, a mais aguda Sol (Ré, Mi, Fá, Sol).

Como relatado anteriormente, cada uma das cordas é afinada através do ajuste de sua tração. Da forma como estão presas nas tarraxas, girando-as no sentido anti-horário (quando se observa da parte de trás do instrumento), é possível aumentar a tração e tornar a frequência fundamental da corda mais aguda, como mostra a figura 10. Do contrário, com um giro no sentido horário, a corda irá se soltar e sua frequência será mais grave.

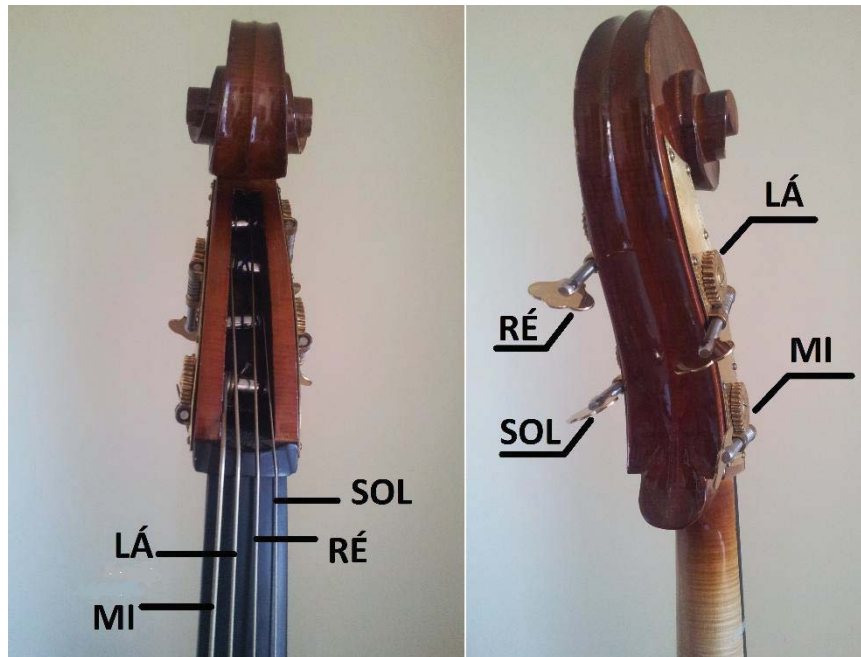
Figura 10 - Sentido de rotação das tarraxas para realizar um ajuste agudo da afinação



Fonte: Próprio Autor

Assim, é aconselhável que essa metodologia seja aplicada às cordas em uma ordem específica, que não é da mais aguda a mais grave ou justamente o contrário como pode parecer. Não somente os contrabaixistas, como outros instrumentistas desse gênero, costumam iniciar a afinação pela 2ª corda, seguindo pela 3ª, 4ª e somente no final afinam a 1ª corda ou a mais aguda. Eles tomam esse cuidado, porque a corda mais aguda exerce sobre o cavalete do instrumento uma tensão maior, portanto se ela for ajustada por primeiro, é possível que após o ajuste das demais ela esteja desafinada novamente. Desta forma, no contrabaixo a ordem de afinação mais apropriada é ajuste das cordas Ré, Lá, Mi e por fim da Sol. A figura 11, mostra a localização de cada corda juntamente com sua respectiva tarraxa.

Figura 11 - Cordas do contrabaixo acústico relacionadas com suas respectivas tarraxas



Fonte: Próprio Autor

### 2.2.2 Dispositivos que auxiliam a afinação

Existem atualmente opções variadas de métodos e equipamentos que auxiliam na afinação dos instrumentos musicais. Dentre eles, está o conhecido como “de ouvido”, que consiste em determinar se a nota musical se encontra na frequência correta apenas comparando-a com uma nota de referência, que pode ser oriunda de outro instrumento musical, como o piano, por exemplo, ou ainda através de um diapasão. O diapasão, mostrado na figura 12, é “um arco de metal que quando acertado por algo duro, [...], vibra produzindo a frequência correta para a afinação da nota Lá” (LOSCHI e FORTES, s.d., p. 2), ou seja em 440 Hz.

Figura 12 - Diapasão



Fonte: <http://fiscasonora.blogspot.com.br/2013/02/o-diapasao.html>



Como o contrabaixo não possui nenhuma corda na frequência de 440 Hz, os contrabaixistas costumam utilizar o diapasão afinando em harmônicos. O fato é que quando os dedos apenas encostam no ponto equivalente a metade do comprimento da corda e não a pressionam, ela soa em uma frequência cinco vezes maior que a sua fundamental. Fazendo isso na corda Ré do instrumento, a primeira a ser afinada, obtém-se um harmônico em Lá (110 Hz) que pode ser comparado a nota gerada pelo diapasão porque está exatamente a duas oitavas abaixo. Assim, o mesmo procedimento é realizado nas outras cordas, na ordem adequada sempre tendo como base a corda afinada anteriormente.

Esse método não é utilizado pelos músicos iniciantes, pois o ouvido precisa estar bem treinado para identificar as variações na frequência fundamental, e principalmente quando os intervalos são pequenos essa tarefa se torna complicada. Nem mesmo profissionais, ou músicos experientes possuem ouvido absoluto, e portanto, podem haver enganos. Por isso os afinadores eletrônicos são muito utilizados atualmente.

Afinadores eletrônicos não produzem som algum, pelo contrário, eles recebem o sinal sonoro do instrumento através de um microfone ou de um sensor piezoelétrico preso em um clip, interpretam esse sinal comparando com uma referência pré-estabelecida, e através de algum tipo de visor, como o LCD (*Liquid Crystal Display*), ou de uma barra de LED's (*Light-Emitting Diode*), mostram ao usuário se a nota está abaixo ou acima da frequência fundamental correta (LOSCHI e FORTES, s. d.).

Dispositivos como estes, estão representados na figura 13. O modelo (a) (GTU-1 da Giannini), costuma ser colocado no cavalete do contrabaixo, pois além de ser o melhor lugar para detectar a vibração das cordas caso o som seja captado pelo clip, ele é próximo dos efes, onde o som amplificado pode ser captado pelo microfone. Já o modelo (b) (GTU-2 da Giannini), costuma ser utilizado mais distante do instrumento captando as ondas sonoras pelo microfone, mas possui um cabo com um clip caso essa opção seja desejada.

Figura 13 - Afinadores Eletrônicos



Fonte: [http://www.giannini.com.br/imgs/downloads/1\\_arquivo.Giannini\\_catalogo\\_2016.pdf](http://www.giannini.com.br/imgs/downloads/1_arquivo.Giannini_catalogo_2016.pdf)

As especificações desse tipo de afinador costumam variar perante seu preço e aplicação, mas geralmente a frequência de referência pode ser ajustada entre 430 e 450 Hz e a faixa de afinação vai de Lá (27,5 Hz) a Lá (1760 Hz) ou ainda até Dó (4186,01 Hz). Além disso, o dispositivo possui modo de afinação temperado, além de outros utilizados em instrumentos como o violão e guitarra, e várias outras funções adicionais. Não há qualquer limitação que impeça um músico iniciante de utilizá-lo, o que pode acontecer é que dependendo da qualidade do equipamento e do local onde ocorre a afinação, o sinal pode sofrer grande interferência de ruído e por isso a nota desejada demora a ser identificada.

Recentemente, os afinadores em aplicativos de celular como o *gStrings*, apresentado na figura 14, ganharam força, principalmente devido a praticidade que garantem. Qualquer pessoa que possua um celular estará sempre com ele e, portanto poderá “carregar” um afinador por onde for. Além disso, eles funcionam como um afinador propriamente dito e possuem especificações muito semelhantes a eles. A grande deficiência desse método, no entanto, é a captação do sinal, feita através do microfone do celular que não é projetado especificamente para isso, muito menos para baixas frequências. Nesse caso, além do ruído

que pode interferir no sinal, os próprios harmônicos gerados pelo instrumento podem confundir o processamento e atrasar a resposta ao usuário.

Figura 14 - Afinador em aplicativo de celular



Fonte: Próprio Autor

É possível observar na figura 14, que os afinadores em aplicativo de celular também usam o padrão de afinação temperado, e uma frequência central de referência que representa a nota que se deseja afinar. O ponteiro pode excursionar até 100 c ou “cem centos” para mais ou para menos, e caso não se adequar aos pontos dispostos na tela, provavelmente não está na nota correta e deverá mudar sua frequência de referência, como abordado anteriormente.

### 2.3 CAPTADOR DE SINAL

Para que o sinal elétrico equivalente ao das ondas sonoras geradas pela vibração das cordas de um contrabaixo acústico seja obtido com qualidade, o dispositivo transdutor deve apresentar necessariamente uma boa resposta em baixa frequência. Dentre as opções disponíveis no mercado, a mais viável em termos de custo, praticidade e eficiência é a utilização de um sensor piezoelétrico, descrito na subseção seguinte.

### 2.3.1 Sensor Piezoelétrico

Os sensores piezoelétricos são transdutores passivos que produzem um sinal elétrico de saída quando submetidos a uma deformação mecânica. Da mesma forma, quando for aplicada uma tensão em seus terminais, eles são capazes de produzir uma vibração mecânica, e portanto são recíprocos. Basicamente isso ocorre porque:

Quando o cristal está em repouso, todas as cargas elétricas positivas e negativas estão simetricamente distribuídas, de modo que a carga total é neutra. Quando uma força é exercida sobre o cristal, essa simetria é desfeita e a distribuição irregular das cargas faz surgir uma tensão. (PATSKO, 2006, p. 33).

Antigamente os materiais piezoelétricos conhecidos eram apenas os cristais de quartzo, turmalina, e sais de Rochelle. No entanto, a partir de 1940, certas cerâmicas como a titanite de bário, e principalmente a titanite de zircônio (PZT), tem sido especialmente fabricadas como os materiais piezoelétricos mais usuais. É o caso, por exemplo, do captador piezoelétrico apresentado na figura 15. Observa-se que existe uma camada metálica em sua borda, que é aplicada com o intuito de auxiliar as cargas elétricas geradas pela deformação mecânica a serem enviadas para os terminais do sensor (fios) (PATSKO, 2006).

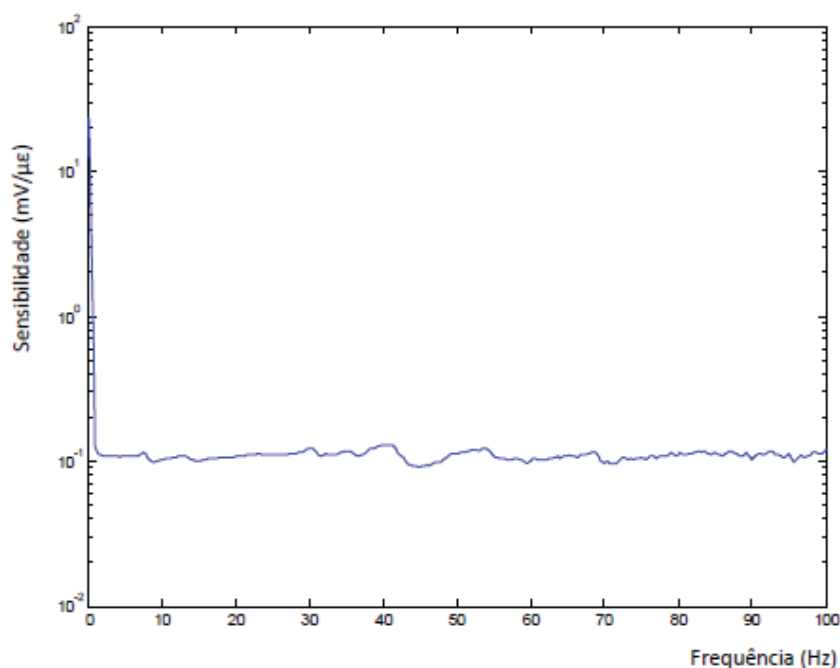
Figura 15 - Captador piezoelétrico



Fonte: <http://www.vidadesilicio.com.br/pastilha-piezoelétrico-27mm-com-fio.html>

Na figura 16, é possível observar um estudo de Lannes (2009), a partir de um ensaio experimental, sobre a variação da sensibilidade à deformação em função da frequência, em uma faixa de 0 Hz a 100 Hz, justamente a faixa de frequências do contrabaixo acústico, para uma cerâmica piezoelétrica. Pode-se perceber, desta forma, que o sensor piezoelétrico apresenta uma resposta praticamente linear na faixa de frequência analisada, e apenas quando excitado em frequências muito baixas, na faixa de 0 Hz a aproximadamente 1 Hz, é que, por sua natureza capacitiva, tem a sensibilidade prejudicada, ou seja, apresenta um grande desvio de sensibilidade.

Figura 16 - Variação da sensibilidade à deformação em função da frequência



Fonte: Adaptado de Lannes (2009).

Contudo, segundo Lima (2013), apesar de serem mais adequados à medição de grandezas dinâmicas, é possível sim medir deformações até mesmo com frequência abaixo de 1 Hz através de cerâmicas piezoelétricas, desde que se utilize de circuitos condicionadores apropriados.

## 2.4 ATUADOR

Afinar corretamente o contrabaixo acústico exige a rotação precisa de suas tarraxas no sentido horário e anti-horário, caso contrário, as cordas e a própria estrutura do instrumento podem ser prejudicadas. Além disso, ter força ou torque suficiente para movê-las é essencial. Por isso, muito mais pela segunda característica do que pela primeira, a melhor alternativa para atuar automaticamente no instrumento é a utilização de um motor CC com caixa de redução, dispositivo cujo funcionamento é descrito na subseção seguinte.

### 2.4.1 Motor CC

O motor CC é assim chamado porque é alimentado por uma corrente contínua. Basicamente, ele é formado por quatro partes principais: o estator, a armadura, o comutador e as escovas.

O estator “é a parte fixa do motor que pode conter um ou mais enrolamentos por pólo, todos prontos para receber corrente contínua e produzir campo magnético fixo” (CARVALHO, 2008, p. 89). Em alguns motores CC, principalmente nos de baixa potência, o campo magnético no estator é produzido por ímãs permanentes.

Já o rotor, é a parte girante do motor CC, e contém um enrolamento denominado armadura, que também receberá corrente contínua, gerando assim outro campo magnético. O comutador, por sua vez, é um dispositivo mecânico no qual estão conectados os terminais das espiras da armadura, e cujo papel é inverter sistematicamente o sentido da corrente contínua que circula na mesma, um mecanismo essencial para o funcionamento do motor, que evita que a armadura estacione em uma posição de equilíbrio.

Por fim, as escovas, feitas de liga de carbono, “estão em constante atrito como o comutador, sendo responsáveis pelo contato elétrico da parte fixa do motor com a parte girante” (CARVALHO, 2008, p. 89), e por isso costumam sofrer desgaste. Assim, de forma simplificada, o funcionamento dos motores CC de ímã permanente, baseia-se no princípio do eletromagnetismo clássico, pelo qual um condutor, no caso o enrolamento da armadura, quando percorrido por uma corrente oriunda de uma fonte CC (que chega até ele passando pelas escovas e pelo comutador), e mergulhado em um fluxo magnético fixo (produzido pelos ímãs permanentes no estator), fica submetido a uma força de natureza eletromagnética que produzirá movimento.

Del Toro (1994), define que o torque  $T$  de um motor CC é dado pela equação 5, e que sua rotação  $n$ , é dada pela equação 6, onde  $K$  é uma constante que depende do projeto construtivo do motor,  $I_a$  é a corrente de armadura,  $V_a$  é a tensão de armadura,  $R_a$  é a resistência de armadura e  $\phi$ , é o fluxo produzido pelo campo do estator.

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a \quad (5)$$

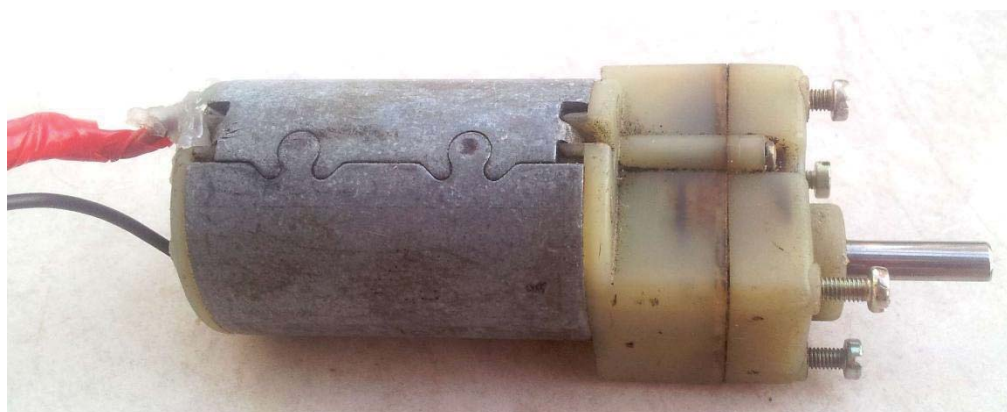
$$n = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K \cdot \phi} \quad (6)$$

Assim, para um motor CC de ímã permanente, onde o fluxo  $\phi$  é constante, pode-se dizer que o torque é diretamente proporcional ao módulo da corrente da armadura  $I_a$ . Pela mesma razão, a maneira mais adequada de variar a rotação de um motor como esse é variando a sua tensão de armadura  $V_a$ . Quanto a possibilidade de inversão no sentido de rotação do motor,

esta se dá de uma maneira muito simples: basta que se inverta a polaridade da fonte CC que alimenta o circuito de armadura.

