



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

CAMILA STÉFANY DIÓGENES GUERRA

**VIBRASOM: SISTEMA EMBARCADO DE REPRODUÇÃO SONORA POR MEIO DE
VIBRAÇÃO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

QUIXADÁ

2021

CAMILA STÉFANY DIÓGENES GUERRA

VIBRASOM: SISTEMA EMBARCADO DE REPRODUÇÃO SONORA POR MEIO DE
VIBRAÇÃO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Guimarães Al-Alam

QUIXADÁ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G963v Guerra, Camila Stéfany Diógenes.
VibraSom: sistema embarcado de reprodução sonora por meio de vibração para pessoas com deficiência auditiva / Camila Stéfany Diógenes Guerra. – 2021.
70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Wagner Guimarães Al-Alam.

1. Sistemas embarcados (Computadores) . 2. Tecnologias assistivas. I. Título.

CDD 621.39

CAMILA STÉFANY DIÓGENES GUERRA

VIBRASOM: SISTEMA EMBARCADO DE REPRODUÇÃO SONORA POR MEIO DE
VIBRAÇÃO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wagner Guimarães Al-Alam (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Carlos Diego Andrade de Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Francisco Helder Candido dos Santos Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Honro o fechamento deste ciclo dedicando este trabalho ao meu saudoso pai, José Stenio (in memoriam), que de uma forma muito especial foi o motivador e responsável por eu ter chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, sem Ele nada disso teria sido possível.

Ao meu estimado orientador, Prof. Dr. Wagner Guimarães, por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa, por todo suporte, dedicação, disposição, paciência e confiança.

Com estimado apreço, agradeço aos meus amigos, Carlos Alberto, Rafaella Fernandes, Marcelo Martins, Ruan Derlan, Johnny Marcos, Beatriz Precebes, Iury Queirós, Felipe Silva, Iago Lima, João Mateus, Júlio Neto, Deyvisson Souza, Robertty Freitas, Lucas Nobre, Gabriel Uchôa e Paula Feitosa, por compartilharem comigo tantos momentos ímpares. Vocês foram a minha família durante esses anos, a graduação não teria a mesma graça sem vocês, irei recordar dessas memórias magníficas com muito carinho e saudade. Agradeço ainda às amizades que conquistei durante a Universidade e que contribuíram positivamente em minha vida, Mateus Sousa, Ana Victória, Lucas Cruz, Mariana Castelo, Letícia Saraiva, Marisa Silva, Matheus Fernandes, João Henrique, Mariana Pinho, Adan Bueno, Ana Kely, Paula Luana e Paulo Miranda.

A todo corpo docente da Universidade Federal do Ceará, Campus Quixadá, que contribuíram para minha formação com muito profissionalismo, em especial aos considerados professores Helder Cândido, Valdemir Pereira, Carlos Filho e Paulo Armando.

À Roberta Dutra e Simone Nunes, por todo apoio e incentivo. Me fizeram sonhar cada vez mais alto e em momento algum me deixaram duvidar da minha capacidade e de todas as conquistas que eu poderia alcançar. A contribuição de vocês foi essencial para a minha construção pessoal e posso afirmar categoricamente que o INOVE fez de mim alguém melhor.

Ao Engenheiro de laboratório Abdul-Hamid por ter me dado todo apoio e dicas práticas para o desenvolvimento deste trabalho, me fez buscar conhecimento e aprender cada vez mais.

Aos funcionários, técnicos administrativos e terceirizados da Universidade Federal do Ceará Campus Quixadá que contribuíram direta e indiretamente para a minha formação humana e profissional. Em especial ao Everaldo Tavares, Paulo Sérgio, Ana Cláudia, Jaíza de Queiroz, Jurdan Jr., Helder Jr (Pipa), Rodrigues Neto (Kaká) e Dias.

Por último, agradeço a todas as pessoas que não foram aqui citadas, mas que contribuíram de alguma forma para minha formação técnica e pessoal durante estes 5 anos. Deixo aqui o meu agradecimento.

"Só eu sei cada passo por mim dado nessa estrada esburacada que é a vida, passei coisas que até mesmo Deus duvida, fiquei triste, capiongo, aperreado, porém nunca me senti desmotivado, me agarrava sempre numa mão amiga, e de forças minha alma era munida pois do céu a voz de Deus dizia assim: - Suba o queixo, meta os pés, confie em mim, vá pra luta que eu cuido das feridas."

(Bráulio Bessa)

RESUMO

Os sons fazem parte do cotidiano de uma pessoa ouvinte, escutar uma música pode ser algo natural, porém deficientes auditivos não possuem a mesma habilidade, e dessa forma, este trabalho tem como objetivo a criação de um sistema computacional com uso atuadores, com o intuito de realizar a transdução de uma música em vibrações perceptíveis ao tato, para que dessa forma, as pessoas com deficiência auditiva possam ter uma nova experiência no âmbito da música. O sistema proposto neste trabalho pode também ser usado por pessoas ouvintes que possuam a intenção de complementar a experiência com a música, uma vez que, não é apenas a informação musical que queremos transmitir, mas a experiência musical multissensorial. A pesquisa compreendeu, inicialmente, em realizar um levantamento de requisitos para alcançar as necessidades na criação do produto e ajudar na modelagem de uma proposta viável, seguido do estudo detalhado dos componentes que irão compor o protótipo, e verificar suas possíveis formas de utilização. Posteriormente, realizou-se a criação e avaliação do protótipo no qual este estudo foi baseado, dentro das limitações impostas em meio ao contexto da pandemia do COVID-19. Por fim, os testes para a legitimação da ideia se mostraram satisfatórios no que diz respeito sobre as vibrações serem perceptíveis ao tato, bem como, a capacidade de sentir diferentes sensações por meio dos motores desbalanceados a medida em que as frequências variam, mostrando que o objetivo deste trabalho foi atingido com êxito.

Palavras-chave: Deficientes auditivos. Sons. Atuadores. Vibrações.

ABSTRACT

Sounds are part of the daily life of a listening person, listening to music can be natural, but hearing impaired people do not have the same ability, and thus, this work aims to create a computer system using actuators, in order to perform the transduction of sounds emitted by a musical instrument in vibrations perceptible to the touch, so that in this way, people with hearing impairment can have a new experience in the scope of music. The system proposed in this work can also be used by listeners who have the intention of complementing the experience with the music, since, it is not only the musical information that we want to transmit, but the multisensory musical experience. The research comprised, initially, in conducting a requirements survey to reach the needs in the creation of the product and help in the modeling of a viable proposal, followed by the detailed study of the components that will compose the prototype, and to verify its possible uses. Subsequently, the prototype on which this study was based was created and evaluated, within the limitations imposed in the context of the COVID-19 pandemic context. Finally, the tests for the legitimation of the idea proved to be satisfactory with regard to the vibrations being perceptible to the touch, as well as the ability to feel different sensations through unbalanced motors as the frequencies vary, showing that the objective of this work has been successfully achieved.

Keywords: Hearing impaired. Sounds. Actuators. Vibrations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma onda senoidal.	22
Figura 2 – Sinal no domínio do tempo	25
Figura 3 – Sinal no domínio da frequência	26
Figura 4 – Representação da teoria de <i>Fourier</i> : (a) onda original; (b) onda decomposta; (c) representação no domínio da frequência.	26
Figura 5 – Contexto geral de Sistemas Embarcados.	31
Figura 6 – Resposta ideal dos filtros: (a) passa-baixas; (b) passa-altas; (c) passa-banda.	37
Figura 7 – Filtro passa-baixas ativo de primeira ordem e gráfico da resposta.	37
Figura 8 – Filtro passa-baixas ativo de segunda ordem e gráfico da resposta.	38
Figura 9 – Filtro passa-altas: (a) primeira ordem; (b) segunda ordem; (c) gráfico da resposta.	38
Figura 10 – Filtro ativo passa-banda e gráfico da resposta.	39
Figura 11 – Fluxograma dos procedimentos	40
Figura 12 – Diagrama de Blocos	42
Figura 13 – Diagrama de Atividades.	43
Figura 14 – Configuração do filtro passa-faixa no <i>LTSpice</i> ®.	44
Figura 15 – Gráfico de resposta apresentando curva característica do filtro passa-faixa de 200Hz a 20KHz.	44
Figura 16 – Sinais ideais e abaixo suas respectivas respostas no domínio da frequência.	45
Figura 17 – Sinal de áudio (a), resposta no domínio da frequência (b) e frequência domi- nante (c).	46
Figura 18 – Motores estudados: (a) e (b) desbalanceados; (c) motor de vibração 1027.	48
Figura 19 – Motor DC RF-300FA-12350.	48
Figura 20 – Característica do motor RF-300FA-12350.	49
Figura 21 – Curva característica do motor RF-300FA-12350.	49
Figura 22 – Discriminação seletiva entre dois pontos na superfície corporal.	50
Figura 23 – Diagrama de blocos.	52
Figura 24 – Esquemático do protótipo.	53
Figura 25 – Montagem do protótipo.	54
Figura 26 – Motores desbalanceados: (a) Motor A e (b) Motor B.	55
Figura 27 – Filtro passa-faixa montado.	55

Figura 28 – Protótipo montado.	56
Figura 29 – Atividades do teste de Usabilidade	57
Figura 30 – Momentos do Teste de Observação.	59
Figura 31 – Identificação de diferenças entre 200Hertz (Hz) e 400Hz.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos levantados.	41
Tabela 2 – Componentes definidos para o protótipo.	51
Tabela 3 – Testes com grandes taxas de respostas positivas.	61
Tabela 4 – Resultado do mapeamento.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>Hz</i>	<i>Hertz</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
TA	Tecnologia Assistiva
<i>WWDC</i>	<i>Worldwide Developers Conference</i>
dB	Decibéis
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
CC	Corrente Contínua
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
SE	Sistemas Embarcados
<i>IDE</i>	<i>Integrated Development Environment</i>
<i>UML</i>	<i>Unified Modeling Language</i>
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
2	TRABALHOS RELACIONADOS	18
2.1	<i>CromoTMusic</i>	18
2.2	<i>Ludwig</i>	19
2.3	Terapia Vibroacústica	19
2.4	<i>The Sound Shirt</i>	20
2.5	VibraSom	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1	Sons	22
3.1.1	<i>Representações do Sinal de Áudio</i>	24
3.2	Atuadores	27
3.2.1	<i>Solenoides</i>	28
3.2.2	<i>Motores</i>	29
3.3	Sistemas Embarcados	30
3.3.1	<i>Microcontroladores</i>	32
3.4	Filtragem de sinal	34
3.4.1	<i>Filtros Passivos</i>	35
3.4.2	<i>Filtros Ativos</i>	35
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	40
4.1	Levantamento de requisitos	40
4.1.1	<i>Modelagem da solução</i>	41
4.2	Estudo dos componentes	43
4.2.1	<i>Componentes Escolhidos</i>	51
4.2.2	<i>Diagrama de blocos</i>	52
4.3	Desenvolvimento de um protótipo para a transmissão de música por meio de estímulos táteis	53
4.3.1	<i>Montagem do hardware</i>	53
4.3.2	<i>Desenvolvimento do Firmware</i>	54
4.3.3	<i>Protótipo</i>	55

4.4	Validação do protótipo de transmissão de música por meio de estímulos táteis com deficientes auditivos	56
4.4.1	<i>Teste de Usabilidade</i>	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICES	70
	APÊNDICE A–TERMO DE CONSENTIMENTO	70

1 INTRODUÇÃO

A música é uma incrível ferramenta sonora usada pela humanidade desde seus primórdios e envolve diversos elementos que vão muito além dos nossos ouvidos. O som é um assunto muito interessante dada a sua variedade e complexidade, uma vez que, sua produção, transmissão e percepção, abrangem conceitos da biologia, física, arte e psicologia que permeiam todos os campos do conhecimento humano. É algo familiar para nós desde o momento em que passamos a existir e faz parte de nosso cotidiano.

Haguiara-Cervellini (2003) define o som como a vibração do ar, que o ouvido capta e transforma em sinais elétricos que são interpretados no cérebro. Esse mesmo autor, afirma ainda que em formato de ondas, as vibrações são propagadas pelo ar, chegam na pele, desse modo, os músculos e os ossos os sentem, e por fim chegam ao sistema nervoso autônomo, que possibilita identificar os ritmos, volumes, intensidades e a duração dos sons.

Montagu (1988) afirma que, quando se trata de som, a pele é o sistema mais importante do corpo humano, visto que uma pessoa pode ser cega, surda ou totalmente desprovida de sabor e cheiro. Porém, é impossível viver sem as funcionalidades exercidas por meio da pele. Afirma ainda que deficientes auditivos e/ou visuais, quando estimulados, apresentaram compensações das deficiências em um grau satisfatório através da pele. Pode-se citar ainda um estudo clássico como o de Gescheider (1965) que constatou a precisão em que a pele pode sentir as vibrações do som.

Há uma polêmica quando se trata de deficientes auditivos com relação aos sons e a música que perdura até os dias de hoje, visto que, a música é conceituada como uma manifestação audível e os surdos não possuem tal capacidade auditiva (BENITES; SILVEIRA, 2020). Porém, segundo Benites *et al.* (2019), o recurso de ouvir não está relacionado apenas com a audição mas também com a percepção dos demais sentidos e capacidade de sentir os sons por meio das vibrações no próprio corpo. Para Finck (2009), surdez significa que há algo errado com o ouvido, e mesmo que o deficiente auditivo apresente surdez profunda, ele ainda é capaz de sentir e ouvir sons.

Segundo Benites e Silveira (2020), os defensores da cultura surda declaram que a música é feita para a percepção de pessoas ouvintes, conseqüentemente, não faz parte da vida do deficiente auditivo, portanto, estes não podem cultivar a música tal como os ouvintes.

Ao longo dos séculos a humanidade buscou desenvolver ferramentas para atender suas necessidades, desde o princípio da humanidade com a criação da roda até os equipamentos

tecnológicos dos últimos anos, contudo, grande parte dessas tecnologias são direcionadas para as pessoas que não possuem nenhum tipo de deficiência (AMARAL, 2017).

Devido a evolução da tecnologia, há um grande potencial de reduzir o isolamento, aumentar a independência e proporcionar oportunidades educacionais, financeiras e sociais aos deficientes auditivos, especialmente, quando se trata de arquitetura de *hardware*, aparelhos eletrônicos foram sendo compactados e passaram do tamanho de uma sala para equipamentos que chegam a caber na palma da mão. Nos últimos anos, com a popularização dos microcontroladores, tornou-se possível manusear sensores, motores e muitos outros dispositivos eletrônicos, possibilitando diversas formas de aplicação (HOLLANDA; MIYANO, 2015).

De acordo com o Censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010, existiam aproximadamente 9,7 milhões de pessoas com algum tipo de perda auditiva, onde 2 milhões são totalmente surdas. Sendo assim, é evidente a necessidade de desenvolver soluções tecnológicas que promovam a inclusão dos deficientes auditivos em relação à música, afirma (BENITES; SILVEIRA, 2020).

No Brasil, estudos na área de Tecnologia Assistiva (TA) voltada para a deficiência auditiva estão se tornando cada vez mais frequentes, mesmo com ações ainda tímidas, estimulam como forma de percepção outros órgãos sensoriais em pleno funcionamento, buscando melhorar a qualidade de vida, proporcionando acessibilidade e inclusão social (AMARAL, 2017).