Ainda, quando pelas próprias características construtivas do motor e através do seu ponto de operação nominal não é possível obter a relação de torque desejada, pode-se acoplar a esse motor o que se chama de caixa de redução. As caixas de redução são arranjos mecânicos, normalmente feitos com engrenagens, que tem a função de reduzir a velocidade angular e como consequência, aumentar o torque de um motor. A figura 17 mostra um motor CC com uma caixa de redução acoplada ao seu eixo.

Figura 17 - Motor CC com caixa de redução



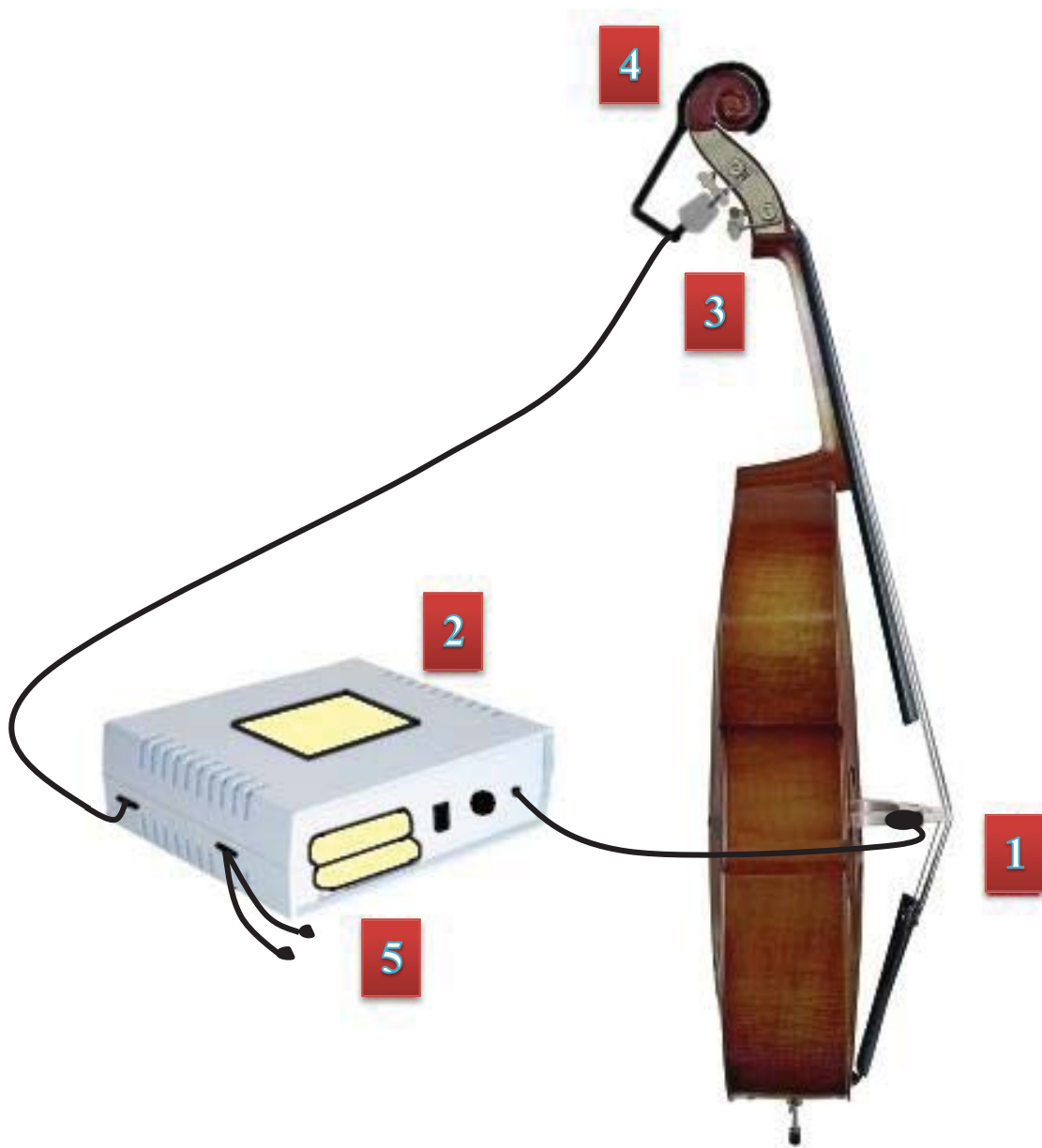
Fonte: Próprio Autor



### 3 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO

O presente projeto visa automatizar o processo de afinação de um contrabaixo acústico. Portanto, para atingir esse objetivo, fazem-se necessárias todas as estruturas apresentadas na figura 18, e descritas na sequência.

Figura 18 - Visão geral do projeto



Fonte: Próprio Autor



O protótipo conta com um sensor piezoelétrico preso a um clip (1), que é posicionado no cavalete do instrumento para realizar a captação da frequência de cada uma de suas cordas. O usuário pode definir a frequência padrão de sua preferência e acompanha todo o processo de afinação através de uma interface composta por um *display LCD touch screen* (2). O sistema verifica se a frequência de cada uma das cordas está de acordo com a estabelecida pelo usuário e caso seja necessário um ajuste, este será feito através de um motor CC com caixa de redução (3), que é acoplado as tarraxas do instrumento, uma a uma, através de uma estrutura mecânica presa a sua voluta (4).

Todo o conjunto é alimentado por duas baterias (5) de saída 5V/2.1A e capacidade nominal de 12Ah, ligadas em paralelo, o que garante a portabilidade do sistema. Um microcontrolador faz o controle de todo o processo, e para isso é essencial que este possua os módulos de timer, captura, comunicação SPI, PWM, e pinos de entrada e saída (I/O) suficientes.

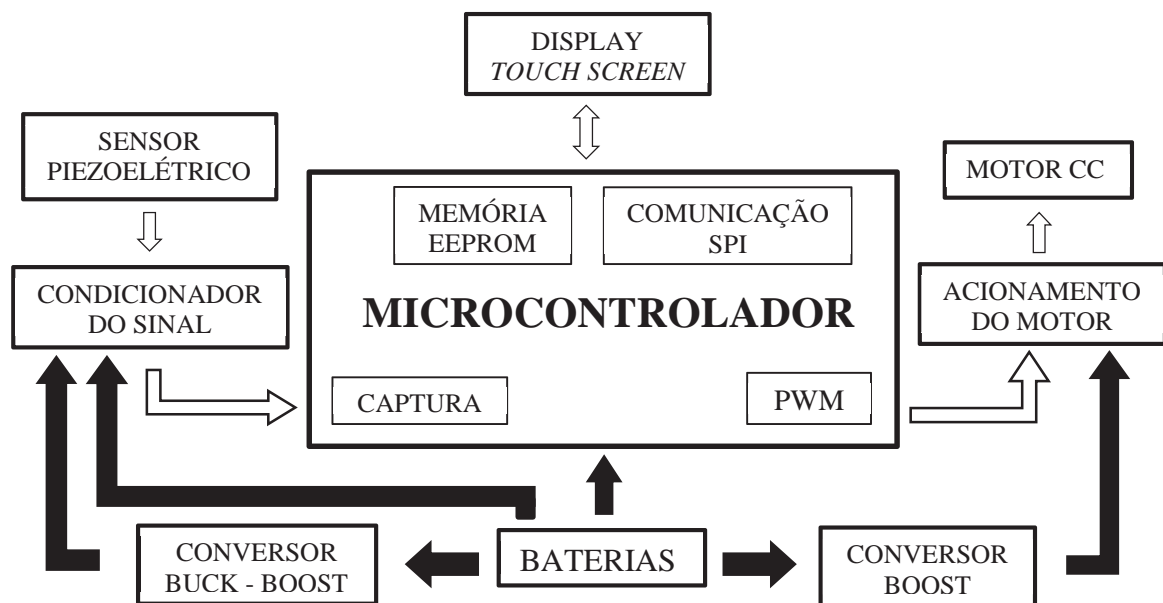
## 4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Para abordar todas as partes do projeto de forma bem detalhada, este é dividido em termos de *hardware*, *firmware*, da estrutura mecânica que é utilizada e ainda do funcionamento do protótipo. Esses tópicos serão apresentados nas subseções a seguir.

### 4.1 HARDWARE

O diagrama de blocos que se observa na figura 19 apresenta uma visão geral das partes que compõe o *hardware* do projeto. Na sequência, cada bloco será descrito com mais detalhes.

Figura 19 - Diagrama do hardware do projeto

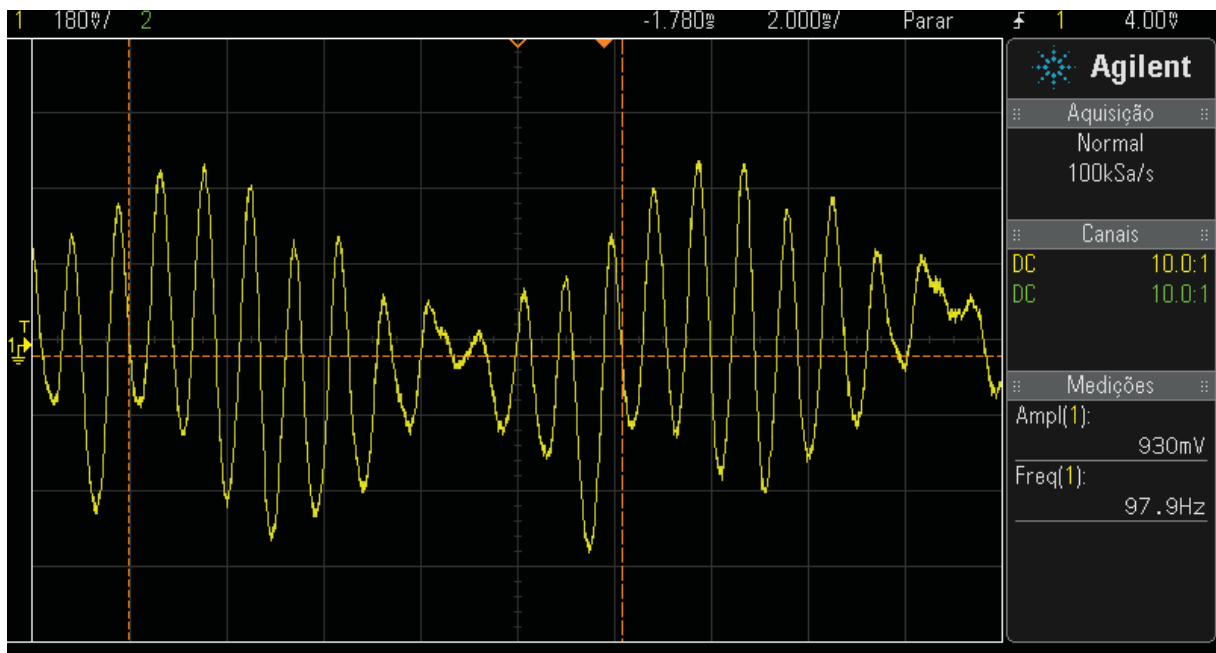


Fonte: Próprio Autor

#### 4.1.1 Sensor Piezoelétrico

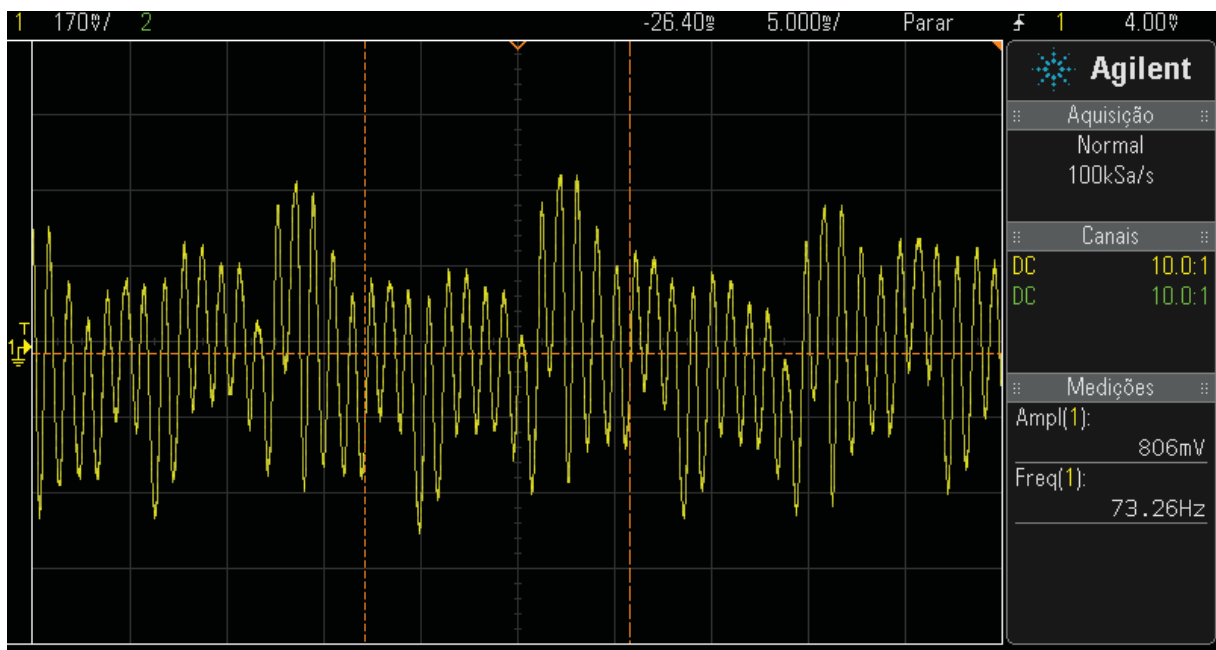
Como foi dito na seção 2.3, o sensor utilizado para a captação da frequência de cada uma das cordas do Contrabaixo Acústico, é um sensor piezoelétrico. A seguir, nas figuras 20, 21, 22 e 23, é possível observar, respectivamente, a forma de onda obtida nos terminais do sensor, quando este é posicionado no instrumento e são tocadas as cordas Sol, Ré, Lá e Mi.

Figura 20 - Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Sol é tocada



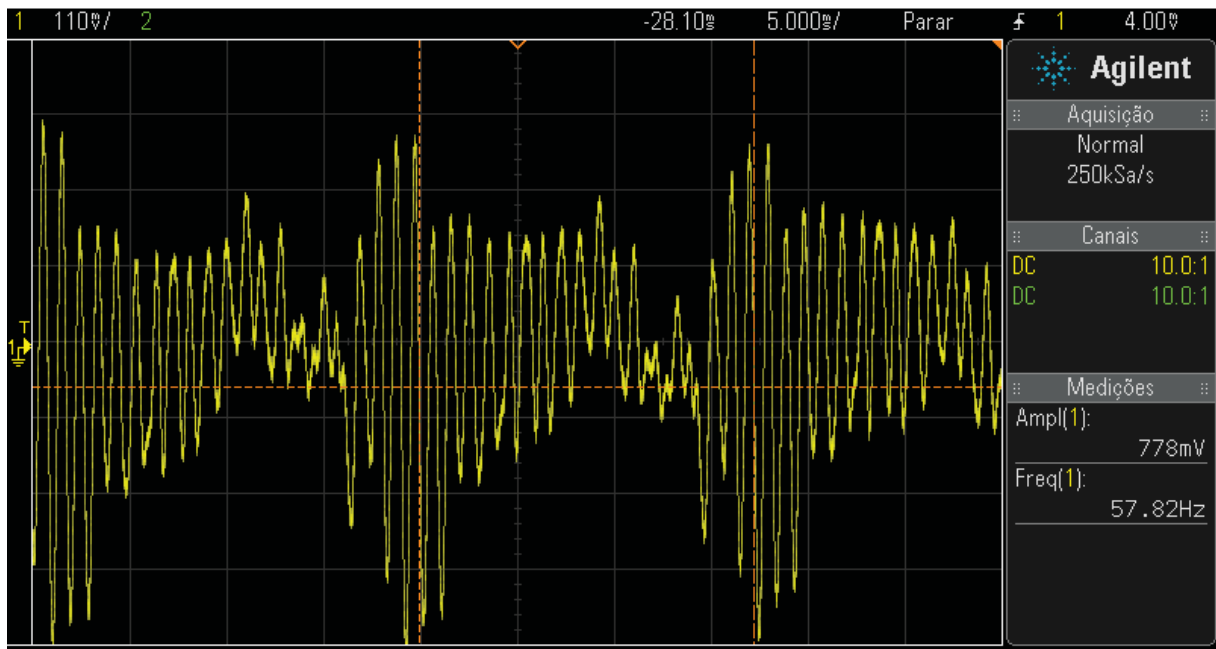
Fonte: Próprio Autor

Figura 21 - Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Ré é tocada



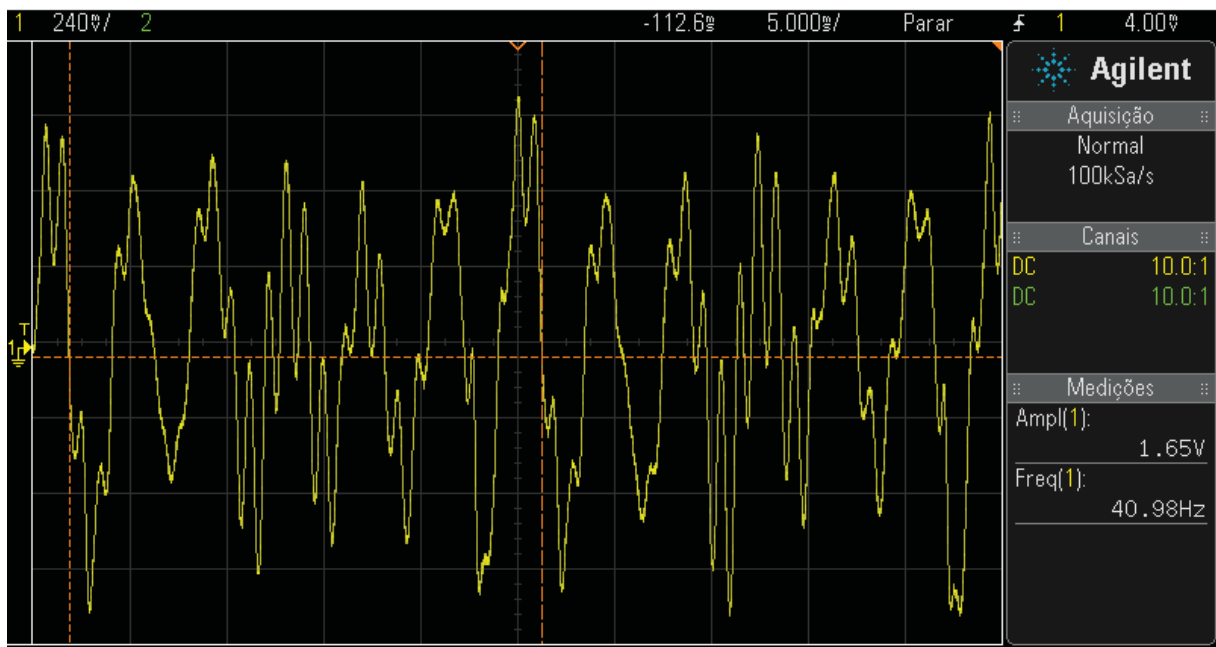
Fonte: Próprio Autor

Figura 22 - Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Lá é tocada



Fonte: Próprio Autor

Figura 23 - Forma de onda obtida nos terminais do sensor quando a corda Mi é tocada



Fonte: Próprio Autor

### 4.1.2 Condicionador do Sinal

O sinal elétrico de saída de um sensor piezoelétrico, como pode ser observado nas últimas figuras, costuma ter uma amplitude baixa, e ainda ser repleto de harmônicos, pela própria característica do timbre do instrumento. Por isso, é essencial que esse sinal seja devidamente condicionado até chegar adequadamente à porta do microcontrolador. É essa a função do bloco condicionador como um todo, que pode ser subdividido nos blocos apresentados na figura 24.