Em Nanayakkara *et al.* (2013), os autores afirmam que pessoas com grau menor de surdez são mais ligados à música se comparado aos que possuem grau maior de surdez, dizem ainda que independentemente do grau da surdez grande parte dos deficientes auditivos expressam interesse em música. Além do mais, mesmo que a música apresente a interpretação por meio da linguagem de sinais e/ou legendas, os deficientes auditivos alegam que dispositivos que fornecem *feedbacks* táteis e visuais são mais úteis.

Dada a demanda pelos deficientes auditivos e a viabilidade de produzir o som através de outros estímulos físicos, este trabalho se propõe o desenvolvimento de um dispositivo embarcado direcionado para pessoas com deficiência auditiva ou, ainda para aqueles que queiram complementar a sensação ao ouvir música. O dispositivo visa identificar frequências sonoras e retornar um *feedback* para o usuário por meio de estímulos táteis conforme a variação das frequências. O dispositivo irá realizar uma análise do som, separando cada faixa de frequência para que possa ser transmitida para o usuário através de estímulos táteis, proporcionando ao usuário a sensação de sentir a música.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema computacional com uso de atuadores para aprimorar mecanismos capazes de realizar a transdução de sons em vibrações perceptíveis ao tato, proporcionando para as pessoas com deficiência auditiva uma nova experiência no que diz respeito a sons e músicas. Como objetivos específicos estão:

- a. Levantar requisitos, buscando compreender e identificar as necessidades do usuário, auxiliando para que seja realizada uma melhor abordagem para a construção do sistema;
- b. Modelar solução, moldando em bases sólidas que guiarão na construção do produto, tanto em *hardware* como em *firmware*;
- c. Avaliar as técnicas de processamento de sinais, investigando sobre os métodos existentes dentro das técnicas e quais as mais adequadas para a proposta do sistema;
- d. Aplicar técnicas de processamento de sinais a partir de *hardwares*, utilizando algoritmos para separação dos sinais, levando em consideração as especificidades da proposta e suas limitações físicas;
- e. Desenvolver um protótipo para a transmissão de música por meio de estímulos táteis, produzindo um sistema que faça a transdução de sons de um instrumento musical em vibrações perceptíveis ao tato;
- f. Validar o protótipo de transmissão de música por meio de estímulos táteis com deficientes auditivos e com pessoas sem a deficiência, mas que desejam ter essa experiência multissensorial com a música, verificando a percepção dos usuários ao fazer o uso do sistema proposto.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são apresentados os trabalhos que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, serão mostradas as semelhanças e diferenças com relação à proposta apresentada neste documento, que vieram a servir como apoio.

Durante a pesquisa sobre tecnologias que envolvem a reprodução de música através de estímulos físicos para pessoas que possivelmente possuam deficiência auditiva, foram encontrados os trabalhos de Rodrigues (2015), um *software* musical que traduz visualmente as notas musicais correlacionando-as com as cores, Tagiaroli (2015), um piano virtual que também associa as notas com as cores, com o acréscimo de uma pulseira que vibra de acordo com cada nota musical.

Também serão apresentados os trabalhos de Carrer (2007), o tablado de madeira que vibra de acordo com a música e Bruscia (2000), com a cadeira vibroacústica, que também vibra de acordo com a música, ambos trabalhos ligados à Terapia Vibroacústica, enquanto Busch (2017) trata sobre a *The Sound Shirt*, uma jaqueta que vibra de acordo com as notas musicas emitidas por uma orquestra sinfônica.

2.1 *CromoTMusic*

No Brasil existe o *software CromoTMusic* que foi desenvolvido em meados de 2015, seu funcionamento requer um teclado musical ligado a um computador, ao pressionar as teclas a aplicação gera uma combinação de cores que são apresentadas na tela do computador fazendo relação às notas musicais. Voltado para crianças surdas, a ideia principal do *software* é transformar o padrão auditivo da música em um padrão visual, desenvolvendo atividades na percepção e cognição musical (RODRIGUES, 2015).

O projeto dispõe de duas janelas, a primeira janela exhibe as notas musicais, conforme as teclas são pressionadas pelo usuário, já a segunda tela mostra os diagramas formados a medida que o instrumento é tocado. Dessa forma, crianças e jovens surdos podem aumentar ainda suas habilidades visuais pelo uso deste *software*, uma vez que, uma maneira conhecida e possível de interação musical na comunidade surda dar-se por meios visuais. De modo que o objetivo deste trabalho é ser útil como instrumento para musicoterapeutas, professores de música, fonoaudiólogos, entre outros profissionais que trabalham com esse publico, assim como auxiliar aspectos sensoriais, emocionais, musicais e com o ensino da música em si (RODRIGUES, 2015).

2.2 *Ludwig*

O projeto proposto em Tagiaroli (2015) é um aplicativo desenvolvido para dispositivos móveis que consiste em uma espécie de piano virtual, com uma pulseira acoplada a um dispositivo móvel que contenha o sistema operacional da *Apple* (IOS), a pulseira vibra a cada toque feito na tela do dispositivo, levando a sensação de ouvir música para um deficiente auditivo. Segundo autor o aplicativo *Ludwig* tem esse nome em homenagem ao grande compositor Ludwig van Beethoven que ficou totalmente surdo durante sua carreira.

O projeto surgiu em junho de 2014 e foi desenvolvido por jovens estudantes brasileiros do Centro Universitário UniMetrocamp de Campinas, ganhando destaque na *Worldwide Developers Conference (WWDC)*, ou seja, conferência de desenvolvedores da *Apple* que aconteceu em 2015 na Califórnia. O aplicativo contém ainda uma biblioteca de músicas, a partir do momento que o usuário escolhe a música, as notas aparecem como guias de cores diferentes que o usuário vai seguindo, na analogia ao tradicional jogo *Guitar Hero* Tagiaroli (2015).

2.3 Terapia Vibroacústica

A Terapia Vibroacústica é um dos poucos meios com que se trabalha música com deficientes auditivos, compreende em vibrar sonoramente um tablado de madeira, um alto falante ou mesmo um instrumento musical para que o surdo possa se relacionar com a música (BRUSCIA, 2000).

Um dos procedimentos empregados na Terapia Vibroacústica é deitar o indivíduo em uma estrutura que possibilita que o som seja direcionado diretamente ao seu corpo e assim possa sentir a música. Outro tipo de tecnologia utilizada na Terapia Vibroacústica é mostrada no trabalho de Carrer (2007), que utiliza uma cadeira vibroacústica em seu projeto com deficientes auditivos, no qual a música pré-gravada é reproduzida por um equipamento de áudio e transmitida para o corpo da pessoa por meio da cadeira, envolvendo o uso de ondas sonoras de baixas frequências como 24Hz, 48Hz e 68Hz. Para realizar tal feito, o projeto utilizou três transdutores, ou alto-falantes de doze polegadas acoplados à estrutura da cadeira, onde as vibrações sonoras são transmitidas diretamente para o corpo.

2.4 *The Sound Shirt*

Busch (2017) relata o que diz respeito às tecnologias vestíveis, existe a *The Sound Shirt* que é uma espécie de jaqueta tecnológica capaz de interpretar música clássica em tempo real para pessoas surdas. Essa ideia partiu da parceria entre a empresa alemã *Cute Circuit* e a Orquestra Sinfônica de Hamburgo, que juntas buscam aumentar a presença dos surdos em concertos musicais. Tal vestimenta foi feita com o que há de mais inovador em têxteis inteligentes e tecnologia vestível, sendo capaz de interpretar até oito tipos de som instrumentais, entre eles estão o contrabaixo, violoncelo, os metais e percussão.

Utilizando dezesseis microssores acoplados ao tecido por meio da conexão *Wifi*, durante a apresentação da orquestra o som capturado no palco é transformado em dados e enviados aos atuadores que vibram e as luzes de LEDs acendem de acordo com a vibração dos instrumentos e a intensidade desse som. Sendo assim, o som dos instrumentos são espalhados por toda a vestimenta, de modo que cada instrumento é sentido em determinada região do corpo, experienciando uma sensação muito mais completa do som (MELO, 2017).

2.5 **VibraSom**

Com o intuito de fazer algo prático, confortável e de fácil uso, o *VibraSom* possui o formato de um bracelete com atuadores acoplados em seu entorno ligado por fios à filtros e a um sistema embarcado que juntos são responsáveis pela captura, processamento do sinal de áudio, transdução e envio do sinal processado para o bracelete que utilizará atuadores para transmitir os estímulos físicos para o usuário. Este trabalho visa o processamento de dois sinais de áudio, com a possibilidade de abranger mais sinais para que a sensação seja ainda mais completa.

Os atuadores adaptados ao bracelete, operam a medida em que o tratamento do sinal de áudio é realizado, identificando a variação do som e vibrando acordo com a mudança. Têm-se ainda massas diferentes acopladas em cada atuador para proporcionar um desbalanceamento e provocar sensações distintas, tendo em vista que não é apenas a informação musical que queremos transmitir, mas a experiência musical multissensorial.

No trabalho descrito em Rodrigues (2015) o sistema nomeado *CromoTMusic* possui uma distinção com este trabalho, uma vez que, em *VibraSom* não há relação com nenhum artefato visual e sim com nova experiência por meio de um acessório vestível acoplado de atuadores multissensoriais, capazes de transmitir o som para o usuário por meio da vibração. Já o *Ludwig*

possui certa semelhança ao sistema vestível proposto em VibraSom, porém Tagiaroli (2015) evidenciou um sistema que a experiência com esse equipamento está restrita para usuários que possuam dispositivo móvel que contenha o sistema operacional da *Apple*, que do ponto de vista financeiro são equipamentos mais caros se comparados com marcas populares.

Ao contrário do que está sendo proposto em VibraSom, os autores Bruscia (2000) e Carrer (2007) apresentam propostas que não utilizam atuadores ligados diretamente ao corpo, que além de não apresentar mobilidade, limitam o uso apenas ao espaço das sessões terapêuticas. A relação entre *The Sound Shirt*, descrito em Busch (2017) e o VibraSom, apresentado neste trabalho, está na concepção do projeto, pois o primeiro é um sistema sob forma jaqueta e o segundo é um dispositivo em formato de pulseira. Além disso, o segundo se diferencia na disposição e tipos de atuadores, buscando uma aplicação multissensorial, proporcionando uma nova forma de sentir a música além das vibrações.

Sendo assim, nota-se através desses trabalhos que as tecnologias disponíveis hoje para a comunidade surda relacionadas à música ainda são muito limitadas. Além disso, as pesquisas mostraram que restrições impostas em algumas dessas tecnologias tornam essa experiência ainda mais longe da realidade dos mesmos. Por isso, é proposto o VibraSom, um sistema com o intuito de viabilizar de forma acessível para todos que desejam ter uma experiência multissensorial com a música, porém com o foco em assegurar a assistência de pessoas com deficiência auditiva para tal experiência.

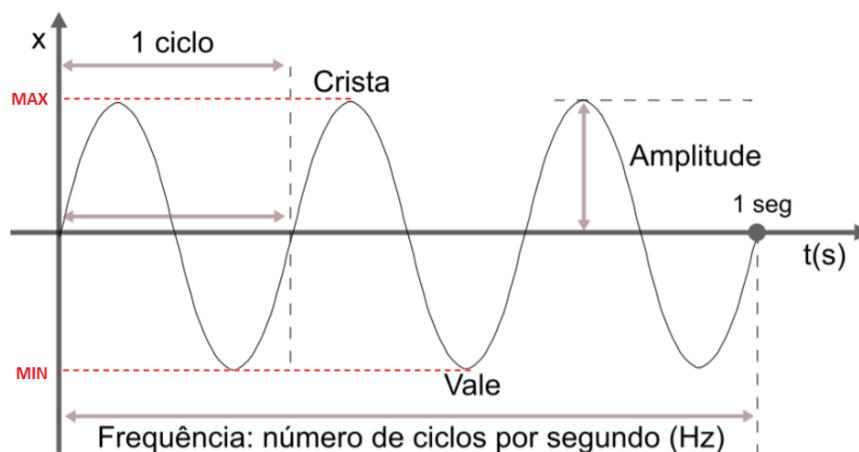
3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos necessários para desenvolvimento do projeto VibraSom. Inicia-se a discussão sobre Sons na Seção 3.1, trazendo as características de uma onda sonora e como é feita a representação do sinal de áudio, seguido com a contextualização dos Atuadores na Seção 3.2, trazendo os tipos de atuadores disponíveis no mercado, destacando especificamente as características dos Solenoides e Motores. Na sequência, na Seção 3.3 são apresentados os conceitos de Sistemas Embarcados, explicando sucintamente sua utilização e finalidade, explorando de forma mais detalhada os Microcontroladores, e por fim, na Seção 3.4 contextualiza-se sobre os tipos de filtros de sinais, bem como, suas características e aplicações.

3.1 Sons

O som é definido como oscilações em forma de ondas que se propagam por meio do ar até chegarem ao ouvido externo, gerando a sensação sonora (FERNANDES, 2002). Tais oscilações podem ser representadas por uma onda senoidal como é apresentada na Figura 1, ainda nesta figura é possível observar uma onda senoidal pura, que é uma onda periódica na qual a partícula do meio material apresenta a mesma velocidade com intervalos de tempos iguais, também conhecida como movimento harmônico simples.

Figura 1 – Representação de uma onda senoidal.



Fonte: Adaptação de Mulinari (2017)

Uma onda senoidal periódica possui algumas características relevantes que permitem destacar uma forma de onda das outras, tais como comprimento de onda, período, frequência e

amplitude (MULINARI, 2017). Tais características serão detalhadas no decorrer desta seção.

O comprimento de uma onda é calculado por meio da distância entre dois pontos consecutivos com a mesma fase (MULINARI, 2017). Também pode ser definido como a distância correspondente a uma oscilação completa ou um ciclo completo (FERNANDES, 2002). A onda também apresenta a crista, ou pico, que é o ponto máximo que a onda atinge, assim como, o vale é o ponto mínimo que a onda em oscilação pode atingir, ambos podem ser vistos na Figura 1.

O cérebro capta a frequência e a amplitude das ondas sonoras de acordo com a quantidade de picos e vales, ou cristas e vales, das ondas que passam em um ponto a cada segundo e pela sua entonação, na percepção humana associamos o som como fraco ou forte e grave ou agudo (MAGALHÃES; FILHO, 2017).

No que diz respeito à frequência da onda, expressada em Hz , pode ser entendida como a quantidade de ciclos realizados dentro de um segundo do movimento vibratório do som. Ressalta-se ainda que ondas possuem sempre a mesma frequência da fonte que as emitiu, independentemente do meio em que se propagam (FERNANDES, 2002).

O espectro de frequência audível pelo ser humano está entre $20Hz$ e $20KHz$, para um som ser considerado grave ele apresenta baixa frequência, quanto mais próxima uma nota musical é de $20Hz$, mais grave ela é, e agudo quando a frequência for alta, quanto mais próxima de $20KHz$, mais aguda ela é. Já na região intermediária, entre os graves e os agudos, definem-se os sons ditos médios, e os sons com frequências entre $0Hz$ e $20Hz$ são denominados infrassons, da mesma forma, classificamos de ultrassons todos os sons de frequência superior a $20KHz$, ambos não podem ser ouvidos por humanos (MAGALHÃES; FILHO, 2017).