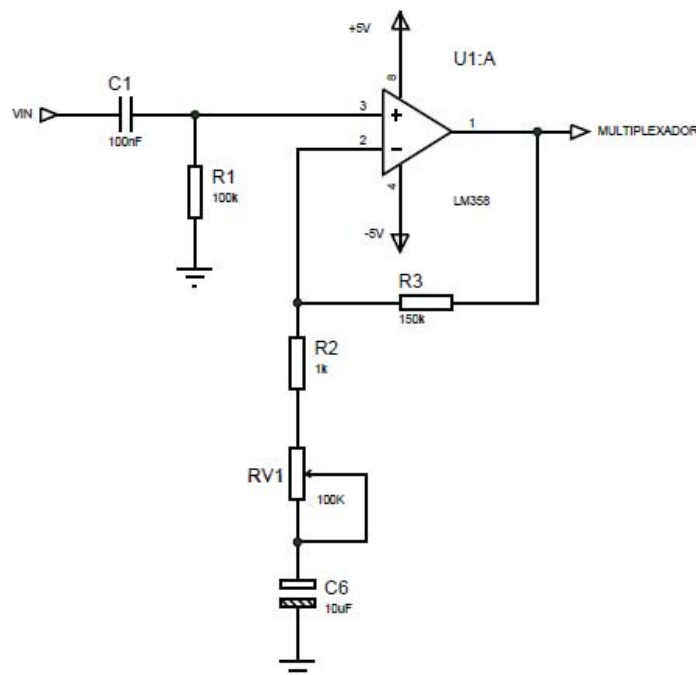
Figura 24 - Diagrama específico do bloco condicionador do sinal



Fonte: Próprio Autor

O circuito de pré amplificação, apresentado na figura 25, foi construído a partir de um amplificador operacional, o circuito integrado (CI) LM358, na configuração não inversora, cujo ganho ( $A_v$ ), variável devido a inserção do *trimpot* RV1, é dado pela equação 7, e pode, portanto, excursionar entre aproximadamente 2,5 a 151.

Figura 25 - Circuito de pré amplificação do bloco condicionador do sinal



Fonte: Próprio Autor

$$A_v = \frac{R_3}{R_2 + RV_1} + 1 \quad (7)$$

O CI LM358 é fabricado pela *Texas Instruments*®, e possui dois amplificadores operacionais que funcionam quando são alimentados de forma unipolar de 3V a 32V, e também com alimentação bipolar de  $\pm 1,5V$  a  $\pm 16V$ . Ele possui, segundo sua folha de dados, *Slew Rate* típico de  $0,1V/\mu s$ , Relação de Rejeição de Modo Comum (CMRR) típica de 85 dB, e Largura de Banda (BW) em ganho unitário de 1MHz, o que o tornou adequado às especificações do projeto.

Além do próprio amplificador operacional alimentado de forma bipolar ( $\pm 5V$ ), e dos resistores responsáveis por seu ganho, tem-se no sistema o resistor R1 e o capacitor C1. Eles formam um filtro passa-alta, que possui a função de garantir que nem mesmo uma pequena parcela de sinal CC entre no circuito e seja amplificada juntamente ao sinal de interesse. A frequência de corte ( $f_c$ ) desse filtro é dada equação 8, e deve, necessariamente, ser menor que a frequência mais grave gerada pelo contrabaixo acústico, 41,2 Hz.

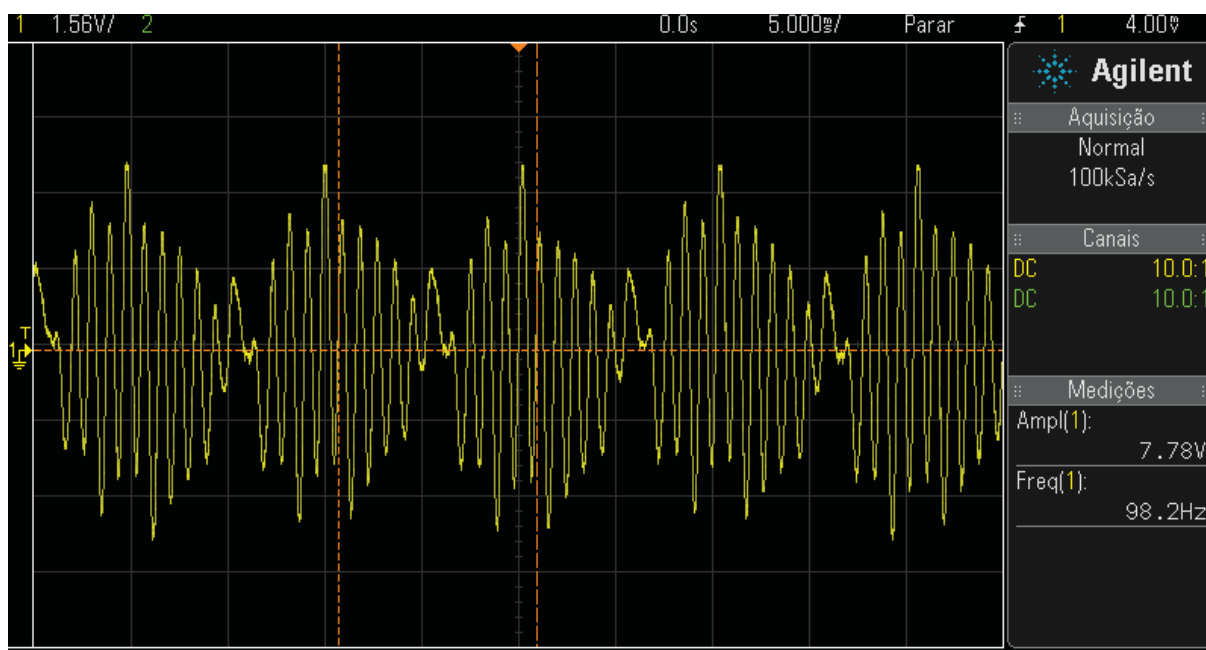
$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (8)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 100k \cdot 100n}$$

$$f_c = 15,91 Hz$$

Após a passagem pelo pré amplificador, o sinal oriundo do sensor piezoelétrico se torna muito mais limpo e definido, o que pode ser visto na figura 26, quando analisado o sinal correspondente ao caso em que a corda Sol é tocada.

Figura 26 - Forma de onda de saída do pré amplificador quando a corda Sol é tocada



Fonte: Próprio Autor

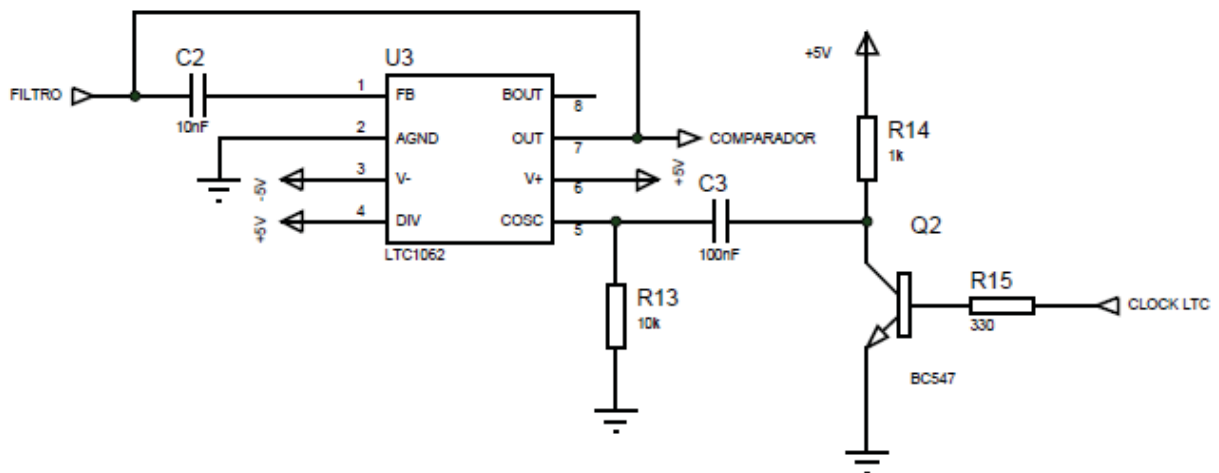
Contudo, fica claro que ainda resta um grande inconveniente: a presença de inúmeros harmônicos, que principalmente nas frequências mais baixas, chegam a se sobressair a frequência fundamental. Por isso, é essencial a utilização de um circuito de filtro no sistema.

No intuito de tornar o circuito de filtro eficiente e compacto, o CI LTC1062 foi utilizado no projeto. Este CI é um filtro passa baixas de 5ª ordem e configuração *Butterworth*, fabricado pela *Linear Technology*®, que não possui erro CC, o que o torna adequado para projetos onde se necessita de precisão. Ele opera até 20kHz, quando alimentado de forma unipolar com 5V ou ainda de forma bipolar com tensões de até  $\pm 8V$ , e é muito utilizado em frequências baixas, uma característica importante para esse projeto. Para determinar sua frequência de corte, é necessário realizar uma combinação RC externa que se relacionará a inserção de um sinal de *clock* no seu pino 5 de frequência 100 vezes maior que a frequência de corte. Este circuito pode ser visto na figura 27.

Para que fosse possível enviar o sinal de *clock* ao CI através de uma porta do microcontrolador, fez-se necessária a utilização de um pequeno circuito composto por R13, R14, R15, Q2 e C3. Os resistores R14, R15 e Q2, um transistor bipolar NPN BC547, são responsáveis por chavear o sinal de *clock* garantindo que ele chegue ao pino do CI, com um potencial de nível lógico alto igual a 5V, já que o nível de saída do microcontrolador, de potencial 3,3V, foi insuficiente para garantir o funcionamento adequado do circuito. Já R13 e

C3 funcionam como um filtro passa-alta, que garante que um sinal de *clock* unipolar possa ser inserido nesse pino, e sua utilização, nos valores em questão, é adaptada de uma sugestão encontrada na folha de dados do componente.

Figura 27 - Circuito de filtro com base no CI LTC1062



Fonte: Próprio Autor

O cálculo do resistor R15 é dado pela equação 9 apresentada logo abaixo, onde  $V_b$  é o potencial de nível lógico alto da saída do microcontrolador aplicado à base do transistor,  $V_{be(sat)}$ , a tensão base-emissor quando se garante a condição de saturação do transistor, e  $I_b$  a corrente de base desejada. Através da folha de dados do transistor, é possível determinar que o valor típico de  $V_{be(sat)}$  é 0,7V, e que a máxima  $I_b$  é igual a 10 mA. Por isso, para garantir a saturação correta do transistor, foi utilizada uma corrente próxima ao valor máximo de  $I_b$ , de aproximadamente 8mA.

$$R15 = \frac{V_b - V_{be(sat)}}{I_b} \quad (9)$$

$$R15 = \frac{3,3 - 0,7}{8 \times 10^{-3}}$$

$$R15 = 325\Omega \approx 330\Omega$$

Da mesma forma, para garantir a saturação de um transistor, sabendo que seu ganho de corrente  $\beta$  típico é de aproximadamente 350, é necessário que sua corrente de coletor esteja de acordo com a equação 10.



$$I_c < I_b \cdot \beta \quad (10)$$

$$I_c < (8 \times 10^{-3} \cdot 350)$$

$$I_c < 2,8A$$

Assim, utilizando um resistor de  $1k\Omega$  para R14, e sabendo que  $V_{ce(sat)}$ , a tensão coletor-emissor do transistor quando este está devidamente saturado é tipicamente  $0,2V$ , e ainda que o potencial  $V_{cc}$  é de  $5V$ , percebe-se através da equação 11, que a condição para a saturação do transistor é satisfeita.

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{ce(sat)}}{R14} \quad (11)$$

$$I_c = \frac{5 - 0,2}{1 \times 10^3}$$

$$I_c = 4,8mA$$

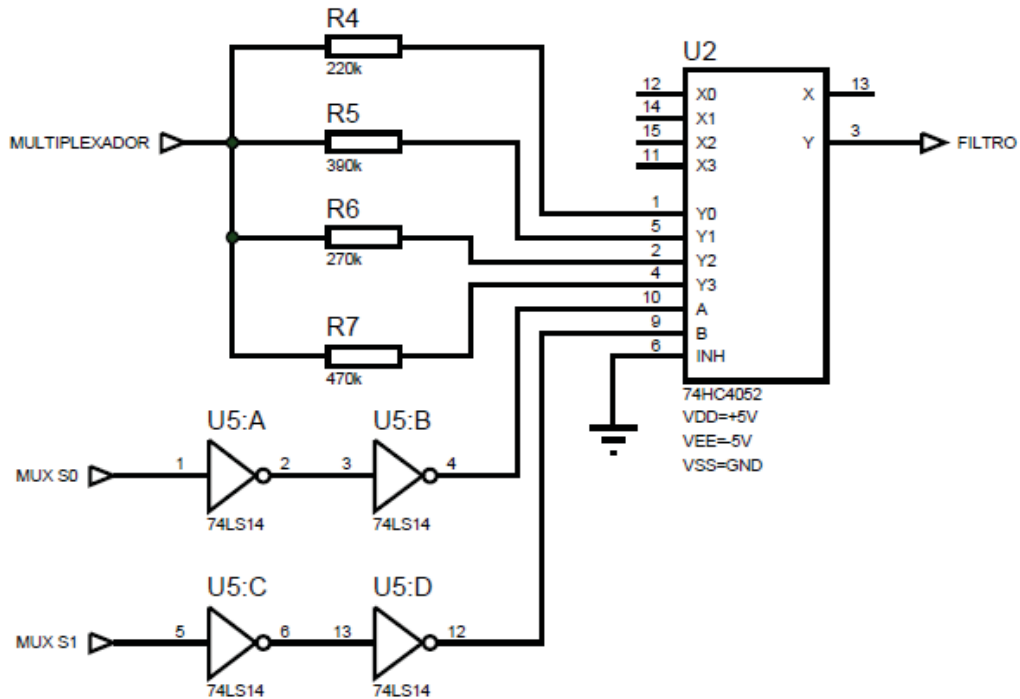
Juntamente ao sinal de *clock* inserido no sistema, é necessária, como abordado anteriormente, a inserção de um circuito RC disposto logo na entrada do CI LTC1062. Os valores do resistor R e do capacitor C se relacionam com a frequência de corte ( $f_c$ ) desejada através da equação 12, que está disponível nas folhas de dados do componente.

$$\frac{f_c}{1,62} \leq \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (12)$$

Contudo, nesse projeto, serão captadas quatro frequências diferentes, e portanto também serão necessárias quatro frequências de corte diferentes para o filtro. Em relação à frequência de *clock* inserida no pino 5 do CI LTC 1062, tudo se torna uma questão de *firmware*, que pode ser resolvida facilmente. Já em relação ao circuito RC, para que haja a alteração de  $f_c$ , tem-se duas opções: ou o valor do capacitor ou o valor do resistor deve ser variável.

Devido às questões de logística no circuito, pela disponibilidade de componentes e também por meio de testes, constatou-se que a melhor maneira de realizar esse processo é alterando o valor do resistor. Para efetuar essa função, está sendo utilizado no projeto um multiplexador analógico, o CI 74HC4052, como mostra a figura 28.