A amplitude, no caso de uma onda sonora, é expressada em Decibéis (dB), sendo a altura da crista da onda em relação ao eixo de propagação da onda como mostra a Figura 1. Pode-se definir ainda como o valor do maior deslocamento das partículas em relação a posição de equilíbrio, essa característica da onda compara o valor com a amplitude de variação da pressão do meio de propagação ou intensidade do som (COSTANZO, 2007).

A deficiência auditiva ou surdez é dividida em quatro níveis que se relacionam com amplitude, sendo: suave em que têm-se a perda de nível de capacidade auditiva de 20 a 40 dB, moderado de 40 a 70 dB, severo de 70 a 90 dB e profundo para aqueles que apresentam perda acima de 90 dB. Dessa forma, entende-se surdo todo e qualquer indivíduo que tenha perda em seu nível de capacidade auditiva no nível superior à 70 dB, quando a audição é afetada parcialmente denomina-se como unilateral ou bilateral, e para conduzir as técnicas de ensino, linguísticas,

artísticas e sentimentais é essencial conhecer o grau de comprometimento auditivo do indivíduo (MAGALHÃES; FILHO, 2017).

A amplitude das oscilações ao chegar no tímpano do ouvido possibilitando a sensação de volume de um som, que por sua vez está relacionado diretamente à intensidade total do som, soma das intensidades individuais (MULINARI, 2017). A intensidade do som é a quantidade de energia contida no movimento vibratório e varia de acordo com a amplitude da onda sonora. Tal intensidade compreende em maior ou menor amplitude na vibração ou na onda sonora, permitindo classificar os sons em fracos e fortes. A intensidade de um som pode ser medida através de dois parâmetros: a energia contida no movimento vibratório e a pressão do ar causado pela onda sonora (FERNANDES, 2002).

Além disso, quando se trata de intensidade, o que se ouve não é totalmente equivalente com a medição de um aparelho, visto que têm-se que considerar a frequência da onda sonora (NANAYAKKARA *et al.*, 2013). No entanto, Hevner (1935) alertou sobre importância da tonalidade musical e suas mudanças quando se trata de proporcionar a experiência de sentir a música, pois tais tonalidades costumam fazer parte da base estrutural das músicas e despertam emoções, uma vez que tons mais agudos estão associados a emoções felizes, enquanto tons graves são tipicamente relacionados a emoções tristes.

Ainda no que diz respeito aos deficientes auditivos em relação à música, Nanayakkara *et al.* (2013) afirmam que pessoas com grau menor de surdez são mais ligados à música se comparado aos que possuem grau maior de surdez, dizem ainda, que independentemente do grau da surdez grande parte dos deficientes auditivos expressam interesse em música. Além do mais, mesmo que as músicas apresentem a interpretação por meio da linguagem de sinais e/ou legendas, os deficientes auditivos alegam que dispositivos que fornecem *feedbacks* táteis e visuais são mais úteis, como propomos neste trabalho.

3.1.1 Representações do Sinal de Áudio

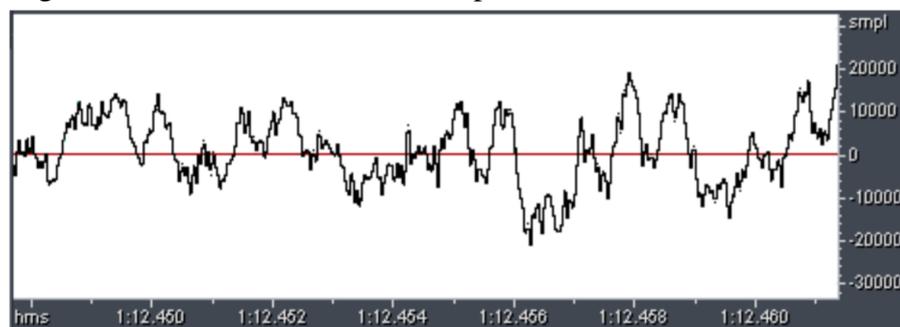
Existem diversas maneiras de representar um sinal de áudio contínuo, mas somente duas são importantes na abordagem deste trabalho, sendo a representação do sinal no domínio do tempo e a representação do sinal no domínio da frequência.

Para extrair informações de um sinal de áudio contínuo faz-se fundamental o uso de um dispositivo que separe as frequências. Esse dispositivo chama-se filtro, no qual a sua resposta em frequência é definida por uma faixa de passagem, uma faixa de rejeição e uma faixa

de transição. Sinais que tem frequência de acordo com a faixa de passagem são restaurados praticamente sem distorções, enquanto os sinais com frequências dentro da faixa de rejeição são absolutamente atenuados. Sendo assim, os filtros são denominados como passa alta, passa baixa, passa banda ou rejeita banda dependendo da característica do sinal deseja filtrar (FERREIRA; HECKLER, 2020).

Os sinais de áudio no domínio do tempo são definidos por $x(t)$, no qual t pode assumir qualquer valor real correspondente ao tempo e $x(t)$ representa a amplitude no momento de tempo t . Podemos ter $x(t)$ como um valor que pode ser real ou complexo para um intervalo de valores de t . Um sinal de áudio pode ser decomposto por várias ondas ou senoides, que são sinais periódicos que possuem fase, amplitude e frequências determinadas. Na Figura 2, podemos ver graficamente como o sinal pode ser representado no domínio do tempo (SILVA, 2007).

Figura 2 – Sinal no domínio do tempo

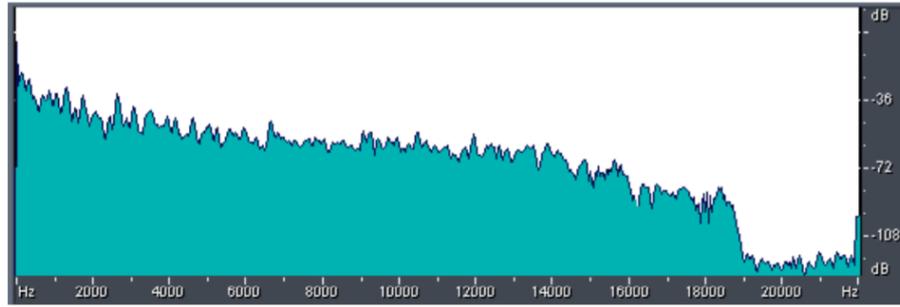


Fonte: Silva (2007)

Normalmente quando pensamos em sinais de áudio, unimos estes à sua representação no domínio do tempo, porém, também é possível representar sinais no domínio da frequência. Um sinal contínuo no domínio da frequência é definido por $x(\omega)$, onde $\omega = 2\pi f$ representa a frequência angular em radianos por segundo e $x(\omega)$ representa a amplitude do sinal na frequência ω . Na Figura 3, é possível ver graficamente como o sinal pode ser representado no domínio da frequência, a medida em que a frequência do sinal de entrada varia dentro de um certo intervalo é analisada a resposta resultante, que separa conceitualmente as senoides que compõem o sinal, produzindo um espectro de frequências. (SILVA, 2007).

É importante salientar que um sinal de áudio pode ser representado tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, uma forma de fazer essa transição de domínios é utilizando a transformada de Fourier, tal método facilita o trabalho com o sinal no domínio da frequência. O matemático francês Jean Baptiste Fourier foi o pioneiro na aplicação deste método de análise, conhecido atualmente como Análise de Fourier (FERNANDES, 2002). Tal método

Figura 3 – Sinal no domínio da frequência

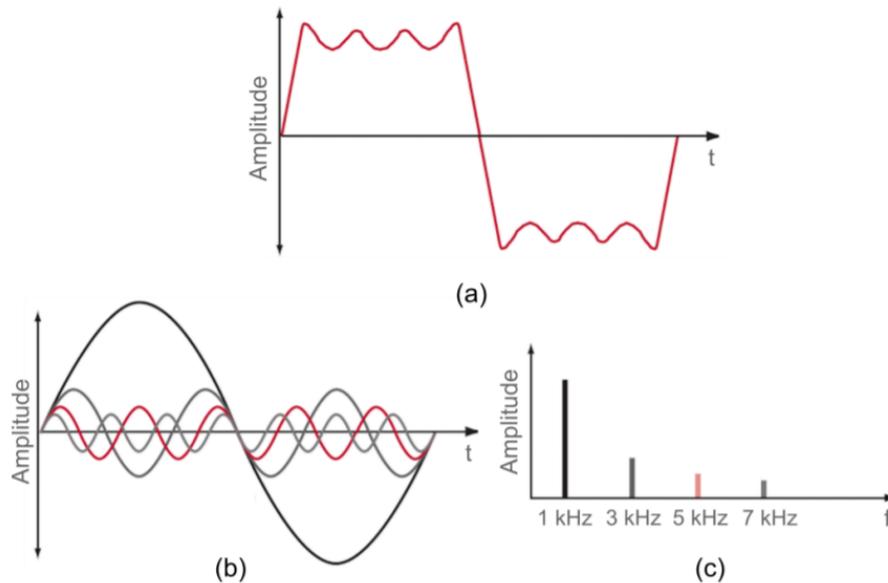


Fonte: Silva (2007)

demonstra que qualquer forma de onda pode ser decomposta em uma soma de ondas senoidais e para sinais não-periódicos ilimitados no tempo como mostra a Figura 4. O método de análise é denominado Transformada de Fourier, calculado como:

$$F[x(t)] = X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

Figura 4 – Representação da teoria de *Fourier*: (a) onda original; (b) onda decomposta; (c) representação no domínio da frequência.



Fonte: Mulinari (2017)

O algoritmo da Transformada Rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform (FFT)* aproveita a redundância e a simetria nas etapas intermediárias do cálculo e é usado em muitos algoritmos de processamento de sinal realizando a tradução do sinal analógico de entrada em

espectro de frequência, funciona com um número finito de amostra, sabemos que quanto maior esse número, mais lento será o algoritmo, em contra partida tem-se uma resolução maior para os resultados (BIANCHI, 2014).

Neste trabalho o uso da *FFT* é de extrema importância, uma vez que, ao transformar o sinal sonoro do domínio do tempo para o domínio da frequência torna-se possível o processamento digital desse sinal, na Seção 4.2 analisaremos de forma detalhada sua aplicação para o desenvolvimento do VibraSom.

3.2 Atuadores

Brugnari e Maestrelli (2010) definem atuadores como quaisquer elementos que atendam a um comando recebido de um outro dispositivo, que podem ser automáticos ou manuais com base em uma entrada ou critério a ser seguido. De forma geral, os atuadores são transdutores que possuem a capacidade de transformar uma forma de energia em outra, um sinal elétrico em grandezas físicas, como: movimento, magnetismo, calor, entre outros.

Enquanto Wendling (2010) define atuadores como dispositivos eletromecânicos com a capacidade de realizar uma operação mecânica específica a partir de comandos elétricos, convertendo a corrente contínua de um motor em movimentos lineares, ou seja, converte energia pneumática, hidráulica ou elétrica, em energia mecânica .

Responsáveis pela ação do sistema, os atuadores frequentemente são implementados em microprocessadores digitais, que definem as operações de controle a serem realizadas pelos atuadores com base nas informações obtidas de forma manual ou programável (FARIA *et al.*, 2006). É possível classificar os atuadores de acordo com o tipo de energia que utiliza, sendo dois tipos: lineares e rotativos. Denomina-se atuador linear quando é realizado um movimento de translação e atuador rotativo quando realiza movimento giratório (BONACORSO; NOLL, 2000).

De acordo com Thomazini (2005), os atuadores são dispositivos que mudam uma determinada variável controlada. Eles recebem sinal emitido por seus controladores e podem agir sobre o sistema que está sendo controlado, geralmente trabalhando com potências elevadas. Alguns tipos de atuadores disponíveis são:

- Válvulas (pneumáticas, hidráulicas);
- Cilindros (pneumáticas, hidráulicas);
- Reles (estáticos, eletromecânicos);
- Solenoides;

– Motores (eletromagnéticos).

Os atuadores hidráulicos convertem a energia de trabalho em energia mecânica. Geralmente são usados em projetos que necessitam mover grandes cargas, como tratores e guindastes, ou quando necessita de grande precisão no movimento. Atuadores pneumáticos utilizam gás para atuar, são empregados em projetos que possuem carga máxima de uma tonelada, onde há necessidade de movimentos de duas posições, como exemplo, máquinas de fixação ou transporte de peças, ou ainda quando necessitam de altas rotações como a broca de dentista. Já os atuadores eletromagnéticos são motores movidos por eletricidades, tais como, motor desbalanceado e motor de passo, no geral são atuadores que utilizam pouca carga e obtém alta precisão (CASTRO, 2015).

Neste trabalho, serão utilizados atuadores capazes de produzir vibração. Carrer (2007) define o conceito de vibração como uma característica física presente em qualquer partícula elementar do universo. Para melhor entendimento desse conceito, é preciso ter a ideia relacionada a movimento. Roederer (1998) afirma ainda que há uma movimentação em que o ponto material segue um padrão temporal que se repete continuamente, denominando de movimento periódico ou vibração.

Nas Seções 3.2.1 e 3.2.2, que seguem, apresentam respectivamente Solenoides e Motores, onde são apresentados suas características, e serão levados em consideração no trabalho proposto.

3.2.1 Solenoides

Para Silva e Lago (2002), solenoides são dispositivos eletromecânicos baseados no deslocamento causado pela ação de um campo magnético gerado por uma bobina e são muito utilizados na construção de outros dispositivos, como é o caso das válvulas para controle de fluidos. Existem diversos modelos de válvulas solenoides compreendendo uma grande faixa de dimensões e capacidades para controle desde pequenas vazões em equipamentos médicos e científicos até grandes plantas industriais. Em particular, as válvulas para baixas vazões, da ordem de mililitros por minutos, e baixas pressões têm sido amplamente aplicadas em equipamentos e montagens para uso em laboratórios clínicos e químicos. Elas são de pequenas dimensões e requerem baixa tensão e corrente de acionamento.

Os mesmos autores dizem ainda que o princípio de acionamento elétrico é basicamente o mesmo, isto é, uma tensão de alguns *volts* é aplicada sobre um solenoide que faz com

que um núcleo metálico ferromagnético se desloque, causando a alteração do estado da válvula. O núcleo ferromagnético comprime uma mola que é a responsável por deslocar o núcleo para sua posição original quando a corrente elétrica é interrompida (SILVA; LAGO, 2002).

Mesmo que o princípio básico deste atuador não esteja diretamente voltado à vibração, mediante pesquisas constatou-se a aplicabilidade do mesmo no contexto desejado para este trabalho. Sabemos que a medida em que a corrente elétrica é fornecida cria-se um campo magnético que causa o deslocamento do núcleo metálico do solenoide, e quando a corrente elétrica é interrompida o núcleo metálico volta a sua posição inicial. Dessa forma, podemos configurar a alimentação do solenoide de modo que a corrente elétrica alterne repetitivamente, para que o núcleo metálico se mantenha em constante movimento, dando a sensação de vibração.