Figura 28 - Multiplexador analógico 74HC4052 chaveando diferentes resistores



Fonte: Próprio Autor

Este CI pode ser utilizado para aplicações analógicas e digitais e possui dois canais, onde a chave de cada um deles possui quatro entradas/saídas em comum e também uma saída/entrada comum. O pino de habilitação de todo o CI assim como os dois pinos disponíveis para controle, S0 e S1 são comuns às duas chaves. Ainda, o seu potencial de alimentação deve permanecer entre  $\pm 5V$ .

Tendo como base o valor de C apresentado na figura 27, que no circuito é representado como C2, de 10 nF, e utilizando os valores de  $f_c$  de 115 Hz, 85 Hz, 65 Hz e 50 Hz, que são frequências um pouco superiores as frequências fundamentais padrão de cada corda, de forma a garantir que o ponto de máximo ganho do filtro esteja em torno delas, através da equação 12, pode-se chegar na equação 13, e então é possível determinar o valor de R4, R6, R5 e R7, respectivamente.

$$R \leq \frac{1,62}{2\pi \cdot f_c \cdot C} \quad (13)$$

$$R4 \leq \frac{1,62}{2\pi \cdot 115 \cdot 10 \times 10^{-9}}$$

$$R4 \leq 224,2k\Omega$$

$$R4 = 220k\Omega$$

$$R6 \leq \frac{1,62}{2\pi \cdot 85 \cdot 10 \times 10^{-9}}$$

$$R6 \leq 303,33k\Omega$$

$$R6 = 270k\Omega$$

$$R5 \leq \frac{1,62}{2\pi \cdot 65 \cdot 10 \times 10^{-9}}$$

$$R5 \leq 396,66k\Omega$$

$$R5 = 390k\Omega$$

$$R7 \leq \frac{1,62}{2\pi \cdot 50 \cdot 10 \times 10^{-9}}$$

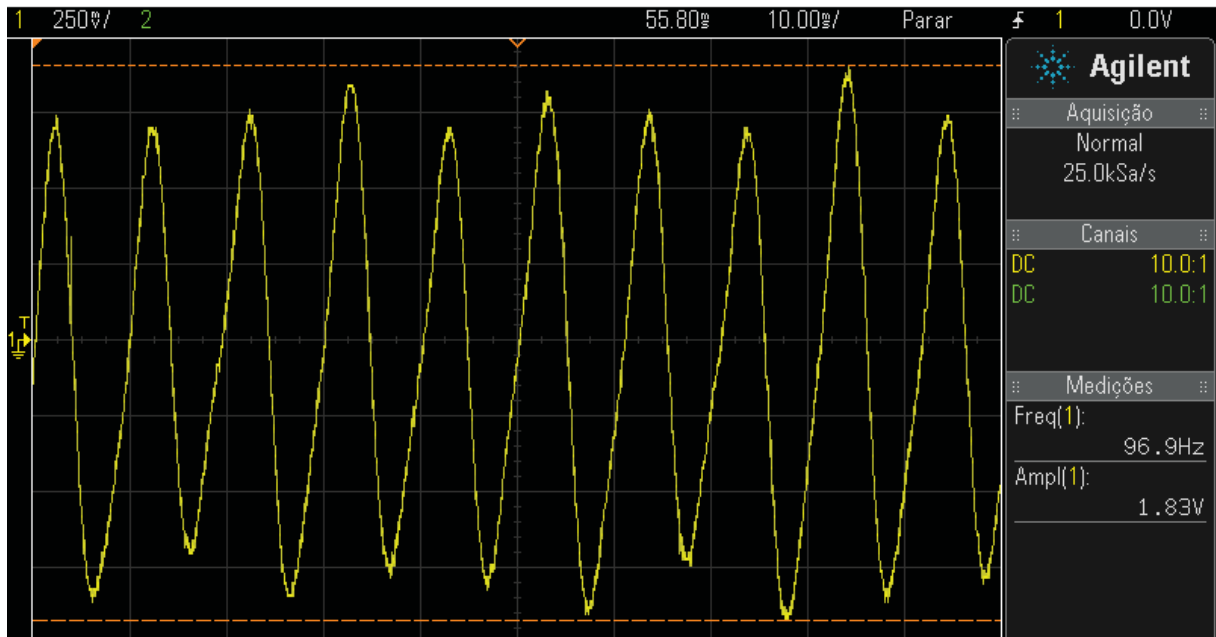
$$R7 \leq 515,66k\Omega$$

$$R7 = 470k\Omega$$

Observa-se ainda, que os sinais de controle das chaves que são enviados ao multiplexador pelo microcontrolador passam, antes de atingir o CI, por duas portas lógicas inversoras com histerese, presentes no CI 74LS14, o chamado “inversor com *Schmitt Trigger*”. O CI 74LS14, fabricado pela empresa *Fairchild*®, possui seis portas lógicas inversoras com histerese, é alimentado com as tensões de 0V e 5V e considera como nível lógico alto em sua entrada um potencial de no mínimo 2,7V, enquanto que na sua saída, gera um nível lógico alto de potencial 5V, a sua tensão de alimentação. Essa característica o tornou indispensável ao projeto, pois o multiplexador analógico não realiza o chaveamento corretamente quando um potencial 3,3V, o nível lógico alto de saída do microcontrolador, é aplicado diretamente a seus pinos de controle.

Após a passagem pelo circuito de filtro, o sinal é quase puramente senoidal em sua frequência fundamental, como mostra a figura 29, onde é apresentada a forma de onda de saída do CI de filtragem LTC1062, quando, novamente, a corda Sol é tocada.

Figura 29 - Forma de onda do sinal de saída do CI LTC1062

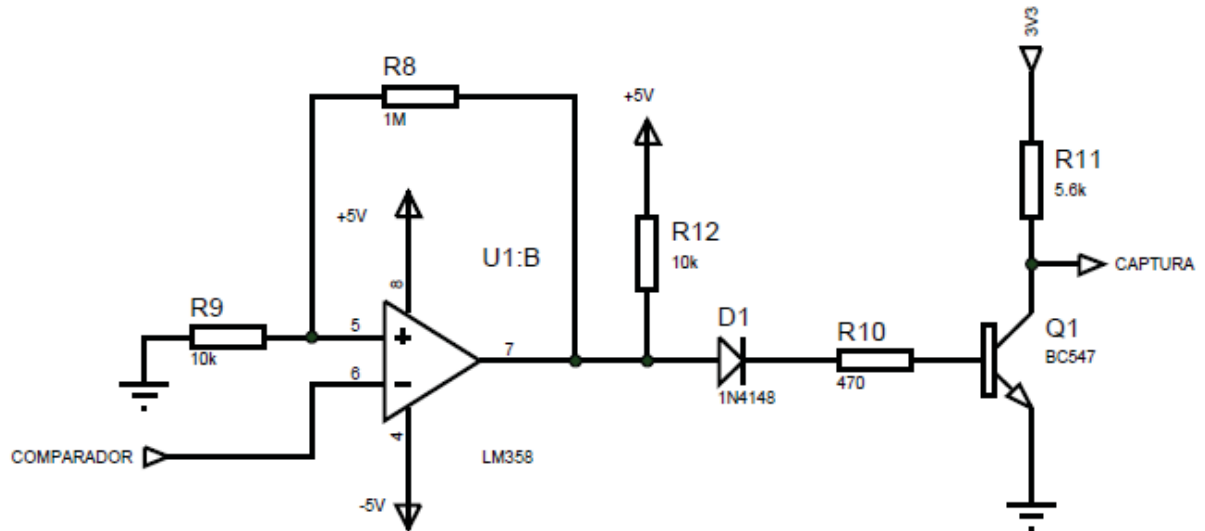


Fonte: Próprio Autor

Portanto, a partir daí, existem algumas alternativas que fazem com que seja possível transformar, finalmente, esse sinal em um sinal digital, ou seja, numa onda quadrada, que possa ser processada pelo microcontrolador. Como a característica mais interessante do sinal para o projeto em questão é a sua frequência, e não se está interessado em sua amplitude, pode-se tranquilamente saturar o sinal senoidal na amplitude adequada à porta do microcontrolador.

O circuito mais apropriado para realizar essa função é o comparador com histerese, o circuito com realimentação positiva, mostrado na figura 30. Ele também é construído utilizando-se do amplificador operacional LM358, na configuração inversora, com alimentação bipolar  $\pm 5V$ .

Figura 30 - Comparador com histerese



Fonte: Próprio Autor

Os valores de R8, R9 e R12 foram obtidos através de um circuito sugerido na folha de dados do amplificador operacional, de forma que R8 e R9 são os resistores responsáveis por definir os potenciais de disparo VDS e VDI do comparador, tal como afirma Pertence Jr. (2015), através das equações 14 e 15.

$$VDS = \frac{R9}{R9 + R8} \cdot (+V_{sat}) \quad (14)$$

$$VDI = \frac{R9}{R9 + R8} \cdot (-V_{sat}) \quad (15)$$

Assim, admitindo que  $\pm V_{sat}$  seja o potencial de alimentação do operacional,  $\pm 5V$ , pode-se obter os potenciais de disparo do projeto nos cálculos seguintes.

$$VDS = \frac{10k}{10k + 1M} \cdot (+5)$$

$$VDS \cong 49,5mV$$

$$VDI = \frac{10k}{10k + 1M} \cdot (-5)$$

$$VDI \cong -49,5mV$$

Ainda, o resistor R12 é um resistor de *pull-up* indispensável ao funcionamento do circuito, enquanto que D1, R10, R11, e Q1 são responsáveis por adequar o sinal de saída do amplificador operacional que possui amplitudes que vão de -5V a +5V, a entrada na porta do microcontrolador, cuja amplitude deve variar de 0V a 3,3V. Nesse contexto, o diodo D1 é responsável por retificar o sinal de saída do operacional, que chega na base do transistor Q1 em amplitudes de 0V e 4,3V, devido a sua própria queda de tensão. Já R10, R11 e Q1 são responsáveis por chavear o sinal garantindo que ele chegue ao pino de entrada do microcontrolador, com um potencial de nível lógico alto igual a 3,3V, proporcionado pela própria saída de tensão regulada do microcontrolador. Q1 também é um transistor NPN bipolar, o BC547, e por isso nos cálculos de R10 e R11 serão utilizadas novamente as equações 9 e 11, respectivamente.

$$R10 = \frac{4,3 - 0,7}{8 \times 10^{-3}}$$

$$R10 = 450\Omega \approx 470\Omega$$

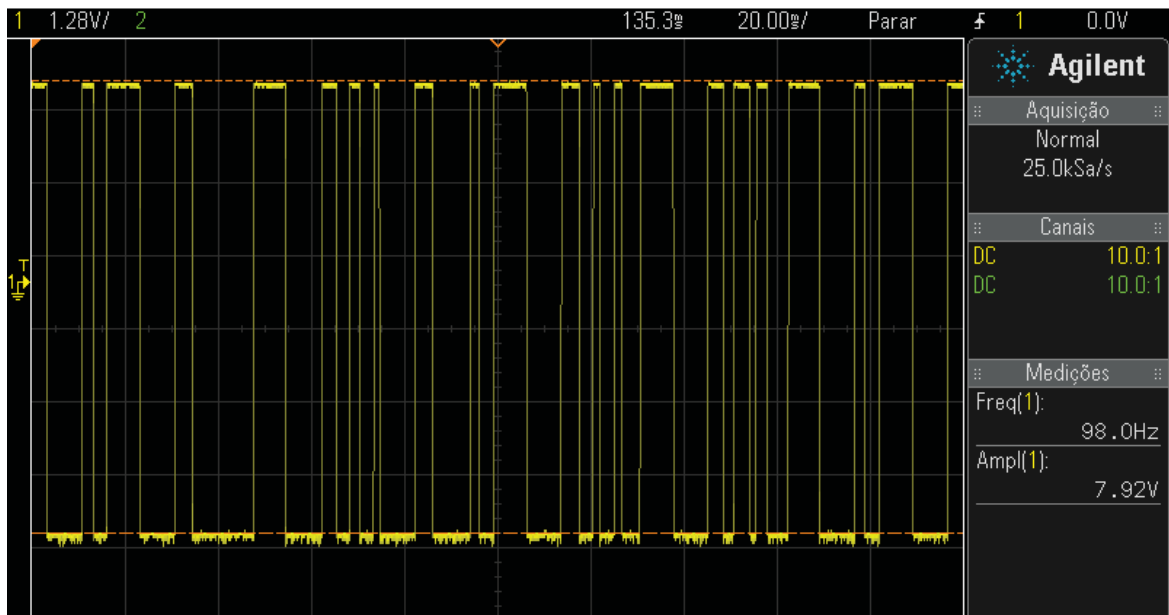
Conhecendo a condição afirmada pela equação 10, é possível verificar que a corrente de coletor do transistor Q1, está adequada para garantir a sua saturação quando o resistor R11 é de 5,6kΩ.

$$Ic = \frac{3,3 - 0,2}{5,6 \times 10^3}$$

$$Ic = 553,57\mu A$$

Na figura 31, é possível observar o sinal de saída do comparador com histerese (quando está sendo capturada a frequência da corda Sol), que ainda deverá ser retificado e adequado aos níveis de tensão do microcontrolador.

Figura 31 - Forma de onda de saída do comparador com histerese do projeto

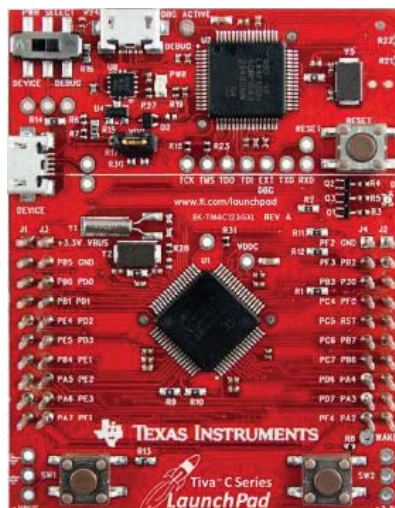


Fonte: Próprio Autor

#### 4.1.3 Microcontrolador

O microcontrolador escolhido foi o TM4C123 presente na EK-TM4C123GXL *LaunchPad*, uma placa de desenvolvimento produzida pela *Texas Instruments*®, apresentada na figura 32. Ele possui um processador ARM® Cortex M4 de 32 bits e 80 MHz, 256 kB de memória *Flash*, 32 kB de memória RAM e 2 kB de memória EEPROM, além de dois conversores A/D de 12 bits, doze temporizadores de 16/32 ou 32/64 bits, módulo PWM, e comunicações seriais UART, SPI e I2C.

Figura 32 - Tiva™ EK-TM4C123GXL LaunchPad



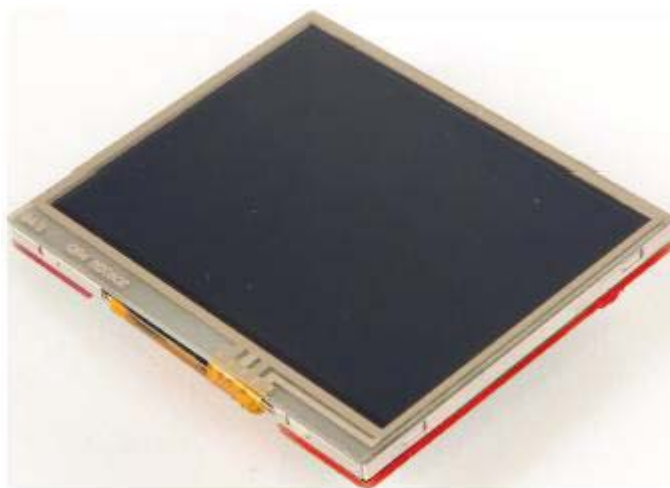
Fonte: <http://www.ti.com/tool/EK-TM4C123GXL>

Neste projeto foram utilizados os módulos do dispositivo descritos na sequência. O módulo de captura do timer foi utilizado para detectar a frequência de cada uma das cordas do instrumento por intermédio do bloco condicionador do sinal. A memória EEPROM foi utilizada para que os tons de referência padrão disponíveis ao usuário ficassem memorizados no sistema. O módulo de comunicação SPI foi utilizado para realizar a comunicação entre o microcontrolador e a interface com o usuário, o *display LCD touch screen*. O módulo PWM foi utilizado para gerar um sinal de *clock* necessário para que se determine a frequência de corte do circuito de filtro, e também, para realizar o acionamento do motor CC. Por fim, outro módulo de timer é responsável por definir o tempo em que o motor CC é acionado.

#### 4.1.4 Interface com o usuário

A interface escolhida foi o módulo BOOSTXL-K350VG-S1 Kentec QVGA Display BoosterPack, como mostra a figura 33. Este módulo consiste em um *display LCD touch screen* resistivo que já é adaptado para o uso em *LaunchPads*, e possui resolução de 320x240 pixels, tecnologia Transistor de Película Fina (65k TFT) onde até 65535 cores podem ser exibidas, e interface SPI.