3.2.2 Motores

Os motores são máquinas com função de converter alguma forma de energia em energia mecânica. São muito utilizados na sociedade e estão presentes nos mais diversos equipamentos que são utilizados no dia a dia como ventiladores, geladeiras e carros (CASTRO, 2015).

Planas (2018) explica que um motor pode ser classificado em uma categoria de acordo com dois critérios: a forma de energia que ele aceita para criar movimento e o tipo de movimento que produz. Há alguns tipos de motores, entre eles: o motor de combustão interna, é um motor no qual a combustão de um combustível ocorre com um oxidante em uma câmara de combustão, gerando trabalho mecânico. O motor de combustão externa é um motor térmico no qual um fluido de trabalho interno é aquecido por combustão a partir de uma fonte externa, por meio da parede do motor ou de um permutador de calor. Têm-se ainda o motor elétrico que é uma máquina elétrica rotativa que transforma a energia elétrica de entrada em energia mecânica, esse motores podem ser alimentados por corrente contínua ou por corrente alternada a partir de uma rede de distribuição elétrica central.

Os motores elétricos de Corrente Contínua (CC) ou *Direct Current (DC)* comuns compreendem na forma mais usada de se converter energia elétrica em energia mecânica, de forma que estes são amplamente utilizados como o principal meio de tração das partes móveis de robôs e os mais variados tipos de dispositivos mecatrônicos. Tais motores são popularmente conhecidos como motores *DC*, que geralmente são empregados em sistemas de movimento, sistemas automáticos e esteiras de linhas de produção, por possuírem controle e acionamento

simples e ocupam pouco espaço, podendo ser adotados em qualquer equipamento comum que necessite de um controle de movimento e velocidade. (PROVENZA, 1996)

Braga (2009) afirma que uma forma simples de controlar a velocidade de um motor de corrente contínua é por meio da alteração da tensão fornecida à ele, fazendo uso de algum tipo de dispositivo externo. Há dois tipos de controles mais empregados para os motores, que são o controle linear e controle pulsante ou *Pulse Width Modulation (PWM)* que são configurados em um microcontrolador.

Por sua vez, o motor desbalanceado é um motor elétrico, geralmente de tamanho reduzido, o mesmo utilizado por *smartphones* e outros eletrônicos que passam informação por meio de vibração. A passagem de informação por meio da vibração é entendida como a possibilidade de modular a frequência de rotação do motor para variar o tipo de informação. Portanto, o dispositivo sozinho é capaz de fornecer vários tipos de informações devido a diferentes velocidades de rotação (TOMASSINI, 2017).

A principal vantagem do motor desbalanceado é a compatibilidade com diversas placas de prototipagem e funciona com uma tensão lógica de 3,3V. Seu tamanho é pequeno, sendo o comprimento total de 4 cm, viabilizando seu uso neste projeto, pois permite que seja compacto, assim como, as vibrações emitidas por esse tipo de motor são sentidas pelo usuário sem causar incômodo (CASTRO, 2015).

Dos atuadores apresentados nessa seção, serão considerados para este trabalho o uso de motores *DC*, com o intuito de proporcionar estímulos táteis conforme a variação das frequências dos sons.

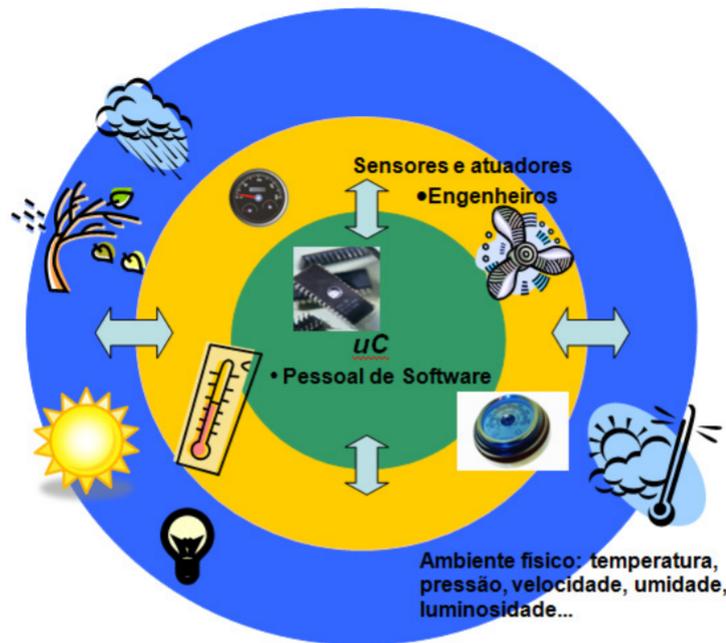
3.3 Sistemas Embarcados

Sistemas Embarcados (SE), também conhecidos como sistemas dedicados ou embutidos, com o propósito de perceber características de um ambiente ou dispositivo físico, diferindo-se em diversos pontos de um computador para propósitos gerais, ou seja, efetuam um conjunto de tarefas pré-determinadas para a finalidade no qual foi modelado. Tendo como objetivo geral controlar um dispositivo físico enviando sinais de controles para atuadores em reação aos sinais de entradas enviados pelos sensores ou até mesmo por usuários (CASTRO, 2015).

Os SE são constituídos por componentes denominados Microprocessadores ou Microcontroladores que funcionam como o parte essencial para o funcionamento do sistema

embarcado, tornando possível a adaptação de periféricos, como: barramentos de comunicação, memória volátil, memória não-volátil, conversor A/D, conversor D/A, relógio e calendário digital e outros componentes (CASTRO, 2015). A Figura 5 traz uma ilustração do contexto geral da utilização e finalidade dos Sistemas Embarcados, utilizando uma visão em camadas, representadas em cores distintas.

Figura 5 – Contexto geral de Sistemas Embarcados.



Fonte: Martins *et al.* (2010)

A camada externa corresponde ao ambiente físico ou equipamento a ser controlado, com a finalidade de obter características que deverão ser utilizadas pelos Sistemas Embarcados para efetuar as ações programadas. As variáveis de ambiente são grandezas físicas que, geralmente, são monitoradas e controladas, para cada variável de ambiente existem sensores capazes de obter informações como temperatura, pressão, velocidade, umidade, luminosidade, aceleração, entre outras (MARTINS *et al.*, 2010).

Na camada intermediária são apresentados os sensores e atuadores que fazem parte do sistema embarcado, com o intuito de captar informações do meio onde está inserido e enviar os dados para que possam ser processados, servindo com uma espécie de ponte entre o ambiente físico e o microcontrolador (MARTINS *et al.*, 2010).

Já a camada interna representa o Microcomputador ou Microcontrolador, que é o componente de *hardware* central do sistema embarcado, que tem como finalidade a execução do *firmware* para o controle dos sensores e atuadores (MARTINS *et al.*, 2010).

Conhecido popularmente com *software* embarcado, o *firmware* é um conjunto de instruções operacionais que são programadas diretamente no *hardware* de equipamentos eletrônicos, em outras palavras, é um *software* associado a um dispositivo de *hardware* com a finalidade de efetuar o seu controle. Estes códigos são essenciais para ativar e executar o *hardware* e os seus recursos, fornecendo as mesmas informações todas as vezes que o dispositivo for iniciado. Sendo assim, o *firmware* está armazenado diretamente no chip de memória de aparelhos eletrônicos, mais especificamente nas memórias PROM e EPROM, que são memórias não voláteis (PILOTTO; TONIDANDEL, 2019).

Castro (2015) recomenda levar em consideração determinadas métricas para escolha do *hardware* de um projeto, como: o espaço disponível no dispositivo, o grau de complexidade da funcionalidade que sistema terá e os sensores e/ou atuadores que precisam fazer parte do sistema para desempenhar todas as funcionalidades desejadas. Tais métricas estabelecem características particulares referentes aos Sistemas Embarcados, sendo elas:

- Altos níveis de acoplamento com o *hardware* disponível;
- Interação com sensores, atuadores e sistemas;
- Interação com sensores, atuadores e sistemas;
- Baixo consumo de energia;
- Alto nível confiabilidade;
- Funcionalidade restrita;
- Atuação em tempo real.

Devido à sua importância para este trabalho, os Microcontroladores serão explorados mais detalhadamente na Seção 3.3.1.

3.3.1 Microcontroladores

Microcontrolador é um circuito integrado responsável por processar dados e executar instruções. É um dispositivo que possui em um mesmo chip, processador, memória, periféricos de entrada e saída. Possuem bastante aplicabilidade em projetos embarcados, pois existe uma especificidade no processamento, ou seja, as tarefas são dedicadas exclusivamente ao dispositivo ou sistema que ele controla. Geralmente utilizados em projetos com espaço reduzido (DADAM, 2019).

Já para Souza (2005), microcontrolador é um componente eletrônico, geralmente de tamanho reduzido, com inteligência programável, utilizado no controle de processos lógicos.

Em uma única pastilha de silício encapsulada pode existir todos os diferentes componentes fundamentais para controlar um processo, logo, o microcontrolador possui internamente memória de dados, memória de programa, portas de entrada, saída paralela, controladores, *timers*, comunicação serial, *PWM*, Conversores Analógicos e Digitais.

A característica fundamental do microcontrolador para Júnior (2013), é reunir em um único chip todos os periféricos fundamentais para o projeto e fabricação de um dispositivo eletrônico, indo de um simples sinalizador e luzes pisca-pisca até a complexos equipamentos médicos. De modo geral, o microcontrolador é usado para controlar as operações de uma determinada tarefa, sendo normalmente integrados ao próprio dispositivo que será controlado. Dessa forma ele torna-se um computador dedicado a tarefa especificada, guardando na sua memória apenas o programa que será seguido para guiar a aplicação especificada. Suas entradas/saídas possibilitam o acoplamento de sensores e atuadores, visando usá-los apenas para atender as necessidades do projeto. Após as configurações e programação concluída, o microcontrolador seguirá unicamente o que foi proposto em sua criação (CASTRO, 2015).

Alguns pinos do microcontrolador possuem funcionalidades específicas e não permitem que seu comportamento seja programado ou modificado pelos usuários, ou seja, um pino de saída não pode ser configurado como entrada e vice-versa. Contudo, normalmente, a maioria dos pinos de um microcontrolador pode ser configurado pelo usuário. Os pinos podem ser programados como entrada ou saída, valores lógicos altos e baixos, tipo digital ou analógico, tais configurações são realizadas por meio da programação de registradores e periféricos específicos para a finalidade requerida (JUNIOR; DUARTE, 2011).

Para a programação dos periféricos e registradores dos microcontroladores pode ser feita de acordo com o funcionamento específico do periférico que se deseja utilizar e na configuração correta dos registradores envolvidos. Ressaltando-se que tanto a forma de funcionamento de um periférico, quanto às informações sobre os registradores envolvidos na sua programação são facilmente encontrados nos *datasheets* (DADAM, 2019).

Um exemplo de microcontrolador é o ATmega328P que foi produzido pela empresa Atmel na família AVR, linha de microcontroladores de chip único com 8 *bits*, e é utilizado pelo Arduíno UNO. Esse microcontrolador possui 14 entradas/saídas digitais, sendo que seis dessas portas suportam serem usadas como saídas *PWM*, 6 entradas analógicas, uma conexão USB, um conector de alimentação e um botão de *reset*, e para comunicação, utiliza o protocolo Programação Serial em Circuito ou ICSP (*In Circuit Serial Programming*) (CARDOSO, 2014).

O Arduíno é uma placa de prototipagem eletrônica de *hardware* livre, projetada com um microcontrolador Atmel AVR, originou-se na Itália no ano de 2005 e tem como finalidade oferecer uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* (código aberto). Tornou-se umas das placas mais populares atualmente, pois possui uma grande comunidade de usuários, muitos trabalhos e diversos projetos que usam sua plataforma, devido a sua facilidade de uso, eficiência e gratuidade. Graças à sua popularidade, têm-se uma grande quantidade de ferramentas já implementadas para o mesmo (OLIVEIRA, 2017). Além de possuir seu próprio processador e *Integrated Development Environment (IDE)* que pode ser executado tanto em *Windows* quanto em *Linux*, o Arduíno contém entradas analógicas, digitais, energia e entrada USB, sendo amplamente utilizado como uma plataforma de desenvolvimento de projetos de Sistemas Embarcados (CASTRO, 2015).

O Arduíno pode ser empregado para desenvolver objetos interativos ou ser conectado diretamente a um computador e uma rede, capaz de recuperar, enviar e efetuar operações sobre esses dados. A composição da placa do Arduíno vai além do microprocessador, possui ainda um cristal ou oscilador, que é relógio que envia pulsos de tempo em uma frequência especificada, permitindo sua operação na velocidade requerida e um regulador linear de 5 *volts*, que pode ser obtida de duas formas: do próprio cabo USB ou por meio de uma fonte externa, podendo ser baterias ou eliminadores de pilha, que são ligadas ao conector de energia externa. Além disso, são encontrados na placa os pinos de entrada/saída do microcontrolador, sendo possível conectá-los a outros circuitos, sensores e atuadores (JUNIOR, 2012).

Para este trabalho o uso do Microcontrolador ATmega328P foi considerado adequado devido a necessidade de controle dos atuadores, aproveitando-se das vantagens que esse microcontrolador apresenta em conjunto com o Arduíno.

3.4 Filtragem de sinal

Conforme apresentado na Seção 3.1.1, os filtros são partes essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Eles fornecem meios de reconhecer diferentes frequências e a partir delas gerar os sinais para os atuadores. Nesta Seção serão apresentados os Filtros Passivos, que não utilizam elementos amplificadores e os Filtros Ativos que possuem componentes ativos, como amplificadores e necessitam do uso de fontes para o seu funcionamento.

3.4.1 *Filtros Passivos*

Um filtros passivos são resumidamente filtros que não utilizam nenhum elemento amplificador, como transistores e amplificadores operacionais, comumente chamados de amp-ops. Assim, há uma simplicidade no que se trata de componentes necessários para a implementação já que são obtidos por meio da combinação apenas de capacitores, indutores e resistores de potência e são as opções mais usadas nas indústrias (FILHO *et al.*, 2008). Filtros passivos apresentam ainda outra vantagem, por não fazerem uso de nenhum componente ativo, os filtros passivos não necessitam de fonte de alimentação. Por não serem restritos por uma limitação de largura de banda dos amplificadores operacionais, eles possuem bom desempenho em altas frequências. Ainda podem ser utilizados em aplicações que envolvem níveis mais elevados de tensão e corrente se comparado aos filtros ativos, além disso, geram menos ruído (SASAKI; OSHIRO, 2013).

Ao todo, temos quatro tipos de filtros passivos com maior relevância: passa-baixas, passa-altas, passa-faixas e rejeita-faixas. Cada um deles pode ser construído de diferentes maneiras, associando os três componentes citados anteriormente: capacitor, indutor e resistor. Ainda que, o conceito de uma frequência alta, frequência baixa ou faixa de frequência seja muito relativo para definir dentro de um circuito, o que considera-se uma frequência alta ou baixa, é necessário definir o parâmetro frequência de corte, também chamado de frequência de meia potência. Ao passar por essa frequência, a saída perde metade da potência total de entrada (-3 decibéis) ficando cada vez mais atenuada (MUSSOI, 2004).