Figura 33 - Kentec Display



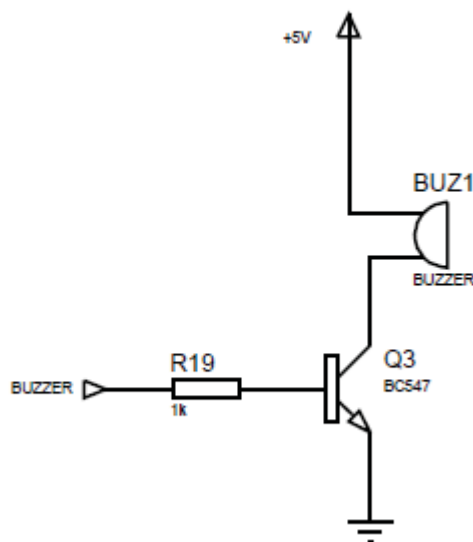
Fonte: <http://www.ti.com/tool/BOOSTXL-K350QVG-S1>

Esse *display* será responsável por realizar toda a comunicação entre o dispositivo e o usuário. Através dele, será possível determinar o tom de referência padrão desejado e ainda acompanhar todo o processo de afinação de forma interativa, e cancelá-lo assim que necessário. O sistema conta ainda com uma campainha que auxilia o instrumentista



informando-o quando o mesmo pode começar a tocar a corda escolhida para o dispositivo realizar a afinação, e também quando esta corda já foi afinada e pode-se se dar seguimento ou terminar o processo. O circuito relativo ao acionamento da campainha é mostrado na figura 34.

Figura 34 - Circuito de acionamento da campainha



Fonte: Próprio Autor

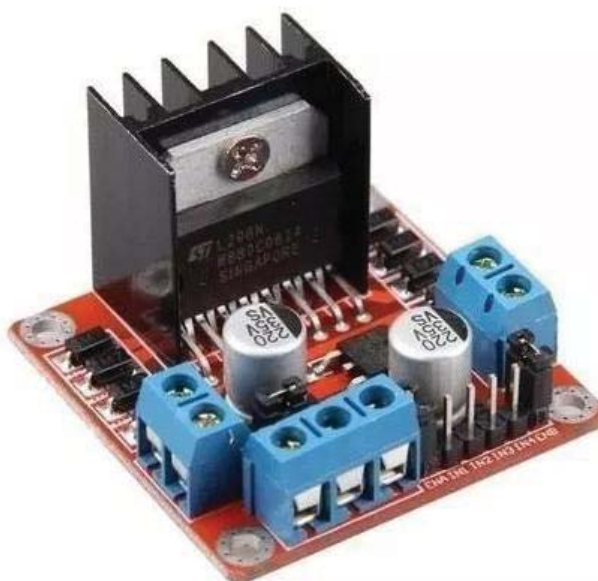
O cálculo do resistor R19 segue o mesmo conceito da equação 9, onde  $V_b$  é o potencial de nível lógico alto da saída do microcontrolador, de valor 3,3V. Não foi inserido qualquer resistor de coletor no circuito, pois a campainha trabalha em um potencial de 5V, tal qual a alimentação do sistema, e portanto, a inserção de um resistor causaria uma queda de tensão que prejudicaria o funcionamento adequado da mesma. Por isso, a corrente de coletor estará de acordo com aquela exigida pela campainha, em torno de 20mA.

#### 4.1.5 Acionamento do motor

Para que seja possível tracionar e soltar cada uma das cordas do contrabaixo acústico, é necessário que haja a inversão no sentido de rotação do motor CC, o que, como foi visto na seção 2.4.1, é possível invertendo a polaridade da fonte de alimentação CC nos terminais do motor. De forma a tornar isso possível, tendo como base o controle do microcontrolador, foi utilizado no projeto o *driver* para motor apresentado na figura 35.

Esse módulo utiliza o CI L298N, uma ponte H completa, e por isso possui dois canais, permitindo o controle de dois motores ao mesmo tempo. Além disso, pode operar numa faixa de tensão de 7V a 35V, enquanto sua tensão lógica é +5V, e tem uma capacidade de corrente máxima de 2A devido ao uso do dissipador, enquanto a corrente lógica se situa na faixa de 0 a 36mA. O módulo possui, ainda, um regulador de tensão interno para gerar a tensão lógica de +5V, de modo que se o usuário desejar, pode apenas alimentá-lo com a tensão de operação do motor.

Figura 35 - Ponte H completa de dois canais, cuja base é o CI L298N.



Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/driver-motor-ponte-h-l298n/>

#### 4.1.6 Motor CC

Como já foi abordado na seção 2.4.1, o motor utilizado no projeto é um motor CC com caixa de redução, exatamente como mostra a figura 17. Ele foi selecionado a partir de uma busca por máquinas como essa nas dependências da Universidade, e não havia sequer um dado sobre suas características ou sobre seu modelo. Por isso, de forma experimental, foi constatado, através de um tacômetro, que a rotação nominal do motor quando acoplada a ele a sua caixa de redução, é de 15,3 rpm.

Por sua vez, quando a sua caixa de redução é desacoplada, tem-se, na ponta do eixo, uma rotação de 1628 rpm, representando uma redução proporcionada por engrenagens de módulo um pouco maior que 1:100. Já quanto ao torque desse motor CC, sabe-se, também de forma experimental, que é maior que 0,5 N.m, visto que esse era o valor necessário para aumentar a tração da corda Mi, aquela que possui a menor frequência de trabalho.

#### 4.1.7 Fonte de alimentação

Tornar o sistema portátil é um dos principais objetivos do projeto. Por isso, a fonte de alimentação do sistema se dá por duas baterias de saída 5V/2.1A e capacidade nominal de 12Ah, conectadas em paralelo, para suprir a necessidade de corrente do sistema, principalmente quando o motor CC, que realiza o ajuste das tarraças do instrumento, é acionado. A figura 36 mostra uma das baterias, um *Power Bank* produzido pela empresa X-CELL®.

Figura 36 - Bateria utilizada para alimentar o sistema



Fonte: <http://www.flexgold.com.br/categoria-produto/baterias-auxiliares/>

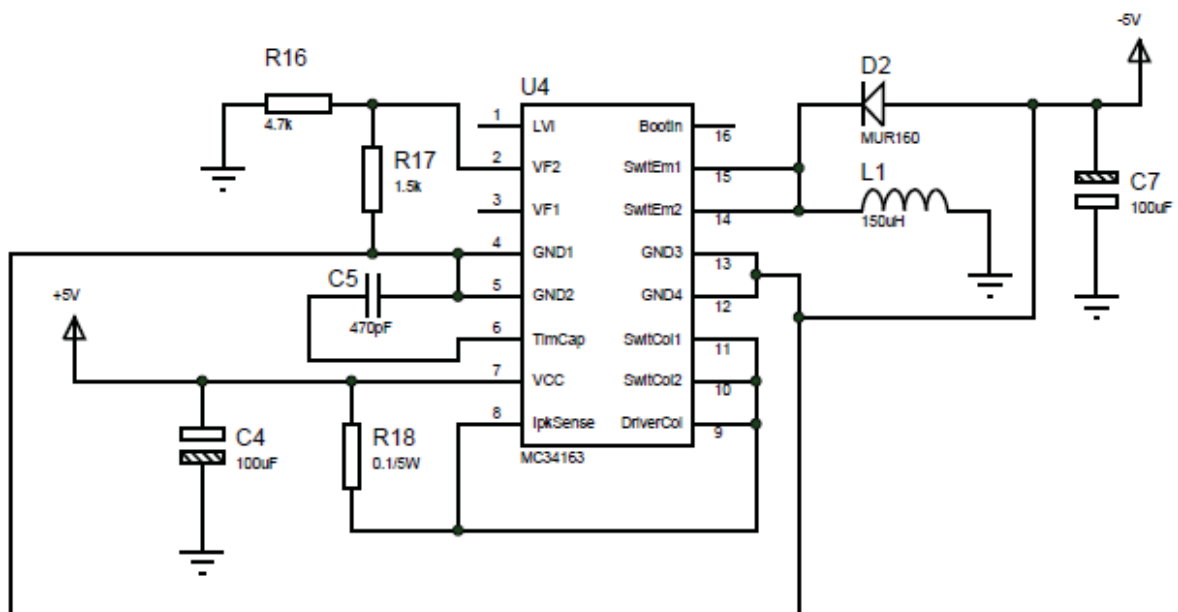
Outro fator determinante para a utilização dessa fonte de alimentação no projeto, é a praticidade em efetuar a recarga das baterias. Os *Power Banks* possuem entrada micro USB de 5V/1A, e portanto, podem ser recarregados utilizando-se de carregadores de celular comuns.

Contudo, o potencial +5V não é o único exigido pelo sistema. Os circuitos do bloco condicionador do sinal não apresentaram um bom funcionamento quando alimentados de forma unipolar e, por isso, criou-se a necessidade da obtenção de um potencial de -5V. A maneira mais simples e compacta de gerar essa tensão foi a utilização do CI MC34163, um conversor CC-CC fabricado pela *Motorola*®, que pode ser configurado para trabalhar como elevador, rebaixador e como inversor de tensão, tal como foi utilizado no projeto, tudo com a utilização do menor número de componentes externos possível. Ele possui uma corrente de

saída de até 3A, opera em uma faixa de tensão de entrada de 2,5V a 40V, em baixo consumo de corrente, e possui proteção contra o excesso de corrente e de temperatura. Além disso, ele é apropriado para o uso em sistemas microcontrolados.

O circuito deste CI pode ser visto na figura 37. Os componentes utilizados no projeto foram obtidos de um modelo de circuito na configuração inversor de tensão disponível nas folhas de dados do componente. Somente houve alteração nos valores de R16 e R17, responsáveis por controlar a tensão de saída, e mantê-la em -5V quando na entrada havia o potencial de +5V. Os capacitores C4 e C7, de entrada e saída, respectivamente, foram reduzidos dado que os potenciais do circuito final eram menores que os do circuito exemplo. O capacitor C4, responsável por programar a frequência de oscilação da saída chaveada do circuito foi mantido tal qual o modelo sugerido. Ainda, o resistor R18, responsável por limitar a corrente de saída do sistema foi reduzido ao máximo possível, evitando assim que a capacidade de corrente desse potencial fosse muito reduzida. E por fim, como o diodo D2 deve ter necessariamente um comportamento rápido, foi utilizado o componente MUR160.

Figura 37 - MC34163 na configuração de inversor de tensão



Fonte: Modificado de <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/motorola/MC33163P.pdf>

Da mesma forma, o motor CC utilizado no projeto deve ser alimentado em um potencial de +12V. Isso implica na utilização de um circuito elevador de tensão, com base no potencial da bateria, +5V. Contudo, esse é um caso bastante diferente do anterior, pois para realizar o acionamento de um motor é necessária uma capacidade de corrente adequada, e a utilização de um circuito como o anterior implicaria na substituição do indutor, por outro mais

robusto. Porém, como esse não era o foco do projeto, optou-se por utilizar o módulo visualizado na figura 38, um conversor CC-CC elevador de tensão, baseado no CI MT3608, que trabalha com tensões de entrada numa faixa de 2V a 24V e tensões de saída de 2,5V a 28V ajustáveis através de um *trimpot*. Ele ainda possui uma corrente de saída de até 2A, eficiência na conversão de até 96% e frequência de comutação igual a 150 kHz. O CI MT3608 é utilizado justamente em aplicações alimentadas por baterias.

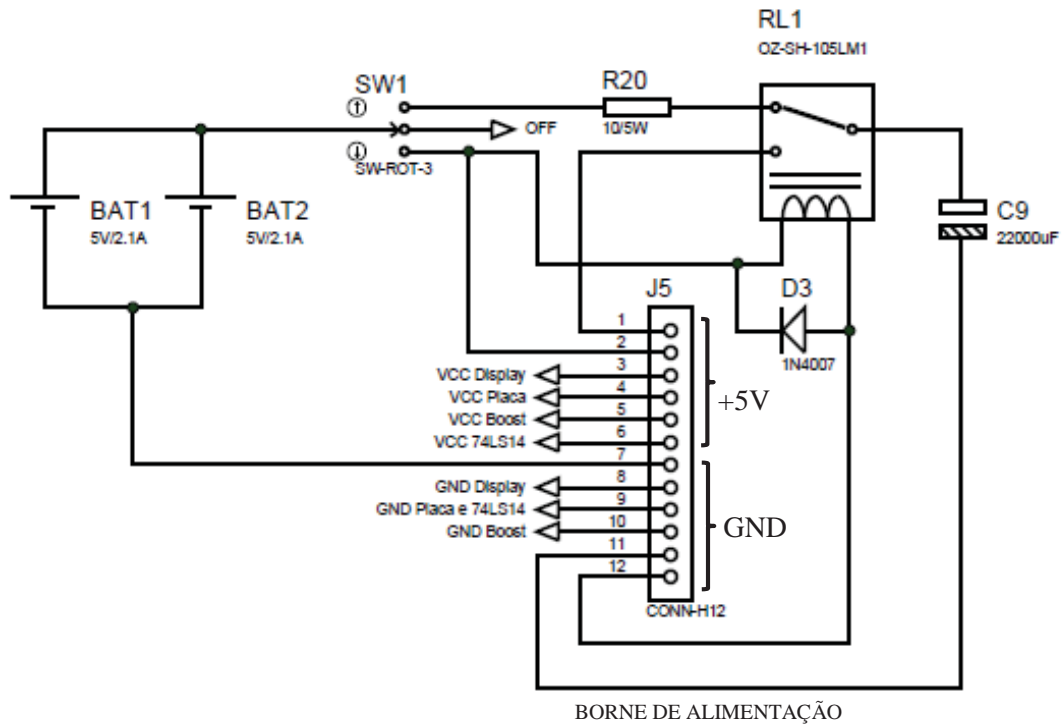
Figura 38 - Módulo de um conversor CC-CC elevador de tensão



Fonte: <https://www.usinainfo.com.br/reguladores-de-tensao/regulador-de-tensao-ajustavel-mt3608-auto-boost-step-up-para-mais-25v-a-28v-4489.html>

Da maneira como o sistema estava montado, a princípio, funcionava adequadamente. Contudo, quando o motor CC era acionado para fazer o ajuste da afinação, a grande variação de corrente em um curto período de tempo, fazia como que as baterias entrassem em proteção, desligando-se ou ainda, chegando a atingir potenciais de aproximadamente 3,2V, o que não é suficiente para alimentar o microcontrolador, e portanto, o sistema era reiniciado. Uma solução encontrada foi a inserção de um capacitor de 22000 $\mu$ F em paralelo com as baterias, pois este, após estar carregado, poderia providenciar a energia necessária a esse momento transitório do motor, fazendo com que as baterias nem mesmo percebessem o surto. Apesar disso, com a resolução do inconveniente, outro surgiu: na inicialização do sistema, o fato de o capacitor buscar se carregar rapidamente fazia com que, novamente as baterias entrassem em proteção e se desligassem. Por isso, a solução para a questão foi a inserção do circuito apresentado na figura 39.

Figura 39 - Circuito utilizado para energizar o sistema de maneira adequada



Fonte: Próprio Autor

A ideia básica da energização do sistema é que, em um primeiro breve momento, quando o contato da chave SW1 for posicionado para cima, a energia das baterias será conduzida apenas ao capacitor C9, através do resistor R20, que possui a função de limitar a corrente de carga do capacitor, fazendo com que este demore a se carregar totalmente, de acordo com o tempo, em segundos, estabelecido pela equação 16.

$$\tau = 5RC \quad (16)$$

$$\tau = 5 \cdot 10 \cdot 22000\mu$$

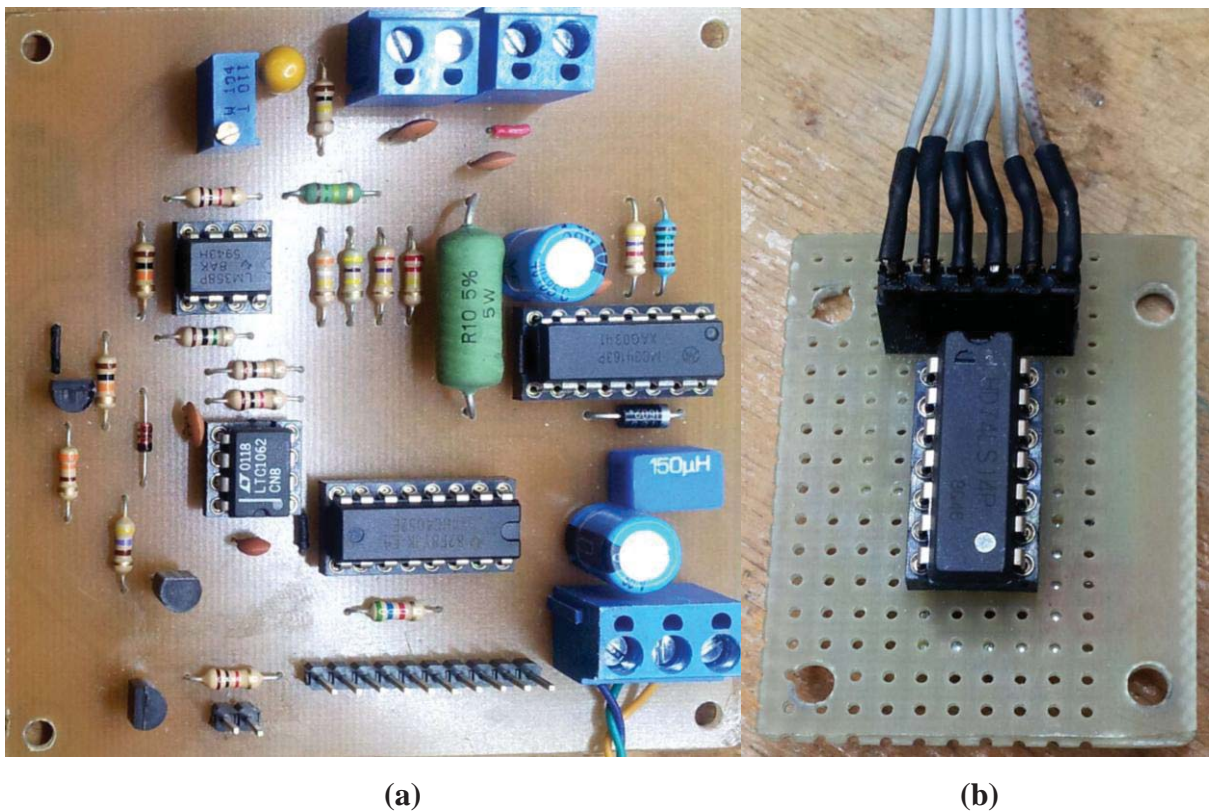
$$\tau = 1,1s$$

Após esse breve instante a chave é posicionada para baixo, e agora, a energia das baterias será entregue ao borne de alimentação do sistema, garantindo a energização de todos os módulos, da placa e também do *display* do dispositivo. Ainda, fará a energização da bobina relé RL1, fazendo com que, o capacitor já carregado também seja conectado ao borne de alimentação. O diodo D3 funciona como diodo de “roda livre” para essa bobina, evitando que variações bruscas de corrente a danifiquem. Assim, o sistema seguirá funcionando sem apresentar nenhuma falta.