3.4.2 *Filtros Ativos*

Os filtros ativos são denominados dessa forma pois possuem componentes ativos, isto é, possuem a necessidade de uma fonte de alimentação, associados aos componentes passivos. Assim, contrariamente aos filtros passivos, os filtros ativos apresentam um amplificador com a finalidade de produzir uma amplificação de tensão, ou seja o ganho, e ainda a buferização ou isolamento do sinal (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1984).

Para Braga (2017) um filtro pode ser determinado como um circuito capaz de proceder de forma seletiva diante de sinais analógicos de determinadas frequências. Os filtros que analisaremos podem pertencer basicamente a uma das três categorias: passa-baixas, passa-altas ou passa-faixas, a classificação é definida de acordo com os sinais de baixas frequências,

altas frequências ou uma faixa definida de frequências.

Um filtro que possua uma resposta constante de CC até determinada frequência de corte f_{OH} , onde:

$$f_{OH} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

e impossibilite que qualquer sinal passe além dessa frequência de corte é chamado de filtro passa-baixas ideal, em que R_1 representa o valor da resistência e C_1 o valor da capacitância. A resposta ideal de um filtro passa-baixas é mostrada na Figura 6(a). De acordo com Mazanti e Corral (2011) um filtro ideal não tem aplicação na prática, uma vez que a sua função de resposta em frequência equivale a um filtro que não é causal nem estável. Na prática, busca-se aproximações dos comportamentos ideais, como os da Figura 6.

Um filtro que proporciona a passagem apenas de sinais de frequência superiores a frequência de corte f_{OL} é um filtro passa-altas, onde:

$$f_{OL} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

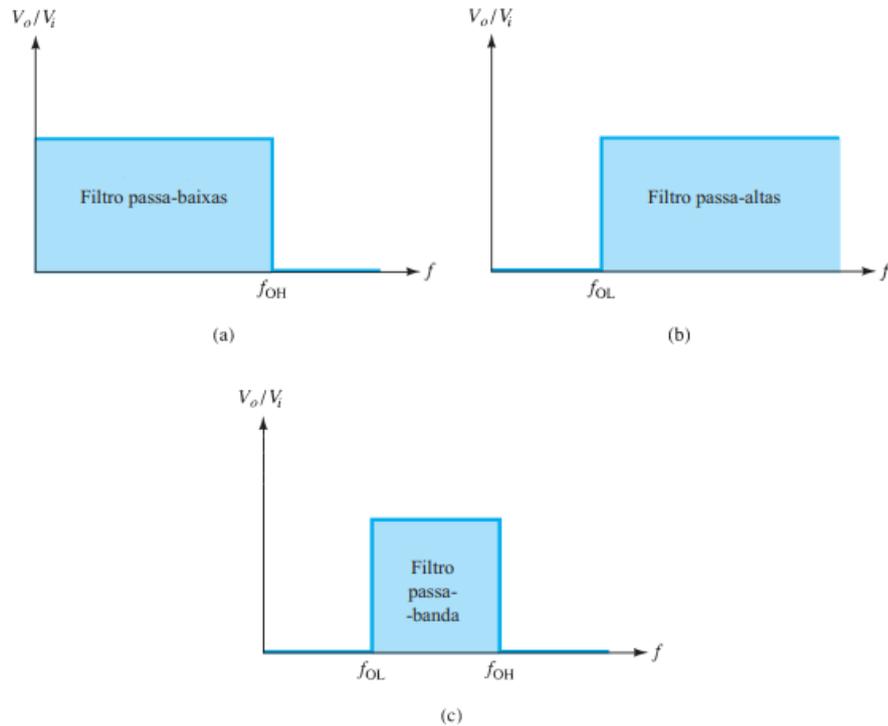
Podemos observar a resposta desse filtro na Figura 6(b), quando o circuito de filtro permite a passagem de sinais superiores de uma frequência de corte e inferiores a uma segunda frequência de corte, é denominado filtro passa-banda, como mostra a Figura 6(c).

Além disso, quando um filtro passa-baixas é formado apenas um único resistor e um capacitor, ele é chamado de filtro passa-baixas de primeira ordem, como o que vemos na Figura 7(a). Na Figura 7(b) mostra uma inclinação prática de -20 decibéis por década, diferente da representação do filtro ideal mostrado na Figura 6(a). O ganho de tensão abaixo da frequência de corte é constante em:

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

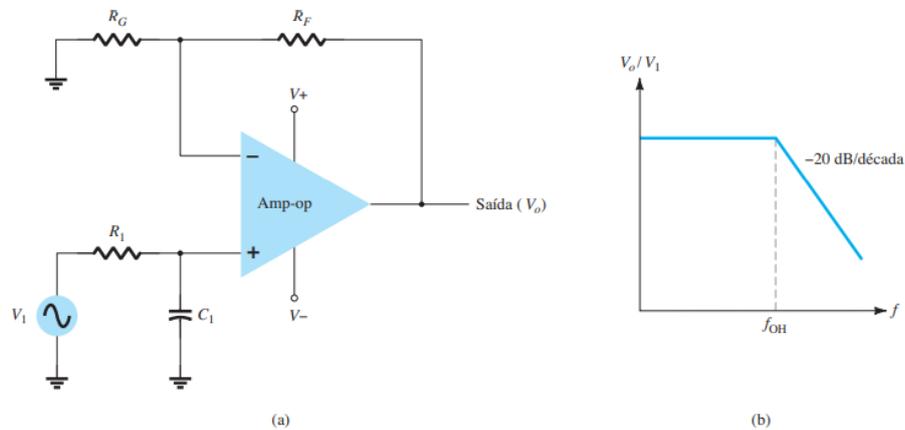
Fazendo a junção entre a saída de um filtro passa-baixas com a entrada de um filtro do mesmo tipo obtemos um filtro passa-baixas de segunda ordem como pode ser visto na Figura 8(a), com uma saída que apresenta inclinação prática de -40 decibéis por década mostrada na Figura 8(b), aproximando-se da característica ideal da Figura 6(a). O ganho de tensão do circuito e a frequência de corte são iguais tanto para o filtro de primeira, quanto o de segunda ordem, mas a resposta do filtro de segunda ordem cai a uma taxa mais rápida (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1984).

Figura 6 – Resposta ideal dos filtros: (a) passa-baixas; (b) passa-altas; (c) passa-banda.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (1984)

Figura 7 – Filtro passa-baixas ativo de primeira ordem e gráfico da resposta.

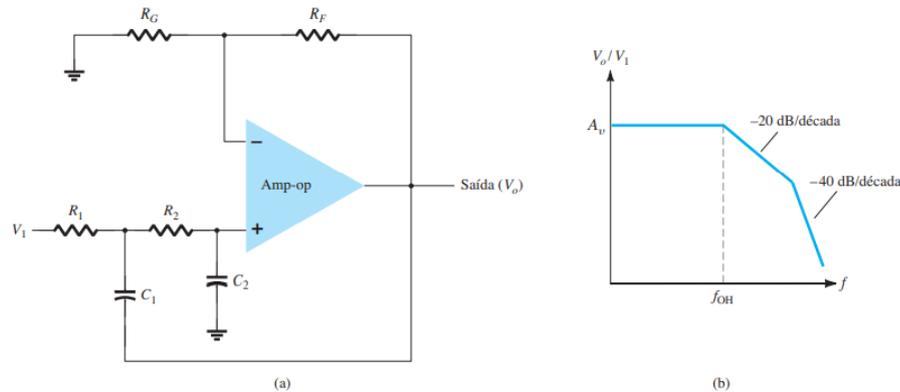


Fonte: Boylestad e Nashelsky (1984)

Da mesma forma acontece para o filtro passa-altas como podemos ver na Figura 9, e seguindo essa analogia podemos expandir os filtros para ordens mais elevadas, filtros mais complexos, atingindo uma resposta cada vez mais próxima do ideal.

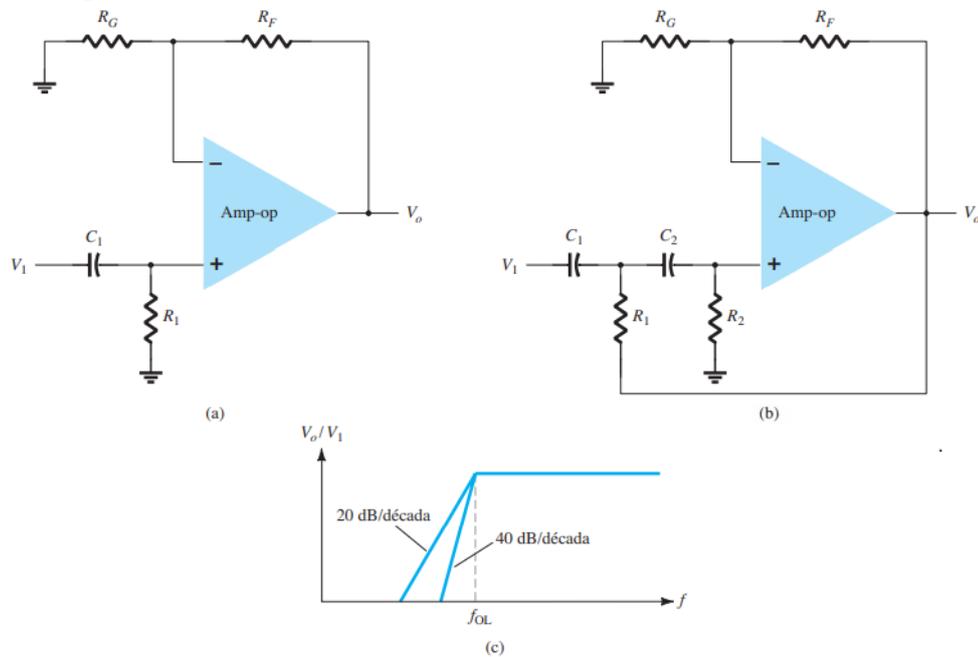
A Figura 10 exibe um filtro passa-banda composto dois estágios: o primeiro, um filtro passa-altas, e o segundo, um filtro passa-baixas, que quando combinados, resultam na resposta de um filtro passa-banda, filtrando apenas a faixa de frequência desejada (BOYLESTAD;

Figura 8 – Filtro passa-baixas ativo de segunda ordem e gráfico da resposta.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (1984)

Figura 9 – Filtro passa-altas: (a) primeira ordem; (b) segunda ordem; (c) gráfico da resposta.

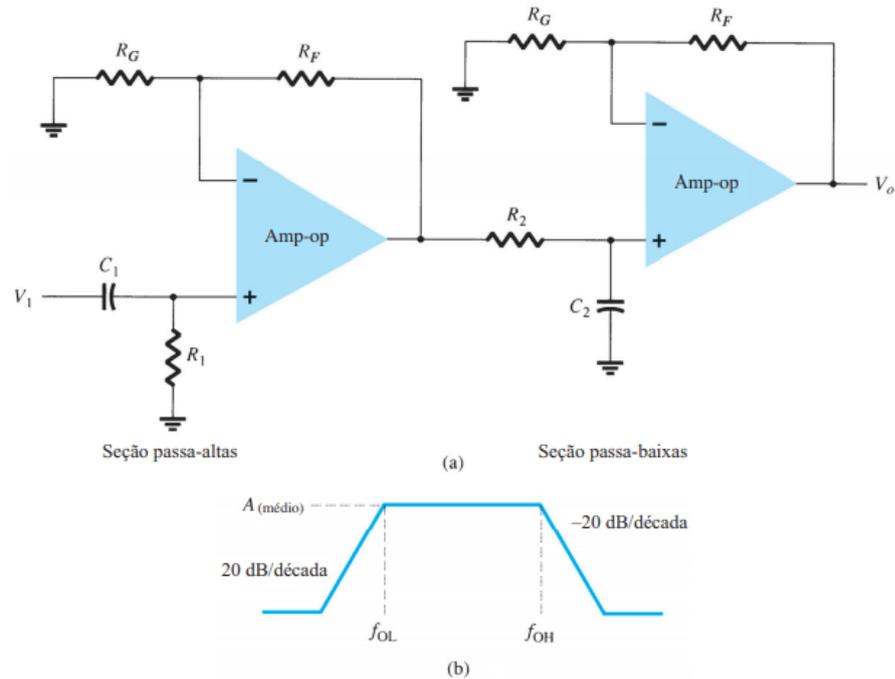


Fonte: Boylestad e Nashelsky (1984)

NASHELSKY, 1984).

Comparando os filtros passivos e ativos, temos algumas vantagens referentes aos filtros ativos, uma vez que há a possibilidade de amplificação elevada do sinal de entrada, mesmo quando o sinal de nível for muito baixo, é possível implementar de maneira simples a associação em cascata de estágios com a finalidade de projetar filtros mais complexos, além disso, dispensa o uso de indutores. Em contrapartida apresentam algumas limitações, tais como: necessidade de fonte de alimentação, a resposta em frequência se limita à capacidade de resposta dos próprios amplificadores operacionais e a impossibilidade de serem utilizados em sistemas de média e alta potência de níveis industriais (SASAKI; OSHIRO, 2013).

Figura 10 – Filtro ativo passa-banda e gráfico da resposta.



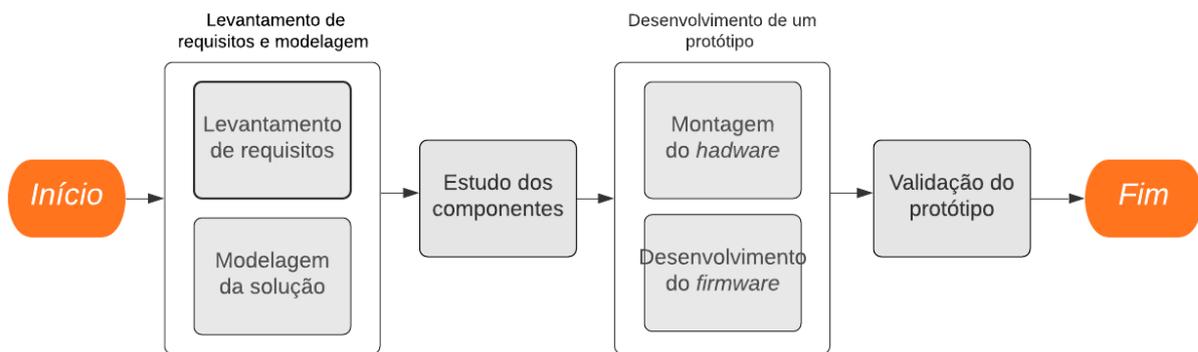
Fonte: Boylestad e Nashelsky (1984)

Dado todas essas informações, consideramos para este trabalho o uso dos filtros, uma vez que há a intenção de limitar determinadas frequências. Acredita-se que os filtros passa-altas, passa-baixas e passa-banda ativos sejam os mais indicados para a execução do trabalho proposto.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Com a finalidade de desenvolver o produto proposto durante este trabalho, neste capítulo, apresentaremos os passos executados para alcançar tal feito pro meio de um fluxograma. Na Figura 11 temos a sequência de passos realizados na execução do trabalho de acordo com a metodologia.

Figura 11 – Fluxograma dos procedimentos



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

É possível perceber que os procedimentos de Levantamento de requisitos e a Modelagem da solução, aconteceram de forma paralela, à medida em que os requisitos eram elicitados, a modelagem da solução era ajustada. Assim como, a Montagem do *hardware* e o Desenvolvimento do *firmware*, no qual os *hardwares* são empregados e testados tendo o *firmware* como base.

O detalhamento de cada passo apresentado no fluxograma será discutido no decorrer deste capítulo, partindo da Seção 4.1 com o levantamento de requisitos e a modelagem do sistema, seguindo a Seção 4.2 com o estudo de componentes físicos que irão compor o protótipo, continuando na Seção 4.3 que traz o desenvolvimento do protótipo e, por fim, a Seção 4.4 que trata sobre a validação do protótipo com deficientes auditivos.

4.1 Levantamento de requisitos

Primeiramente identificamos o ambiente no qual o produto será utilizado, os usuários-chaves, que nesse caso são as pessoas com deficiência auditiva ou, ainda para aqueles que não possuem a deficiência mas que queiram complementar a sensação ao ouvir música e, obter a aprovação dos participantes do teste para aplicação do método de observação. Na sequência foi realizada uma observação detalhada com o intuito de levantar informações a respeito das tarefas

de uso para o produto, após a observação de um ambiente real onde o sistema poderá ser utilizado foram levantados os requisitos para o sistema, na Tabela 1 são expostos os requisitos elicitados, nas colunas temos identificação de cada requisito, uma descrição curta e a sua prioridade. De forma que os Requisitos foram classificados com as seguintes prioridades:

- Essencial: é o requisito funcional indispensável ao funcionamento do sistema. Esse tipo de requisito deve ser implementado impreterivelmente, caso contrário, o projeto perderá sua utilidade;
- Importante: sem este requisito funcional, o sistema ainda é capaz de ser utilizado. Contudo, essa utilização ocorre de forma não satisfatória pelo cliente;
- Desejável: esse tipo de requisito poderá ser implementado em versões posteriores do sistema, visto que, mesmo sem a sua implementação, o sistema atende as suas funcionalidades básicas.

Tabela 1 – Requisitos levantados.

Identificação	Descrição	Prioridade
Realizar transdução	Transduzir música para vibração	Essencial
Vibrações distintas	Vibrar em diferentes frequências	Essencial
Confortabilidade	Ser confortável, não gera incômodos	Essencial
Portabilidade	Ser portátil em diferentes lugares	Importante
Alimentação por bateria	Realizar a alimentação com uma bateria de 9V	Desejável
Baixo consumo	Operar com consumo de energia moderado	Desejável

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

No levantamento de requisitos buscamos compreender quais são as necessidades do usuário que pretendemos atingir e verificar a viabilidade de implementar estas necessidades. De forma que, essas imposições levantadas devem ser consideradas durante todo o desenvolvimento do projeto.

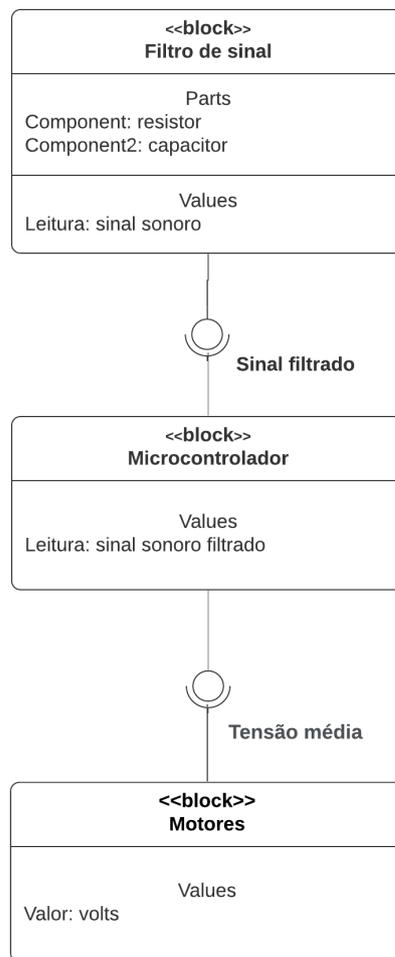
4.1.1 Modelagem da solução

A modelagem do sistema foi realizada no programa *Lucidchart*, ferramenta esta que possibilita várias opções de modelagem todos os tipos, inclusive *Unified Modeling Language (UML)*, é bastante intuitiva e tem diversas funcionalidades que facilitam a criação e visualização das modelagens do projeto, embora seja gratuita algumas funções específicas estão disponíveis apenas para assinantes.

Com a realização da etapa de levantamento de requisitos foi possível identificar

alguns componentes que seriam necessários para a composição do produto. A Figura 12 mostra os componentes através de um Diagrama de Blocos. O Diagrama de Blocos é uma representação que normalmente é utilizada por profissionais para conceder uma visualização de sistemas e suas diversas interações. São bastante úteis para criar uma visão geral de um sistema incluindo seus principais componentes, visualizando entradas e saídas, proporcionando um melhor entendimento das suas relações no sistema.

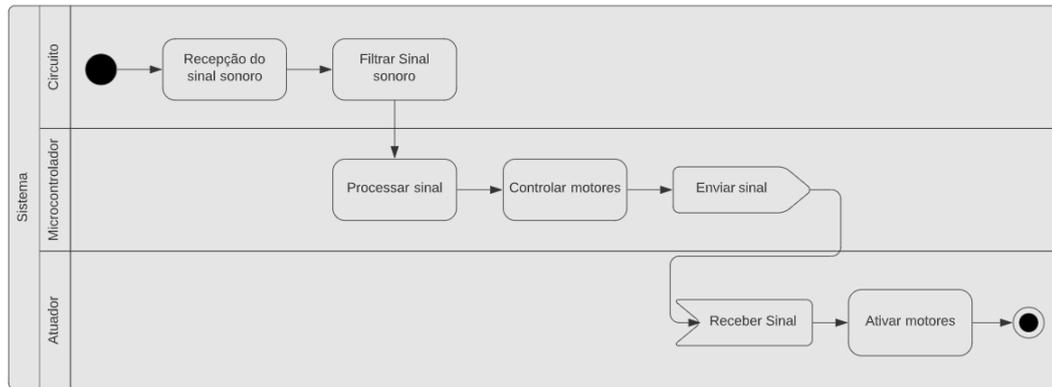
Figura 12 – Diagrama de Blocos



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Um Diagrama de Atividades é basicamente um gráfico de fluxo, exibindo o fluxo de controle de uma atividade para outra e sendo empregado para criar a modelagem de características dinâmicas do sistema. Com base no Diagrama de Blocos elaboramos um Diagrama de Atividades que ilustra de forma mais dinâmica o fluxo de controle e de dados da aplicação pretendida, como podemos observar na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de Atividades.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

4.2 Estudo dos componentes

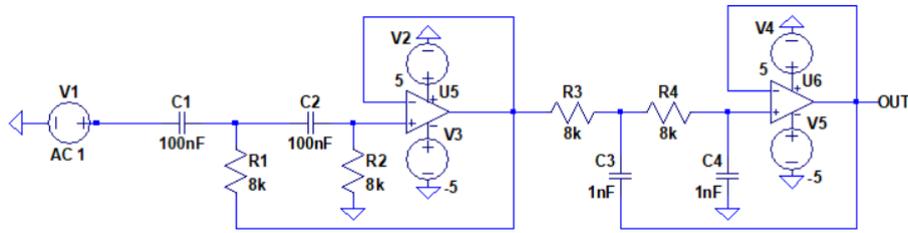
Feito o levantamento de requisitos e a modelagem do sistema, demos início ao estudo dos equipamentos viáveis para a compor o protótipo, analisando as possibilidades no que se refere à componentes, com discussões focadas no uso de atuadores e microprocessadores.

O estudo iniciou-se com a pesquisa de modelos de filtros que poderiam ser utilizadas no produto e como poderiam ser utilizados. Como foi visto anteriormente no Capítulo 3, os filtros ativos possuem os seguintes tipos: passa-baixas, passa-altas e passa-banda, além de obtermos a combinação entre ele e conseguir a configuração rejeita-banda. Os filtros foram considerados e estudados detalhadamente para que após a sua montagem seja possível filtrar determinadas frequências e estas correspondam de forma satisfatória para o que está sendo proposto.

Após verificarmos as necessidades do sistema proposto, consideramos que para realizar a filtragem do sinal de áudio de forma satisfatória, seria necessário a construção de no mínimo um filtro passa-faixa de segunda ordem e ganho unitário, montado de acordo com a topologia de simples implementação, *Sallen Key*. Para esta finalidade utilizamos a ferramenta *LTSpice®*, que é um *software* de simulação de alto desempenho da empresa Analog Devices, para a simulação do filtro que foi considerado, a fim de saber se os resultados obtidos nas simulações estavam de acordo com o esperado. Para a montagem do filtro usamos apenas resistores, capacitores, amplificadores operacionais e fontes de alimentação como mostra a Figura 14, os valores de seus componentes foram obtidos de acordo com as funções f_{OL} e f_{OH} , mostradas na Seção 3.4 que explica tais funções detalhadamente.

Dessa maneira, estabelecemos uma faixa de frequência para trabalharmos entre $200Hz$ e $20KHz$, uma vez que, de acordo com Silva *et al.* (2018), $250Hz$ é considerada a frequência de maior sensibilidade dos mecanorreceptores da pele, que são os receptores sensoriais

Figura 14 – Configuração do filtro passa-faixa no *LTSpice®*.

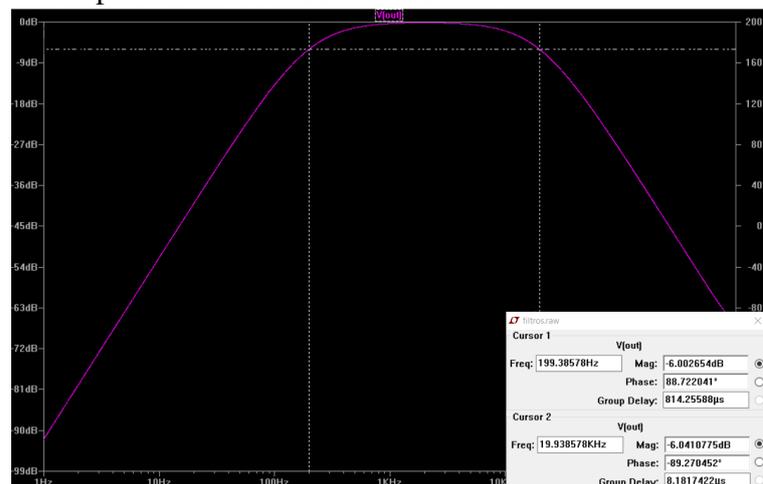


Fonte: Elaborada pelo próprio autor

que respondem a pressão ou outro estímulo mecânico no corpo. Logo, por conveniência, estabelecemos apenas números arredondados e iniciamos os testes a partir de 200Hz .

Objetivamos que seja permitida a passagem das frequências superiores à 200Hz e a atenuação da amplitude das frequências abaixo dessa frequência de corte, assim como, a passagem das frequências inferiores a 20KHz e a atenuação das frequências superiores à isto. Na Figura 15, é possível observarmos que esta configuração de filtro apresenta a curva característica de resposta, potência e inclinações dentro do esperado, como vimos na Seção 3.4.2. Vale lembrar que essa faixa de frequência foi estabelecida de forma ampla, com o uso de apenas um filtro, com a finalidade de conseguir realizar os testes de validação com diversos cenários, porém a aplicação de mais filtros pode ser considerada dependendo da segmentação de frequências desejadas.

Figura 15 – Gráfico de resposta apresentando curva característica do filtro passa-faixa de 200Hz a 20KHz .



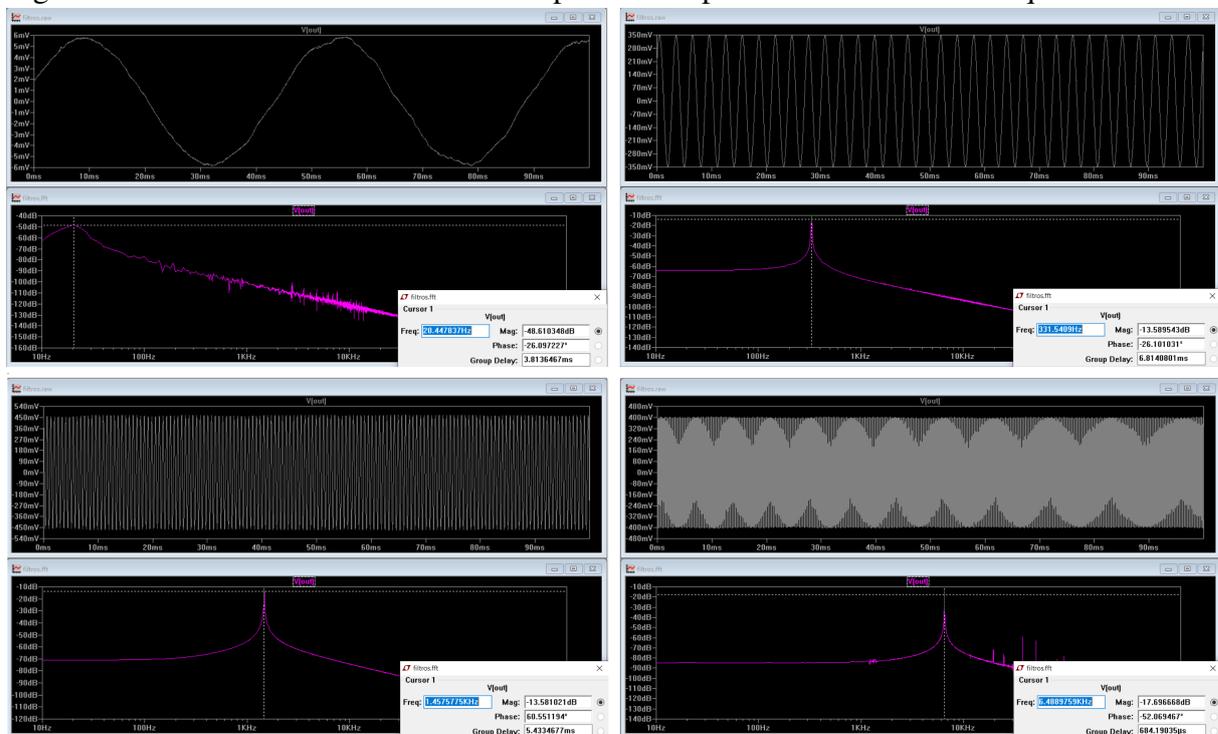
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A fim de sabermos se os resultados obtidos nas simulações estavam de acordo com as respostas do filtro projetado, implementamos de forma prática seguindo a estrutura simulada, utilizando os componentes básicos já mencionados com o auxílio de uma *Protoboard*, em bancada os testes foram comprovados com o uso de um osciloscópio.

De forma geral, para realizar o processamento do sinal filtrado, necessitamos do uso da *FFT*, que como estudamos anteriormente, esta essencialmente nos permite analisar quais frequências estão presentes em sinais analógicos e também nos mostra quais dessas frequências que são as mais dominantes.

Considerando sinal ideal de frequência única, a resposta da *FFT* independente do intervalo de amostragem será o mesmo. Dito isto, foram realizados alguns testes para ilustrar o comportamento a ser verificado com diferentes frequências, que podemos observar na Figura 16. Para os quatro exemplos temos um sinal muito próximo do ideal de frequência única e suas respectivas respostas no domínio da frequência.