O esquemático de todos os circuitos de hardware será ilustrado de forma conjunta no Apêndice A, para tornar ainda mais claro o desenvolvimento do projeto. A partir deles, é que foi confeccionada uma placa de circuito impresso, que funciona satisfatoriamente, e é composta por todos os circuitos de condicionamento do sinal, e também pelo conversor CC-CC que realiza a inversão do potencial de +5V. Esta pode ser visualizada na figura 40 (a), em sua face superior.

Figura 40 - Face superior da placa do projeto e módulo do CI 74LS14



Fonte: Próprio Autor

Apenas o CI 74LS14 não pode ser inserido na placa apresentada na figura 40 (a). Ele passou a fazer parte do sistema depois que a placa já havia sido roteada, no intuito de resolver o problema apresentado na seção 4.1.2. Por isso, foi construído um pequeno módulo composto essencialmente para esse CI, com pinos de acesso à sua alimentação e às entradas e saídas, como mostra a figura 40 (b).

Por fim, as imagens do protótipo finalizado serão apresentadas no Apêndice B.

## 4.2 FIRMWARE

O microcontrolador é o dispositivo que controla todo o sistema, e por isso, o fluxograma da figura 41 representa o *firmware* construído para este projeto, que é descrito na sequência.

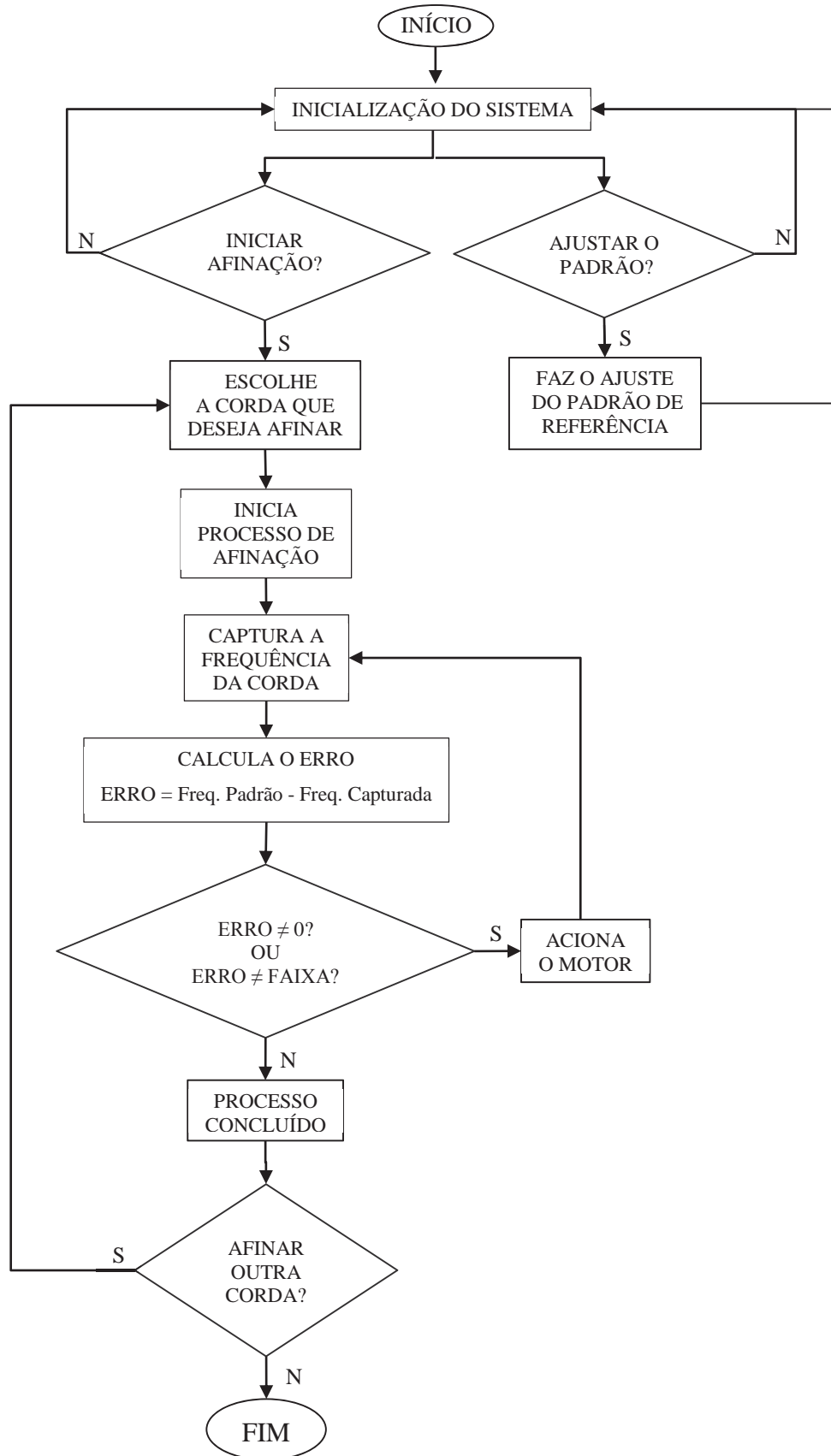
Após toda a estrutura mecânica e o sensor piezoelétrico serem devidamente posicionados no instrumento, o contrabaixista inicia o sistema que lhe apresenta, na tela inicial do *display touch screen* duas opções: ajustar o padrão de afinação conforme a sua preferência ou ainda, iniciar a afinação do instrumento. Se a primeira opção for escolhida, ele terá a oportunidade de excursionar numa faixa de valores padrão de afinação que vai de 435 Hz a 445 Hz, e está gravada na memória EEPROM, de forma que o valor escolhido será a base para a definição da frequência de cada uma das cordas do instrumento. Caso o instrumentista não faça alterações no tom de referência, por padrão este será 440 Hz.

Já se o contrabaixista optar pela segunda opção, ele poderá escolher a corda que deseja afinar primeiro, seguindo ou não a ordem mais apropriada para realizar a afinação. Em seguida, ele dará início ao processo, apertando o botão iniciar na tela do *display*, e passando a tocar a corda, fazendo com que o sistema envie um sinal de *clock* obtido através do módulo PWM de frequência adequada ao CI LTC1062, e os *bits* de controle da chave do multiplexador para determinar a frequência de corte do filtro; ajuste determinados parâmetros como o erro tolerável da afinação, o número de amostras coletadas, a faixa de frequência que irá capturar, e em seguida passe a capturar a frequência da corda escolhida, iniciando o módulo de captura do microcontrolador, que obtém o período do sinal, e então através de cálculos, é possível determinar a sua frequência. Nesse momento não é mais possível trocar a corda que se deseja afinar sem cancelar o processo.

O instrumentista continua tocando a corda, e após o sistema realizar algumas médias das frequências amostradas, ele definirá em que frequência esta corda está vibrando. Haverá, em seguida, a comparação da frequência obtida com a frequência padrão da nota que o usuário determinou, e um cálculo de erro. Se o erro detectado for positivo, significa que a frequência da corda está mais baixa que o padrão, e então é necessário habilitar a saída para acionar o motor no sentido anti-horário, baseado em uma espécie de controle proporcional, no qual o valor do erro é multiplicado por uma constante que definirá por quanto tempo o motor irá atuar. Essa constante de tempo é carregada em um *timer*, de forma que o motor estará acionado somente durante o tempo determinado por essa constante.



Figura 41 - Fluxograma de firmware do projeto



Caso o erro seja negativo, significa que a frequência da corda está mais alta que o padrão e o mesmo procedimento acontece, mas no sentido horário, e enquanto a corda não for afinada, o processo se repete: é iniciada a captura, determinada a frequência da corda, o erro em relação a frequência padrão, e realizado o acionamento do motor. Somente quando o erro for zero, ou estiver dentro de uma faixa de frequência aceitável pelo dispositivo, é determinado que a corda está afinada, e então resta ao instrumentista afinar a corda seguinte ou então terminar o processo, retornando a estrutura inicial.

Todo o *firmware* foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o compilador IAR *Embedded Workbench* ®. A estrutura de programação utilizada teve como base as funções e bibliotecas disponibilizadas gratuitamente pela *Texas Instruments* ®.

### 4.3 ACOPLAMENTO MECÂNICO

O acoplamento mecânico entre o eixo do motor CC e a tarraxa de cada uma das cordas do instrumento será realizado através da estrutura mecânica que pode ser vista na figura 42.

Figura 42 - Estrutura mecânica utilizada no projeto



Fonte: Próprio Autor

A parte da estrutura apresentada em (1) será acoplada à voluta do contrabaixo acústico, e por ser construída em ferro, o seu próprio formato fará com que a mesma permaneça firmemente posicionada no instrumento enquanto todo o processo é realizado. Essa parte da estrutura foi toda encapada com fita, para facilitar o encaixe e o desencaixe do equipamento e principalmente para não danificar o instrumento.

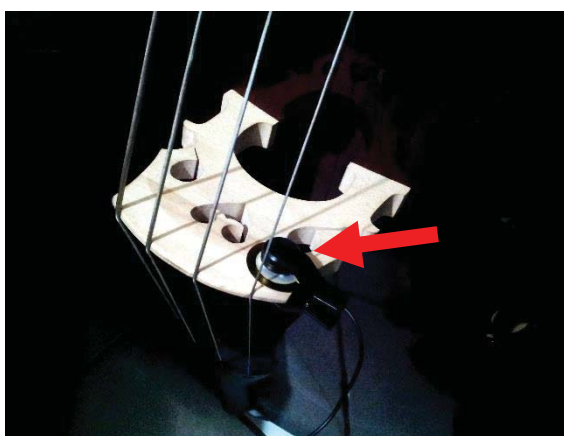
Já a parte mostrada em (2), é o local onde o motor CC é fixado de forma que seu eixo seja facilmente acoplado as tarraxas do contrabaixo. Mas para que ele possa ficar bem próximo a elas, e após ser posicionado, permanecer firme, garantindo que todo o torque disponibilizado seja aplicado a carga, com a menor perda possível, é necessário que a estrutura apresentada em (3), uma série de placas de ferro com grande mobilidade, sejam posicionadas da melhor maneira e perfeitamente presas umas às outras através da pressão exercida pelas porcas borboletas ali inseridas.

Assim, pelo fato de haver apenas um motor realizando a afinação, a estrutura mecânica necessita ser reposicionada toda vez que uma das cordas for afinada.

#### 4.4 FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO

Para afinar seu instrumento utilizando o dispositivo proposto pelo projeto, o contrabaixista deverá, primeiramente, posicionar o sensor piezoelétrico preso em um clip, no cavalete do contrabaixo acústico, como mostra a figura 43.

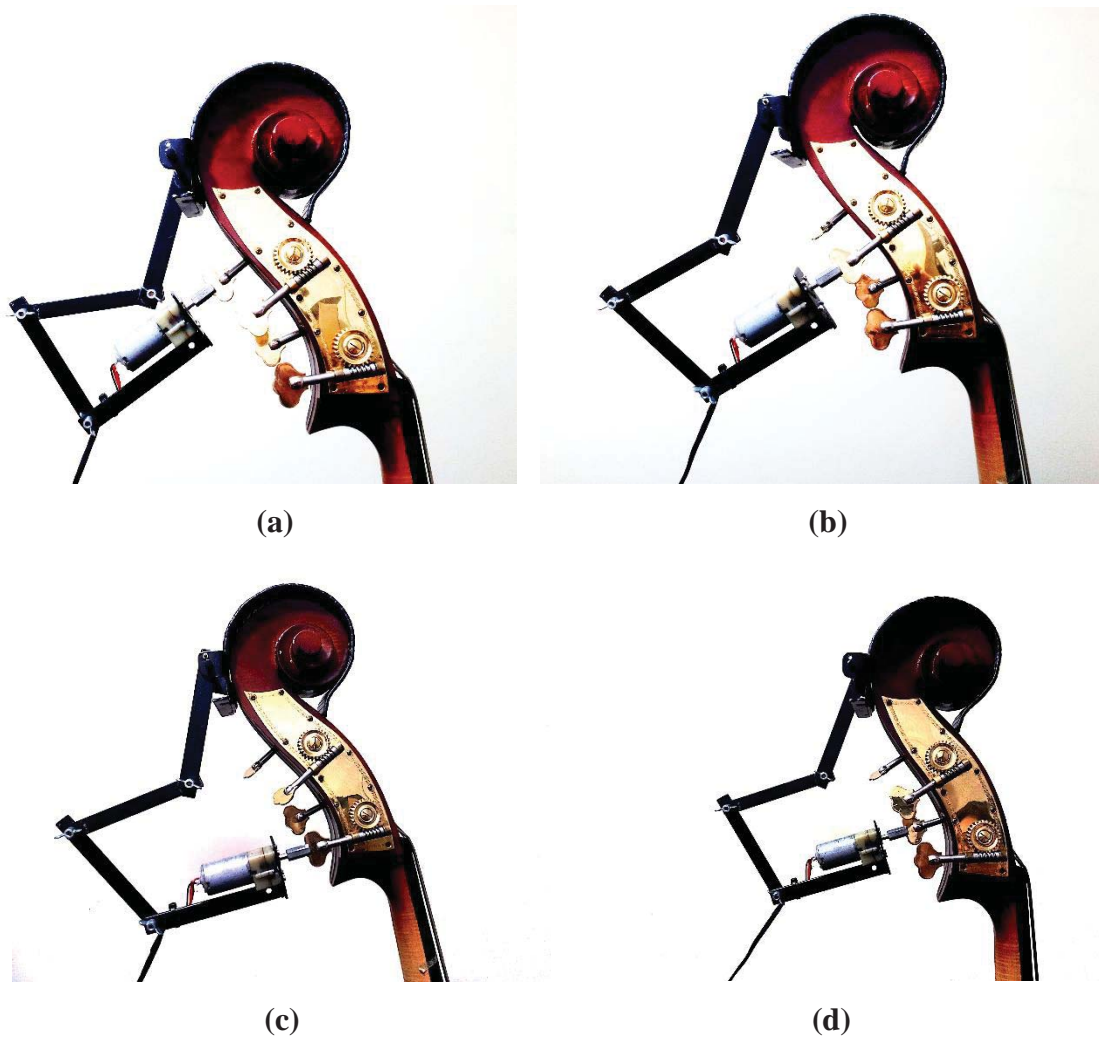
Figura 43 - Sensor piezoelétrico inserido no cavalete do contrabaixo acústico



Fonte: Próprio Autor

Em seguida, é necessário inserir a estrutura mecânica na voluta do instrumento, e acoplar o motor diretamente na tarraxa da corda que se deseja afinar. A figura 44, mostra como o instrumentista deve posicionar a estrutura mecânica nas cordas Ré (a), Lá (b), Mi (c) e Sol (d), antes de iniciar a afinação.

Figura 44 - Estrutura mecânica posicionada nas quatro tarraxas do instrumento



Fonte: Próprio Autor

Para ligar o dispositivo, é necessário pressionar a chave para a baixo (posição OFF), aguardar aproximadamente 1s, e então mover a chave para cima (posição ON). Nesse momento, o *display* acenderá e a tela inicial do sistema aparecerá, como mostra a figura 45. Em (1), observa-se o botão que deve ser pressionado quando o usuário deseja afinar o instrumento. O outro botão disponível (2), deve ser pressionado quando o instrumentista deseja realizar modificações no padrão de afinação do instrumento.