Figura 16 – Sinais ideais e abaixo suas respectivas respostas no domínio da frequência.

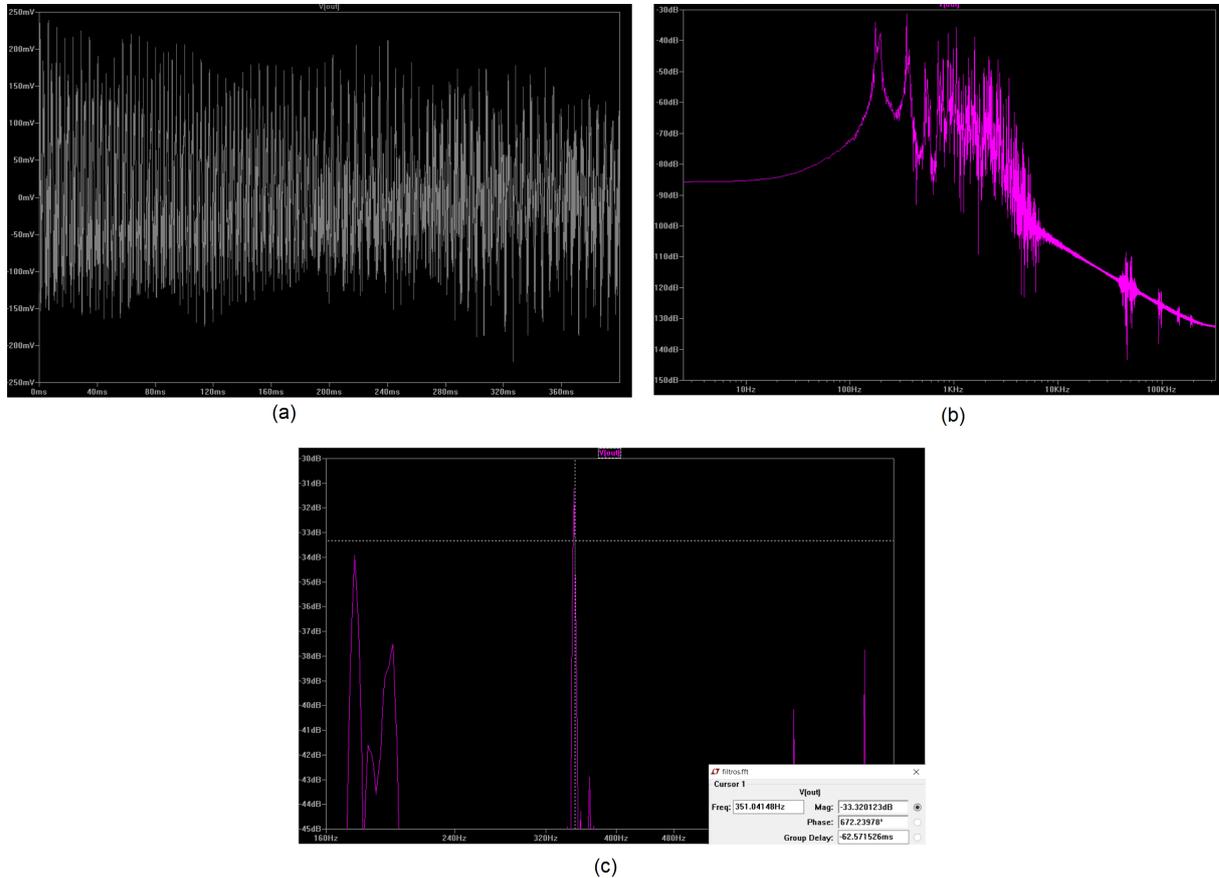


Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Analogamente ao processo anterior, porém com um sinal de áudio não ideal (como o sinal áudio de uma música), é necessário que se defina um intervalo de tempo para que possamos realizar a *FFT* e descobrir a frequência mais significativa do intervalo a partir da frequência de pico na resposta do sinal. Como a frequência de pico é a mais importante no intervalo definido, podemos abstrair as outras e defini-la como a frequência do intervalo. Observando a Figura 17(a), temos um exemplo de um sinal de áudio composto por diferentes frequências que, na Figura 17(b) tem-se a resposta da *FFT* sobre ele e na Figura 17(c) podemos observar de forma

aproximada o pico da resposta da *FFT*, onde é possível analisar que a frequência do intervalo é aproximadamente 351Hz.

Figura 17 – Sinal de áudio (a), resposta no domínio da frequência (b) e frequência dominante (c).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A partir do filtro pronto, partimos para o processamento do sinal de áudio filtrado no Arduino. Nesse ponto, detectamos uma limitação no quesito de processamento, no qual a taxa máxima de leitura de informações analógicas do Arduino UNO é de 10KHz e a faixa de frequência determinada para este trabalho tem como frequência máxima da 20KHz, conclui-se que o poder de processamento do Arduino UNO não é suficiente para a aplicação em questão.

Há ainda outras limitações, relacionadas a termos de memória e ao número de amostras, que nesse modelo tem no máximo 128 amostras, temos ainda pelo Teorema de Nyquist segundo Vanzella (2017), que a frequência de amostragem de um sinal, que aproxima os valores de um sinal analógico tomados em intervalos igualmente espaçados no tempo, deve ser no mínimo duas vezes o valor a frequência máxima alcançada pelo sinal analógico quando o sinal está livre de ruídos. Realizamos ainda testes com frequências inferiores a 5KHz, dada a restrição do *hardware*, para fins de validação com a biblioteca *arduinoFFT*, que apresentou resposta lenta

para cálculo com 128 amostras, portanto estabelecemos 64 amostras. Contudo, essa faixa de frequência retorna resultados pouco representativos para a validação da ideia levantada neste trabalho, logo foi desconsiderada.

Ainda de acordo com esse teorema, conseguimos assegurar a importância do filtro passa-faixa, para que a taxa de amostragem não venha a apresentar representações distorcidas, um vez que, a taxa de amostragem para sinal estabelecido seja maior a taxa de Nyquist, acontece um efeito denominado *aliasing*, resultando em uma representação incorreta da forma de onda. Uma vez que, o sinal “falso” irá se somar ao sinal original, corrompendo o sinal reconstruído, refazendo-o como algum sinal de baixa frequência, considerando o intervalo em que está operando no domínio das frequências.

Sendo assim, nesse ponto, devido a tal limitação não foi possível implementarmos o processamento do sinal com as frequências desejadas no microcontrolador disponível e para darmos continuidade ao projeto, por questões de tempo, baseados nos testes com frequências inferiores partimos do princípio que este ponto funciona para maiores frequências, e continuamos o trabalho com a finalidade de realizar os testes e validação utilizando frequências simuladas e mapeadas a partir das análises feitas no *LTSpice*®, dentro da faixa de frequência que havíamos definido anteriormente.

Uma vez que, o sinal de entrada foi amostrado e processado, como forma de transmitir estímulos táteis para a pele dos usuários, consideramos o uso de motores, que dependendo de suas configurações, são capazes de transformar um sinal de saída *PWM* em vibração.

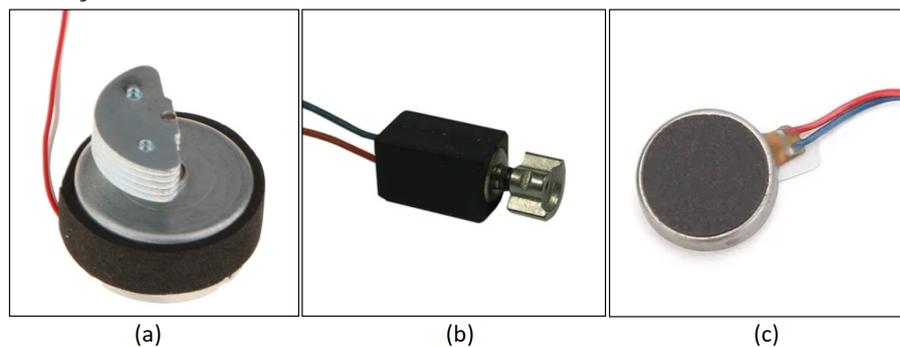
A partir de uma frequência especificada em *hertz* e um tempo de duração em milissegundos, a biblioteca `Tone()` é capaz de traduzir esses parâmetros em uma quantidade de transições que, associada a configuração de um *timer* e de suas interrupções, conseguem representar a frequência desejada em um nível de carga *PWM* correspondente. Caso o tempo de duração não seja especificado, o sinal de saída será reproduzido continuamente até que a função `noTone()` seja chamada e as frequências devem ser números inteiros positivos, com limitações mínima de 31Hz e máxima de 65535Hz para o Arduino UNO.

A biblioteca usa os temporizadores de *hardware* no microcontrolador para calcular a quantidade de transições necessária em um período de tempo e alternando a cada interrupção do *timer* gera os tons no formato de ondas quadradas. O temporizador é usado para estabelecer o *clock* da taxa de amostra e o *PWM* é usado para produzir um sinal de 8 *bits*. O número de tons que podem ser reproduzidos simultaneamente depende do número de temporizadores, que no

caso do Arduino UNO é possível utilizar três (0, 1 e 2).

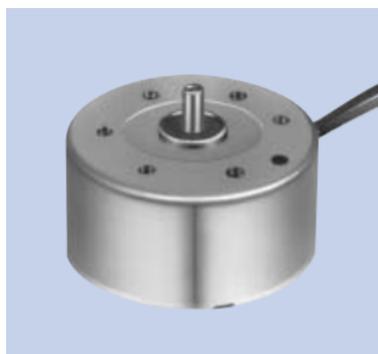
Durante o estudo sobre os atuadores, foram levantadas algumas opções, porém por falta de referências sólidas sobre alguns ou por não conseguir formas de desbalancear outros da maneira que o estudo pretendia, a Figura 18 mostra alguns dos motores estudados. Na Figura 18(a), um motor desbalanceado utilizado internamente em controles de jogos, porém não foi possível encontrar informações consistentes sobre as especificações do mesmo, logo, não pode ser implementado na solução. Os motores apresentados na Figura 18(b) e na Figura 18(c) não demonstraram desempenhos satisfatórios nos testes, logo optamos por utilizar dois motores idênticos do modelo RF-300FA-12350, que usualmente são usados em aparelhos de CD e DVD, mostrado na Figura 19.

Figura 18 – Motores estudados: (a) e (b) desbalanceados; (c) motor de vibração 1027.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Figura 19 – Motor DC RF-300FA-12350.



Fonte: (MABUCHI MOTOR, 2021)

Para esse trabalho iremos provocar um desbalanceamento nos motores, implementaremos pesos diferentes à haste giratória do motor, permitido dessa forma que este motor seja capaz de vibrar, para que assim possamos alcançar um dos requisito do sistema que é gerar

diferentes sensações. Buscamos desse modo, mesmo que haja igualdade nas frequências entre os motores as sensações sentidas pelo usuário do sistema ainda sejam diferentes. Esse modelo de motor apresenta características que estão detalhadas na Figura 20.

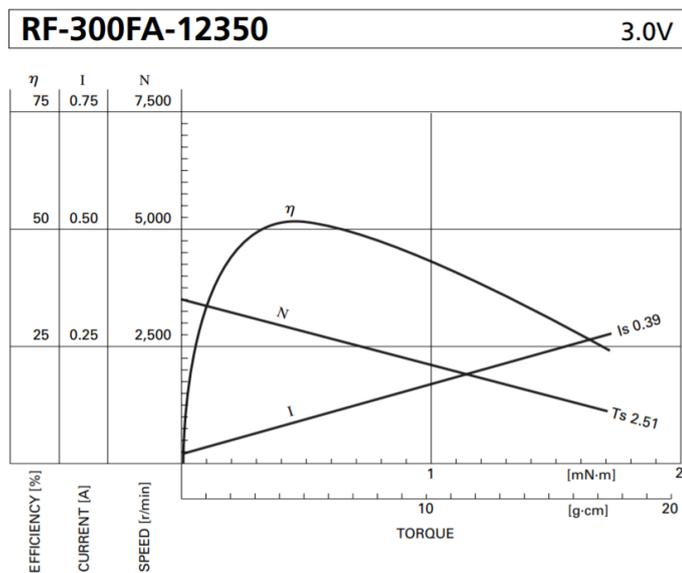
Figura 20 – Característica do motor RF-300FA-12350.

Tensão		Sem carga		Com carga máxima				Stall (paragem repentina do motor)			
Faixa de operação	Nominal	Velocidade r/min	Corrente A	Velocidade r/min	Corrente A	Binário		Potência de saída W	Binário		Corrente A
1.5 - 6.0	3V	3500	0.022	2830	0.093	0.48 mN.m	4.9 g.cm	0.14	2.51 mN.m	26 g.cm	0.39

Fonte: (MABUCHI MOTOR, 2021)

Com a análise das informações da Figura 20, podemos verificar que os parâmetros essenciais ao funcionamento desse modelo de motor são: o binário nas situações de carga ou ausência de carga, a velocidade, a tensão nominal, a potência de saída e a corrente consumida para cada uma das situações. A partir desses parâmetros mostrados no quadro de especificações temos as curvas características do mesmo, mostradas na Figura 21, observando ainda nesta figura, podemos identificar de forma teórica os limiares de funcionamento do motor. Estas curvas fazem relação do valor do binário com os parâmetros do motor, de maneira que seja possível saber qual intervalo de funcionamento onde há uma maior eficiência.

Figura 21 – Curva característica do motor RF-300FA-12350.



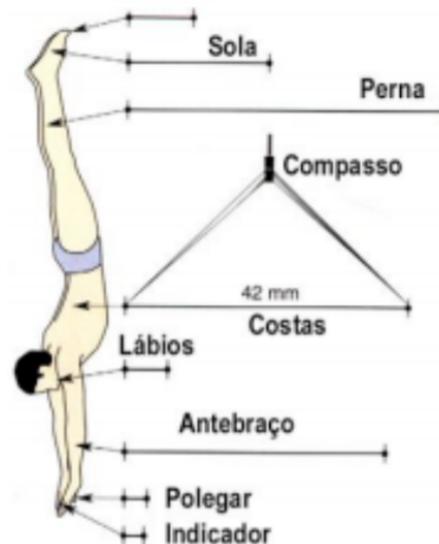
Fonte: (MABUCHI MOTOR, 2021)

Portanto, por meio da verificação da Figura 21, notamos que para situação de tensão

nominal em 3.0V, com a carga máxima a eficiência é maior para o binário de 0.48 mN.m, correspondente a uma velocidade de aproximadamente 3000 rotações por minuto e a uma intensidade de corrente de aproximadamente 0.1 A, valores que coincidem com os valores apresentados no quadro. Dessa forma, percebemos que a eficiência máxima do motor não equivale aos valores máximos de velocidade e de corrente.

A identificação do melhor local do corpo humano para o posicionamento dos motores partiu de um estudo onde, segundo Silva *et al.* (2018) é possível identificar que quanto maior a capacidade de resolução espacial do local do corpo maior deve ser a distância entre os pontos que irão emitir os estímulos à pele. Na Figura 22, podemos observar o menor afastamento que deve haver entre dois estímulos para que sejam perceptível pelo tato, medidos em milímetros, como exemplo, as costas com 42 milímetros medidos por um compasso.