Figura 45- Tela inicial do dispositivo

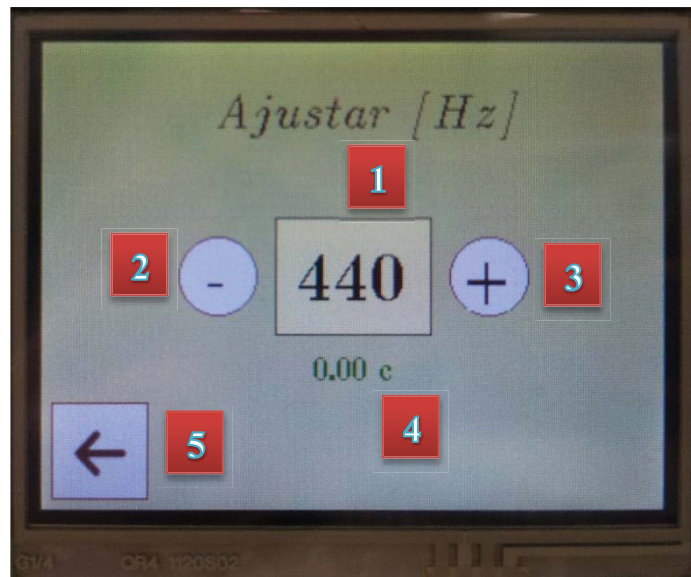


Fonte: Próprio Autor

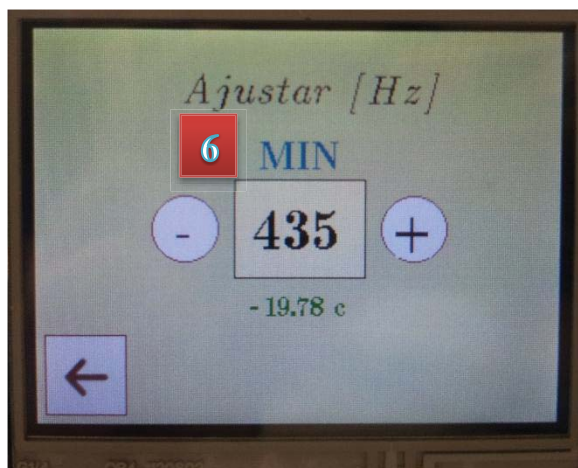
Caso opte por ajustar o padrão de afinação, por exemplo, em (2), o contrabaixista visualizará outra tela, como a presente na figura 46 (a). Em (1), observa-se o valor do padrão de afinação definido pelo usuário, que pode excursionar de 435 Hz a 445 Hz. Já em (2) e (3) é possível observar, respectivamente, os botões de decréscimo e acréscimo do padrão, ou seja que vão diminuindo ou aumentando o valor padrão de afinação em 1 Hz. Se o instrumentista estiver nos limites de excursão deste padrão, o dispositivo irá avisá-lo, como mostram em (6) as figuras (b) e (c). Em (4), por sua vez, é possível observar o número de centos, o menor intervalo de afinação no qual a mudança no tom de referência implica em cada nota musical. Por fim, em (5), encontra-se o botão que torna possível o retorno para a tela inicial.



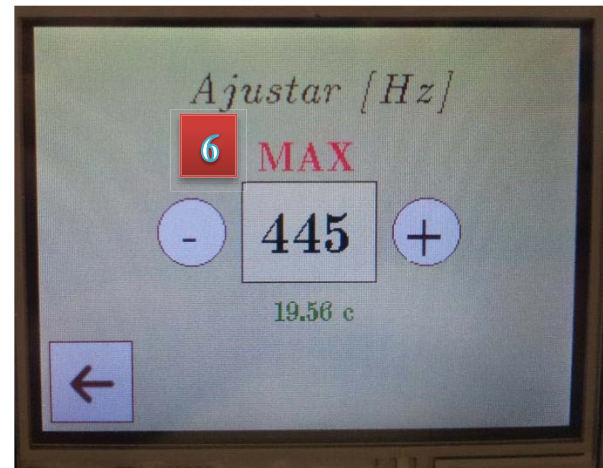
Figura 46 - Tela do ajuste do padrão de afinação do dispositivo



(a)



(b)



(c)

Fonte: Próprio Autor

Voltando a tela inicial, na figura 45, se o contrabaixista desejar afinar seu instrumento em (1), ele visualizará outra tela, como mostra a figura 47 (a). Nesta, os botões (1) e (2) são responsáveis por possibilitar ao instrumentista escolher a corda que deseja afinar, movendo-se para um lado ou para o outro, de forma que a corda selecionada por ele ficará destacada em laranja, tal como se encontra, nas imagens, a corda Sol (G). A medida que selecionou a corda, ele já pode dar início ao processo de afinação, pressionando o botão iniciar em (3) e ao fazer isso, ouvirá um *beep* que informa ao usuário que ele já pode começar a tocar. Sendo iniciado o processo, não há a possibilidade de se escolher outra corda para afinar, como mostram as figuras (c) e (d), restando ao usuário apenas cancelar o processo, no botão (6), caso tenha se

enganado. Isso pode prevenir, que, por algum descuido, ocorram erros no sistema e prejuízos ao instrumento.

Figura 47 - Tela do processo de afinação do dispositivo



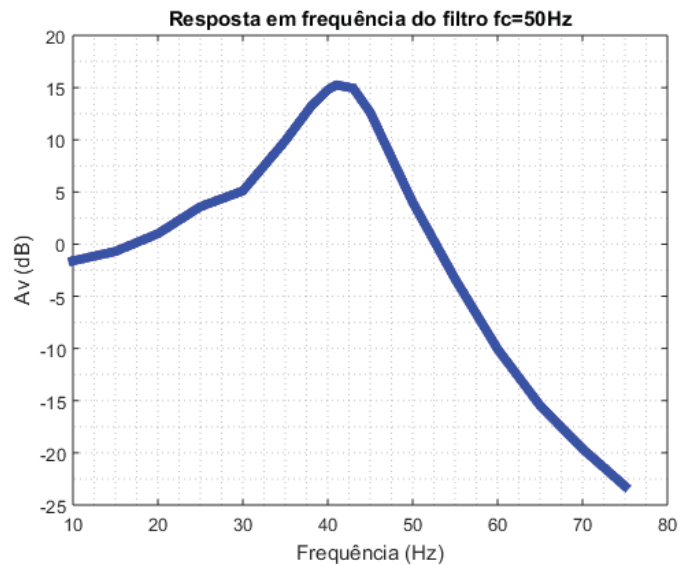
Fonte: Próprio Autor

Pode-se ver em (4), que em verde é apresentada a frequência padrão de cada corda selecionada pelo usuário, e em vermelho (5), após o processo de afinação iniciar, tem-se a frequência amostrada pelo sistema. A tela irá interagir com o contrabaixista, informando a frequência amostrada do sinal e se a corda está baixa, alta ou afinada em relação a sua referência, fazendo a variação de cores do círculo central, acima do botão cancelar. Caso a corda esteja desafinada e baixa em relação ao padrão, haverá a tela apresentada em (c). Ainda, se a corda estiver desafinada, mas alta, a tela apresentada será (d). E ainda, se uma tela como a da figura (b) for apresentada, juntamente a outro *beep*, significa que a corda foi afinada, e o instrumentista pode escolher outra corda, da mesma maneira descrita anteriormente, ou ainda terminar o processo clicando no botão cancelar (6) e desligando a chave do sistema.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

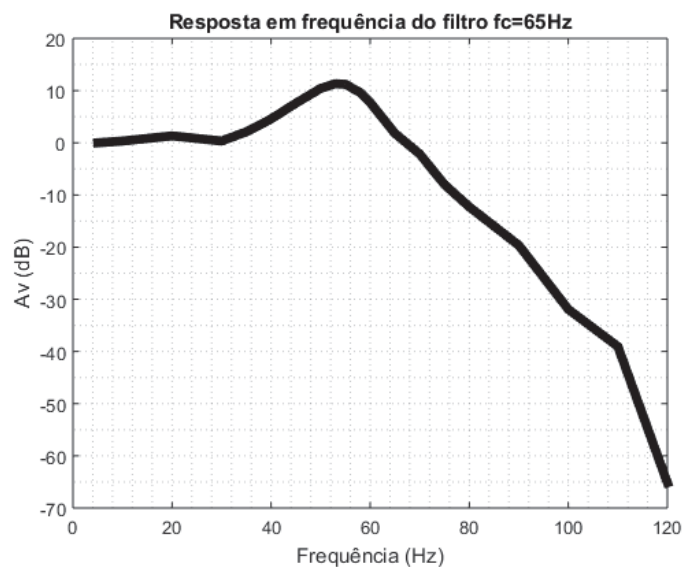
Para validar a importância da utilização do bloco de filtro no sistema, foram obtidas, experimentalmente, as curvas de resposta em frequência em relação a cada uma das quatro frequências de corte ajustadas no CI LTC1062. O resultado, pode ser visualizado nas figuras 48, 49, 50, e 51, que mostram a resposta do filtro, respectivamente, para as cordas Mi, Lá, Ré e Sol.

Figura 48- Resposta em frequência para o filtro da corda Mi



Fonte: Próprio Autor

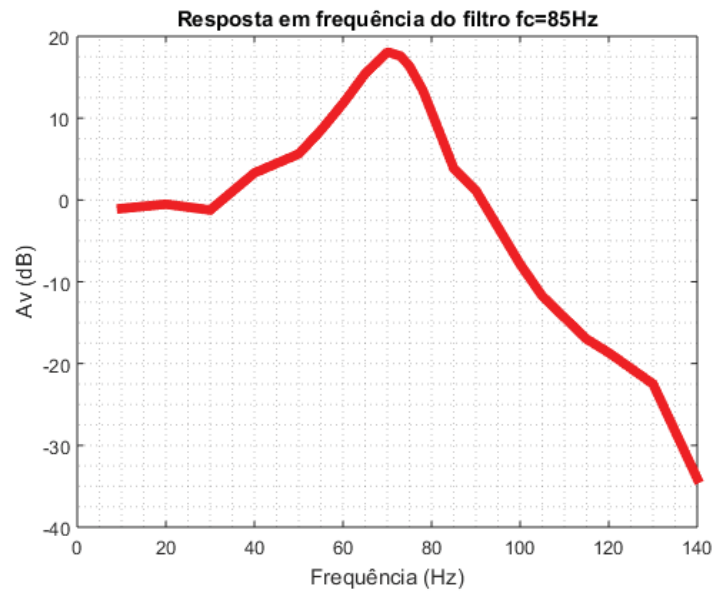
Figura 49- Resposta em frequência para o filtro da corda Lá



Fonte: Próprio Autor

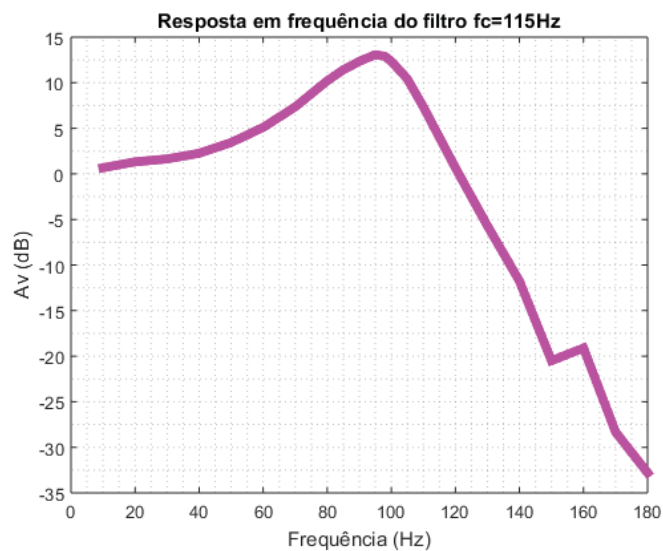


Figura 50- Resposta em frequência para o filtro da corda Ré



Fonte: Próprio Autor

Figura 51- Resposta em frequência para o filtro da corda Sol



Fonte: Próprio Autor

Como foi relatado na seção 4.1.2, as frequências de corte dos filtros, 50 Hz, 65 Hz, 85 Hz, e 115 Hz, são superiores as frequências fundamentais padrão de cada corda, 41,2 Hz, 55 Hz, 73,4 Hz, e 98 Hz. Avançar o ponto de corte do filtro, foi um ajuste realizado no projeto, pois da maneira como o circuito se comportava anteriormente, justamente as frequências de interesse estavam sendo atenuadas.

E o resultado foi muito satisfatório. Pode-se definir, através das últimas quatro imagens apresentadas, que o maior valor de ganho do filtro da corda Mi, acontece em torno da

frequência de 41 Hz. Da mesma maneira, nas cordas Lá, Ré, e Sol o resultado é muito próximo a frequência fundamental da corda, sendo respectivamente em torno de 54 Hz, 70 Hz, e 95 Hz.

Assim, com a obtenção desse resultado e a partir dos testes realizados, é possível dizer que o dispositivo funciona muito bem, dentro daquilo que se dispõe a fazer. O sensor piezoelétrico utilizado possui uma resposta muito satisfatória, inclusive nas menores frequências de atuação do sistema, e não se mostra sujeito a interferências externas. Os circuitos de condicionamento do sinal, tais como, o pré amplificador, o filtro, comparador e mesmo o inversor de tensão, utilizado justamente para realizar alimentação de todos esses componentes foram bem projetados, e funcionam muito bem, proporcionando ao microcontrolador uma captura de frequência precisa, sem a utilização de um *firmware* tão elaborado.

Por isso, o dispositivo consegue realizar a captura da frequência das cordas de maneira rápida, enquanto o instrumentista as toca com o arco e inclusive quando as belisca com os dedos. Sabendo que essa última técnica é muito mais utilizada pelos contrabaixistas, esse se mostrou um resultado favorável.

O microcontrolador utilizado atendeu muito bem as especificações do projeto, pois possui uma série de módulos que facilitam muito a construção do *firmware*, e inclusive um número de pinos de I/O mais do que suficientes para atender as necessidades desse projeto. A interface com o usuário utilizada, o *display touch screen*, só veio agregar ao dispositivo, pois tornou o processo de afinação muito mais interativo com o usuário, e proporcionou o desenvolvimento de um *firmware* muito mais elaborado, robusto e eficiente, que não causa atrasos no processo de afinação. Inclusive, a disponibilidade de alteração do tom de referência padrão dentro de uma faixa de 10 Hz, é um diferencial e muito mais do que o instrumentista costuma utilizar, o que torna o dispositivo ainda mais interessante.

A inserção de uma campainha no sistema, que auxilia o contrabaixista a determinar quando o processo inicia e quando termina, com a afinação da corda, de forma tão simples, possibilitou uma interação ainda melhor entre o sistema e o usuário, que não precisa necessariamente ficar observando o *display* enquanto vai tocando a corda.

Os módulos utilizados no projeto para realizar o acionamento, e a alimentação do motor CC que realiza a afinação das cordas, certamente foram muito eficientes, pois seu custo acessível e ótimo desempenho, fizeram com que o tempo disponível para a realização do projeto pudesse ser focado nas partes principais ou no diferencial do sistema.

O próprio motor CC, encontrado no almoxarifado da instituição, que se mostrou a última alternativa para o desenvolvimento do dispositivo, funcionou extremamente bem, e dentro de sua condição nominal, pois possui as duas características essenciais para o desenvolvimento de um projeto como esse: torque suficiente para mover as tarraxas e uma rotação bastante baixa, que facilitam o controle do dispositivo, o que é importante, inclusive, para que não haja danos ao contrabaixo acústico.

Em relação a atuação do dispositivo nas tarraxas do instrumento, pode-se dizer que é muito eficiente, pois a correção da afinação das cordas é realizada a partir de um controle muito simples, sem realimentação e sem um ajuste fino quando a frequência das cordas está muito próxima da frequência padrão. Mesmo assim, o dispositivo consegue realizar o processo de forma rápida dentro de uma condição de erro aceitável de  $\pm 0,3$  Hz.

Além disso, foi constatado que em sua maior carga, quando o motor realiza a afinação da corda Mi, de frequência mais grave, o consumo do sistema fica em torno de 2,2A, e normalmente, ou seja, sem acionar o motor o dispositivo consome em torno de 0,28A. Os componentes utilizados no projeto atuam dentro dessa faixa de consumo, em suas características nominais, o que garante o seu perfeito funcionamento.

A estrutura mecânica do projeto, sem sombra de dúvida, se mostrou muito eficaz, pois garantiu que o motor CC permanecesse firme e entregasse toda, ou a maior parte de sua potência para o sistema. Tendo o conhecimento de que essa estrutura não foi projetada cuidadosamente para atender as demandas do dispositivo, e sim construída de maneira a tornar a realização do projeto possível, pode-se dizer que ela superou todas as expectativas sobre sua atuação.

Já em relação a fonte de alimentação do sistema, é possível dizer que ela não funciona da maneira mais adequada. Trabalhar com um circuito que envolve cargas como motores elétricos, que precisam de torque para realizar sua função e conseqüentemente de uma grande capacidade de corrente disponível, alimentado por baterias como os *power banks* que são produzidos para um fim completamente diferente, e que por isso trabalham com circuitos de proteção, certamente não é a melhor combinação. Mas apesar dos inconvenientes, o sistema funciona bem em conjunto.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o término do projeto, é possível verificar que o mesmo cumpriu com o objetivo proposto, embora tenha sido desenvolvido de maneira diferente da ideia inicial. Através dos testes realizados comprovou-se que a captação da frequência das cordas do contrabaixo é feita com qualidade, e que apesar do controle de atuação do motor ser bastante simples e sem realimentação, a correção da frequência de cada uma das cordas se dá de maneira rápida, dentro de uma faixa de erro aceitável, onde o circuito trabalha dentro de uma condição de consumo de corrente nas suas características nominais, ou seja, utilizando os componentes de maneira adequada.

Houveram sim várias mudanças na construção do projeto. Primeiramente, a dificuldade em encontrar um motor que pudesse girar a tarraxa dentro de uma condição de torque considerável, que tivesse um baixo consumo, baixo peso e ainda que fosse de fácil controle de rotação, passou por modelos de motores tais como o motor de passo e o servo motor, sempre sem sucesso, em alguns dos objetivos, até que se chegou ao motor CC com caixa de redução. A dificuldade em fazer com que um deles funcionasse de maneira adequada seria multiplicada por quatro em termos de peso, e principalmente de custo, o que definiu a primeira mudança em relação a proposta inicial. Seria utilizado apenas um motor para afinar todas as cordas.

A alimentação do sistema foi outro fator de grande influência na mudança das definições do projeto. O objetivo era tornar o equipamento portátil e para que isso fosse garantido foi necessária a utilização de duas baterias em paralelo, e uma série de circuitos externos para fazer com que as mesmas pudessem alimentar todos os dispositivos do projeto sem falhas ou quedas bruscas de tensão. Ou seja, a portabilidade do sistema devido a utilização desse tipo de bateria tornou-o mais robusto e pesado, proporcionando a segunda principal mudança no projeto: o sistema não ficaria mais preso a estrutura mecânica que encaixa na voluta do instrumento, e sim numa estrutura separada que pode ser apoiada em uma mesa ou qualquer lugar próximo ao instrumentista para ser manipulada.

Por fim a própria estrutura mecânica, nas condições em que foi projetada, se mostrou muito eficiente em termos de funcionalidade do projeto, contudo para uma aplicação prática do dispositivo, torna-se pesada para o instrumento e trabalhosa para o instrumentista, que precisa ao afinar cada corda fazer os ajustes na estrutura novamente.

Portanto, pode-se concluir que se o sistema é muito eficiente da maneira como funciona atualmente, e havendo melhorias em relação aos motores, a fonte de alimentação e a estrutura mecânica de acoplamento, o dispositivo teria sim condições de aplicabilidade comercial.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Isaac Pereira de. **Estudos iniciais do contrabaixista acústico: comparativo dos métodos Billè, Simandl e Rollez.** 2015. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Música)– Departamento de Música, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- ARAKAWA, Hidetoshi. **Estudo científico de escalas e temperamentos com cento e comas.** Disponível em: < <http://docplayer.com.br/39500657-Estudo-cientifico-de-escalas-e-temperamentos-com-cento-e-comas.html>>. Acesso em: 16 mai. 2017, 08:28:10.
- BISCUOLA, Gualter José; MAIALI, André Cury. **Física Volume Único: mecânica, termologia, ondulatória, óptica e eletricidade.** 1. ed. São Paulo: Saraiva, 1996.
- CARVALHO, Geraldo. **Máquinas Elétricas Teoria e Ensaio.** São Paulo: Érica, 2008.
- CATELLI, Francisco; MUSSATO, Gabriel Abreu. As frequências naturais de uma corda de instrumento musical a partir de seus parâmetros geométricos e físicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 2, jan./jun. 2014.
- CAVANAGH, Lynn. **A brief history of the establishment of international standard pitch a=440 hertz.** Disponível em: < [http://www.wam.hr/sadrzaj/us/Cavanagh\\_440Hz.pdf](http://www.wam.hr/sadrzaj/us/Cavanagh_440Hz.pdf)>. Acesso em: 17 mai. 2017, 04:02:25.
- CUNHA, Leonardo Oliveira da. **A captação do som do violino: aspectos acústicos e estéticos.** 2006. 69 f. Artigo (Mestrado em Performance Musical)–Escola de Música, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- DEL TORO, Vicent. **Fundamentos de máquinas elétricas.** Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.
- DUPONT, Ana Margarida da Silva et al. **A engenharia e a música: instrumentos de cordas.** 2014. 21 f. Projeto FEUP (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica)–Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2014.
- HEWITT, Paul G. **Física Conceitual.** 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- HOFFER, Charles. **Music Listening Today.** 3. ed. Flórida: Cengage Advantage Books, 2009.
- LANNES, Daniel P. **Transdutor para medição de deformações dinâmicas em tubos.** 2009. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.
- LAZZARINI, Victor E.P. **Elementos de Acústica.** 1998. Disponível em: <[http://hugoribeiro.com.br/biblioteca-digital/Lazzarini-Elementos\\_Acustica.pdf](http://hugoribeiro.com.br/biblioteca-digital/Lazzarini-Elementos_Acustica.pdf)>. Acesso em: 13 mai. 2017, 08:41:30.

LIMA, Washington Batista de. **Transdutores de deformação a base de sensores piezoelétricos**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LONG, Ashley John Long. **An Introduction to the Double Bass**. Disponível em: <[http://www.themoderndoublebass.org.uk/uploads/5/0/7/3/50731485/the\\_modern\\_double\\_bass\\_composer\\_pack\\_2016.pdf](http://www.themoderndoublebass.org.uk/uploads/5/0/7/3/50731485/the_modern_double_bass_composer_pack_2016.pdf)>. Acesso em: 15 mai. 2017, 23:16:15.

LOSCHI, Robson F.; FORTES, Reinaldo S. **Afinador Eletrônico**. Disponível em: <<http://www.unipac.br/site/bb/tcc/tcc-1c2f77d281853937824f108f3b1b31fb.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2017, 12:58:35.

OLIVEIRA, Naylor. A física da música. **Revista Eletrônica de Ciências**, São Carlos, n. 25, abr. 2004.

PATSKO, Luís Fernando. **Tutorial aplicações, funcionamento e utilização de sensores**. Maxwell Bohr Instrumentação Eletrônica, 2006. Disponível em: <[http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)>. Acesso em: 20 mai. 2017, 19:10:45.

PERTENCE JR, Antonio. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. 8. ed. Porto alegre: Bookman, 2015.

ROSSING, Thomas D. **The Science of String Instruments**. Nova Iorque: Springer, 2010.

SLATFORD, Rodney. **History of the Double Bass**. Macmillan Publishers Limited, 1980. Disponível em: <<http://earlybass.com/articles-bibliographies/history-of-the-double-bass/>>. Acesso em: 07 mai. 2017, 10:40:25.

SOBREIRA, Sílvia. Afinação e desafinação: parâmetros para a avaliação vocal. **Augustus**, Rio de Janeiro, v. 07, n. 14, p. 58-72, jan./jun. 2002.

SPADA, Adriano Luiz. **O ouvido humano**. Attack do Brasil. Disponível em: <<http://www.attack.com.br/web/index.php/suporte/artigos-tecnicos>>. Acesso em: 14 mar. 2017, 23:08:52.

ULLOA, Mario. O que é isto, audição musical? **REPERTÓRIO: Teatro & Dança**, Salvador, n. 11, p. 53-60, ano 11. 2008.

VALLE, Sólton do. **Manual Prático de Acústica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2009.

ZEVIN, Michael. **Resonance and Harmonic Analysis of Double Bass and Bass Guitar**. Physics of Music Final Project, 2012. Disponível em: <[https://courses.physics.illinois.edu/phys406/student\\_projects/spring12/michael\\_zevin\\_p406\\_project\\_report\\_sp12.pdf](https://courses.physics.illinois.edu/phys406/student_projects/spring12/michael_zevin_p406_project_report_sp12.pdf)>. Acesso em: 08 mai. 2017, 11:40:05.

## APÊNDICE A - HARDWARE COMPLETO

Neste apêndice, serão apresentados todos os circuitos de *hardware* do projeto. Na figura A-1, é possível observar os circuitos do conversor CC, do microcontrolador e o circuito acionador, responsável por energizar o sistema. Já na figura A-2, estão presentes os circuitos do bloco condicionador do sinal, tais como o do pré-amplificador, do filtro, e do comparador com histerese, e por fim também o circuito de acionamento da campainha do sistema.

Figura A-1 - Blocos do circuito de *hardware* do projeto

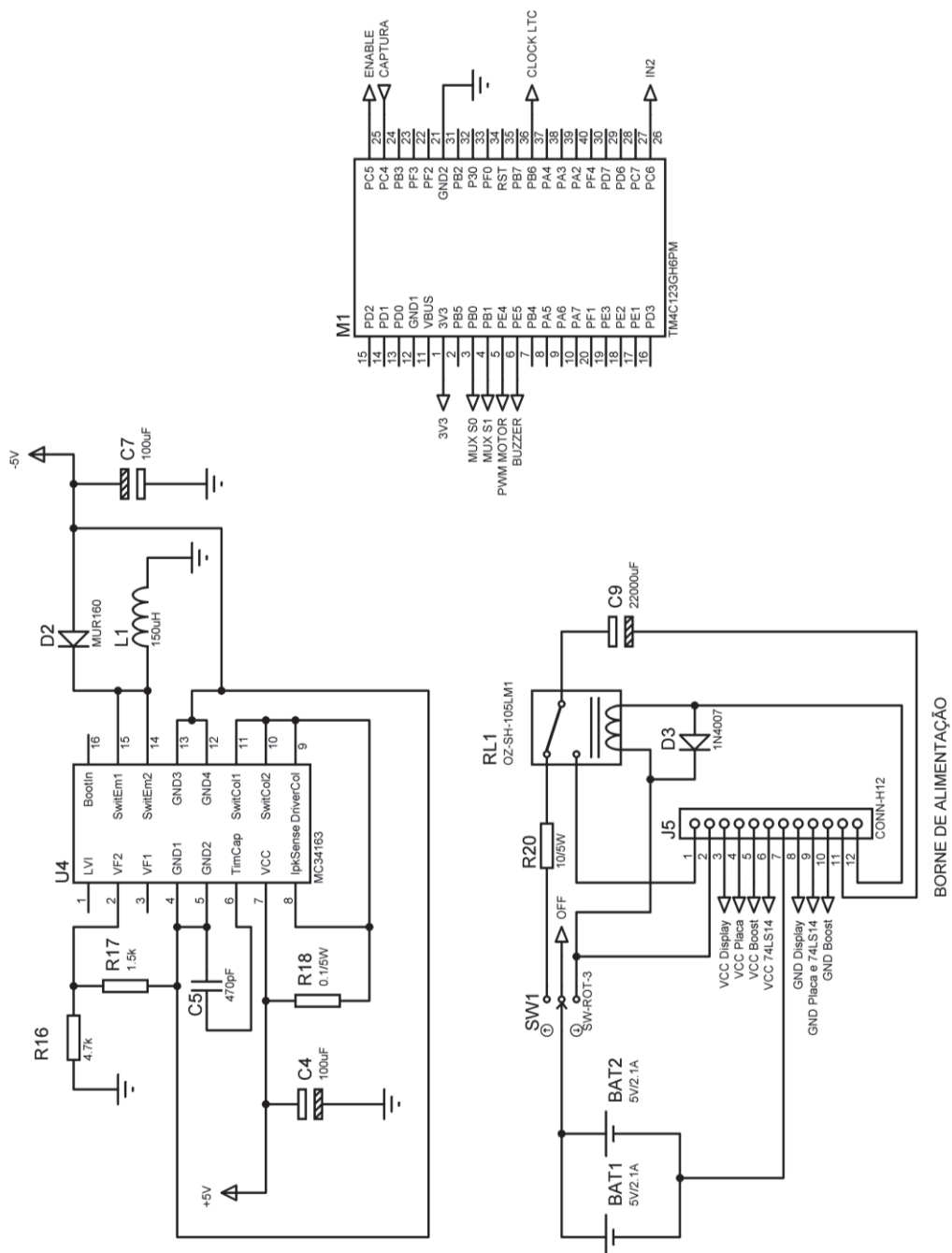
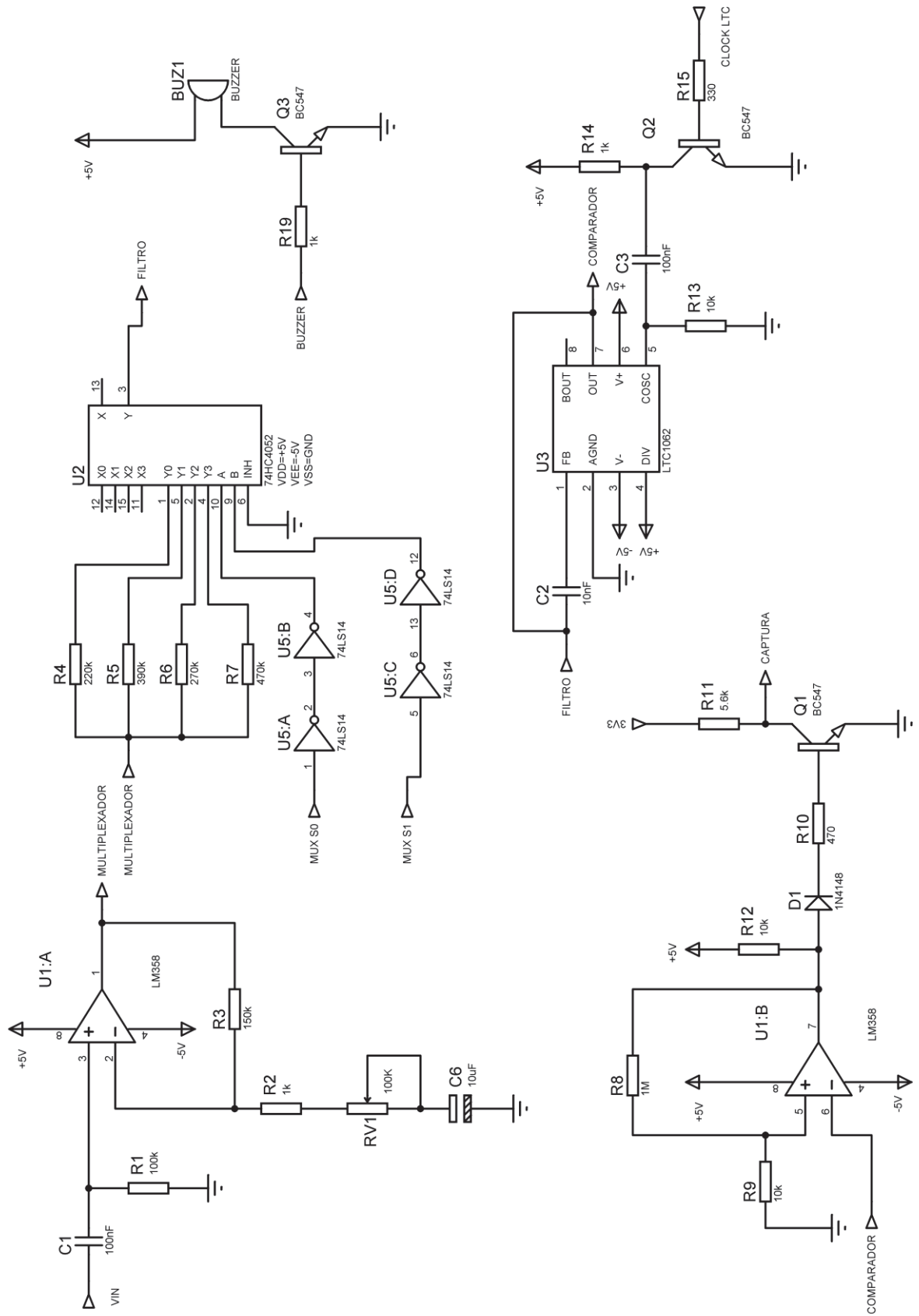


Figura A-2 - Blocos do circuito de hardware do projeto





## APÊNDICE B - PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

Neste apêndice serão apresentadas algumas imagens do protótipo construído. Na figura B-3, é possível observar o protótipo completo. Já nas figuras B-4, B-5, e B-6, observa-se, respectivamente, a caixa do protótipo de forma mais aproximada, e a visão interior da caixa, tanto de suas partes superior e inferior, como também da sua parte inferior de forma mais aproximada, visto que ali é que se encontra grande parte do *hardware*.

Figura B-3 - Protótipo completo



Figura B-4 - Visão aproximada da caixa do protótipo



Figura B-5 - Visão interna das partes superior e inferior da caixa do protótipo

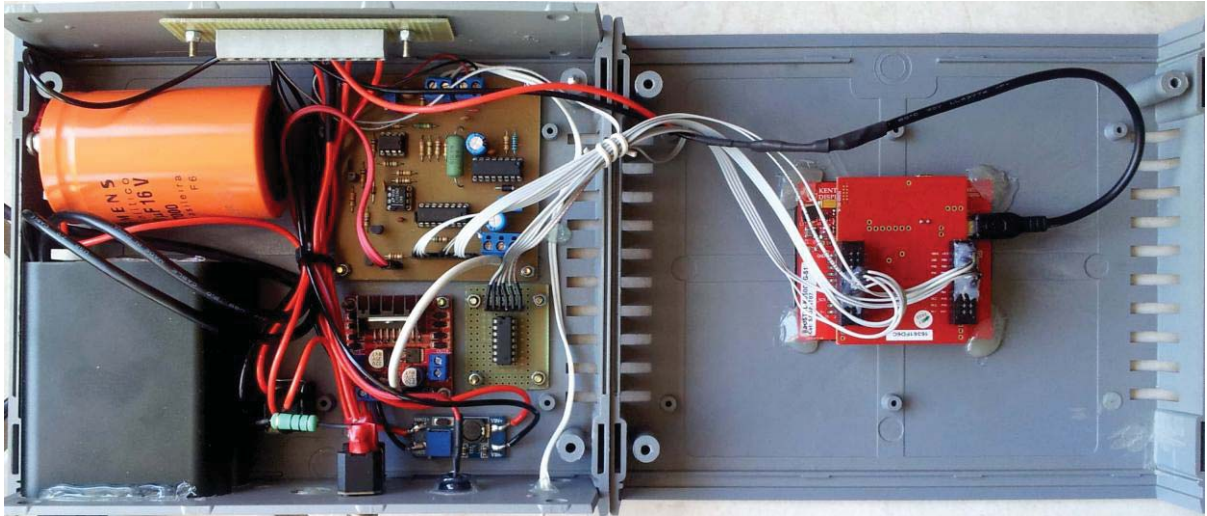


Figura B-6 - Visão interna aproximada da parte inferior da caixa do protótipo