Figura 22 – Discriminação seletiva entre dois pontos na superfície corporal.



Fonte: (SILVA *et al.*, 2018)

Embora a sensibilidade do antebraço não seja considerada uma das maiores quando comparada com outras partes do corpo, optamos por produzir um protótipo com o formato de um bracelete. Uma vez que, a instalação de um dispositivo com variação de vibrações nas áreas consideradas com maior sensibilidade como mão, rosto e pés, causaria inconvenientes práticos durante a utilização do dispositivo. Considerando essas informações definimos a utilização inicial de dois motores, colocados com distância de 4 centímetros, já que para o antebraço essa é a distância mínima de acordo com (SILVA *et al.*, 2018).

Após alguns testes e comparações foi possível identificar que o material utilizado

para a confecção do bracelete tem forte influência nas sensações que o usuário sente, uma vez que, ao acoplar os motores em materiais mais rígidos o *feedback* da vibração não era tão perceptível quanto as sensações sentidas quando os motores eram colocados em materiais finos e flexíveis. Sendo assim, consideramos o uso de tecidos ou materiais maleáveis para a confecção do bracelete, proporcionando também maior conforto ao usuário.

Ao fim do estudo foi possível identificar exatamente quais destes componentes deverão compor o dispositivo proposto, que combina um bracelete com atuadores de vibração. Para que as informações sejam processadas, teremos uma plataforma embarcada que junto ao bracelete, controla e realiza o processamento de sinais de áudio. Os sinais de áudio deverão ser processados, analisados e separados em diferentes frequências, de acordo com a variação da frequência os atuadores vibram, passando para o usuário a sensação de sentir a música. Os componentes selecionados estão listados no próximo tópico.

4.2.1 Componentes Escolhidos

Após o estudo realizado nesta seção e a disponibilidade de equipamentos, os principais componentes selecionados para a montagem de um protótipo para este projeto são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Componentes definidos para o protótipo.

Componente	Descrição	Uso
ATmega358	Microprocessador	Controle do sistema
RF-300FA-12350	Motor <i>DC</i>	Controle de vibração
Lm324n	Amplificador Operacional	Amplificação
Capacitores	Capacitores cerâmicos	Armazena cargas elétricas
Resistores	Resistores ôhmicos	Controla a passagem de corrente elétrica
<i>Protoboard</i>	Placa de ensaio	Construção de circuitos experimentais

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Todos os componentes foram escolhidos de forma que desempenhem o papel esperado para o protótipo, porém, em razão da situação de isolamento social devido às restrições impostas por conta da pandemia da COVID-19, estes foram selecionados por conta da disponibilidade do momento.

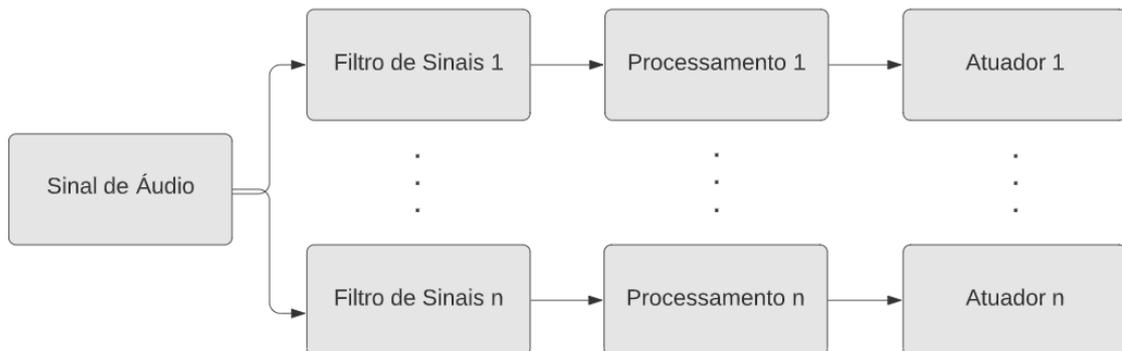
É importante lembrar que o microprocessador ATmega328P está vinculado à uma placa Arduino UNO, uma plataforma de prototipagem ao qual disponibiliza uma *IDE* própria, proporcionando assim, uma maior facilidade no desenvolvimento do *firmware* do protótipo, uma

vez que, ao conectar-se ao *hardware* do Arduino, é possível fazer *uploads* de programas e a comunicação entre *hardware* e *software*. O Arduino *IDE* possui um editor de texto para a escrita de código para uma linguagem de programação própria baseada em C/C++, console de texto e uma barra de ferramentas com botões para diversas funções e menus.

4.2.2 Diagrama de blocos

Ao escolher os dispositivos que farão parte do sistema, elaboramos um diagrama inicial para melhor entendimento do sistema proposto, como podemos ver na Figura 23. No qual dispõe de quatro blocos: Sinal de Áudio, Filtros de Sinais, Processamento e Atuadores.

Figura 23 – Diagrama de blocos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Cada bloco representa uma parte, cada uma com configurações e atuação específica. De forma que sinal de áudio é captado por meio do conector de saída de áudio do tipo monofônico, limitando apenas um canal para que possamos aplicar os filtros. Dado esse sinal, temos a entrada para os filtros ativos que foram projetados, estabelecendo um limite máximo em que as frequências deverão ser cortadas de acordo com suas configurações, passa-faixa. As frequências extraídas do sinal de entrada entrarão nas portas analógicas do Arduino, todas as informações são passadas do Arduino para o microcontrolador que realiza o processamento do sinal, transformando o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, enviando a resposta para as portas de saída *PWM* do Arduino que fazem um mapeamento para representar a frequência através da tensão média, e por fim, temos as duas saídas que são enviadas para os atuadores, fazendo dessa forma com que os motores girem e produzam a vibração.

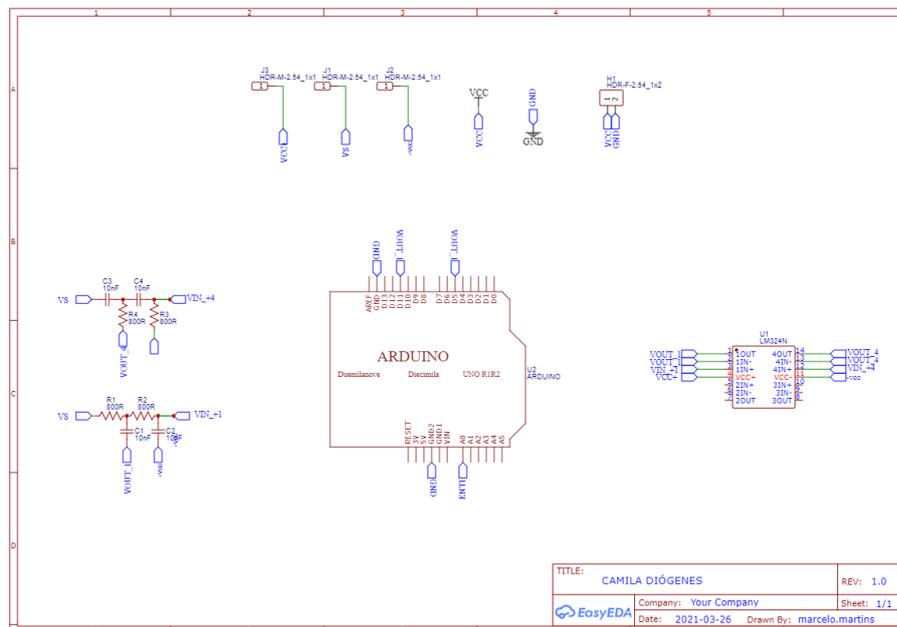
4.3 Desenvolvimento de um protótipo para a transmissão de música por meio de estímulos táteis

Após o estudo dos componentes que podem fazer parte do projeto, sabemos quais atuadores são capazes de realizar a transdução de sinais de áudio em vibrações perceptíveis ao tato, bem como, todos os componentes de *hardware* que o projeto requer. Sendo assim, é iniciado o desenvolvimento de um protótipo, que entre outras coisas, será importante para analisar o comportamento dos atuadores e realizar ajustes nas rotinas de saída, testados individualmente, e por fim será realizado o teste de integração com todos os componentes. Este procedimento foi dividido em duas etapas: montagem do *hardware* e o desenvolvimento do *firmware*.

4.3.1 Montagem do hardware

O circuito base utilizado no protótipo pode ser analisado no esquemático da Figura 24, onde mostra as conexões feitas entre a placa Arduino UNO e os demais componentes e alimentações.

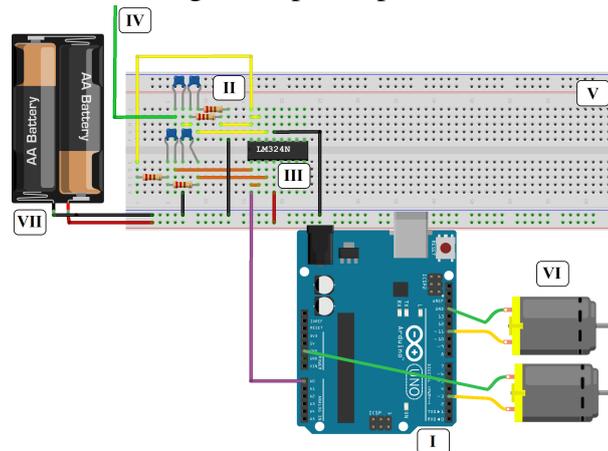
Figura 24 – Esquemático do protótipo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Com a seleção de componentes do sistema concluída, foi realizada a ligação eletrônica dos componentes. Na Figura 25 é possível verificarmos como o protótipo foi montado, onde temos Arduino UNO (I) e suas ligações com os componentes.

Figura 25 – Montagem do protótipo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Vale ressaltar o uso de Filtros Ativos (II) utilizando o amp-op Lm324n (III), responsáveis por limitar as frequências do sinal de entrada (IV) até um limiar conhecido, a saída do filtro está conectada a uma das portas analógicas do Arduino, todos conectados a uma *Protoboard* (V). Para que os motores desbalanceados(VI) produzam vibração, basta ligá-los em portas de saída *PWM* do Arduino e a um sinal de *ground*. A fonte (VII) é necessária devido a utilização de componentes ativos.

4.3.2 *Desenvolvimento do Firmware*

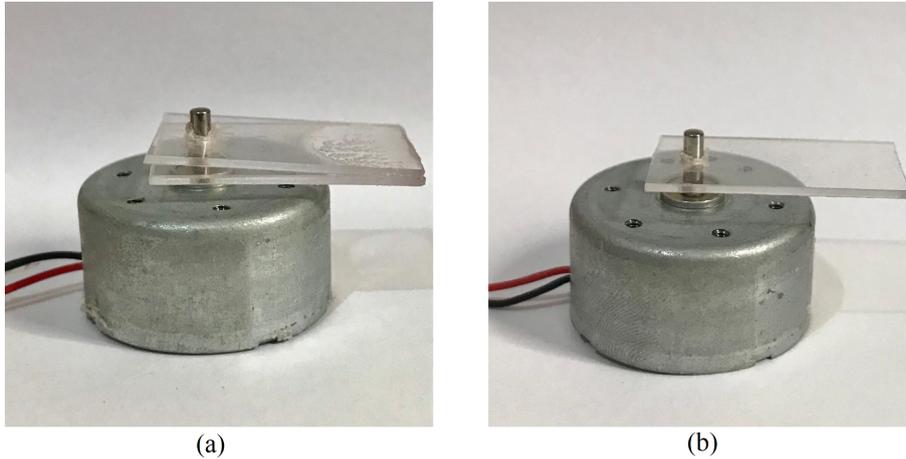
Com todo o circuito montado e devidamente funcionando, a etapa seguinte é a implementação do *firmware* que deve estar em concordância com o *hardware* montado e os requisitos do produto. É necessário a utilização de códigos para que o programa funcione da forma esperada para esse trabalho.

Utilizamos a *IDE* do Arduino para o desenvolvimento do *firmware*, com a finalidade de fazer o processamento dos sinais lidos pelas portas analógicas e previamente filtrados. Após o processamento do sinal analógico o resultado é mapeado em faixas de frequências previamente estabelecidas e isso corresponde a um sinal de resposta definido para aquela faixa de frequência no qual é passado para as portas de saída *PWM* que realizam o controle dos motores de acordo com as variações de frequências recebidas. Visto a limitação de leitura e processamento encontrada durante o estudo, o desenvolvimento do *firmware* foi adaptado de forma que as frequências foram simuladas objetivando a viabilidade dos testes.

4.3.3 Protótipo

Nesta Seção mostraremos os componentes que irão compor o protótipo criado, que foi utilizado para realização dos testes e verificação dos resultados.

Figura 26 – Motores desbalanceados: (a) Motor A e (b) Motor B.

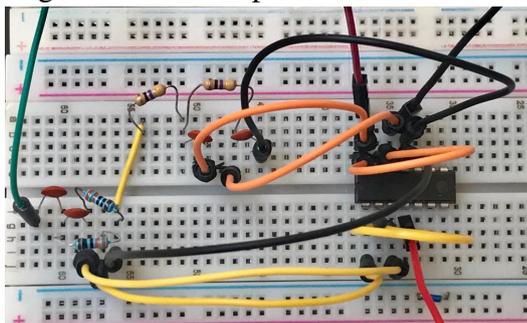


Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Figura 26 mostra os motores utilizados para o protótipo, dois motores idênticos do modelo RF-300FA-12350 com uma adaptação de pesos. Além do desbalanceamento, mudamos os pesos de cada motor, onde o motor da Figura 26(a) possui o dobro do peso adicionado ao motor 26(b). Para que dessa forma, mesmo que obtenhamos frequências similares ou iguais entre os motores, as sensações sentidas pelo usuário do sistema ainda sejam diferentes.

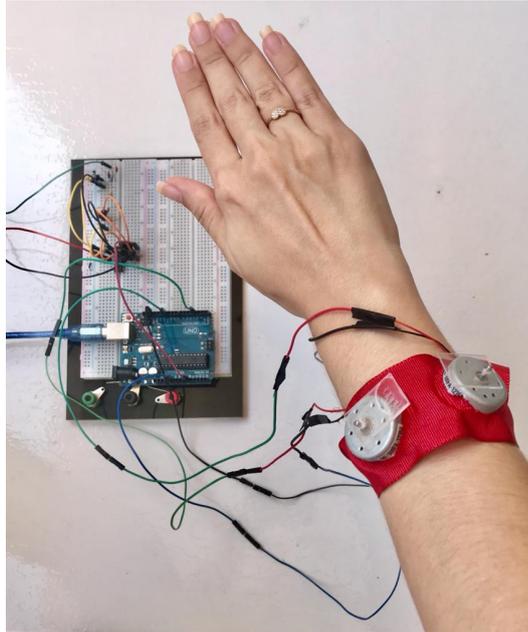
Na Figura 27 temos a forma como o filtro passa-faixa foi montado na *Protoboard*, sua saída é diretamente ligada ao pino de entrada analógica do Arduino, onde o sinal será processado, mapeado para a frequências e enviado para as portas de saída *PWM*, que são encarregadas por enviar esses sinais para os motores, de forma que os motores vibrem de acordo com a variação do sinal de entrada. Na Figura 28 podemos ver o protótipo idealizado completamente montado.

Figura 27 – Filtro passa-faixa montado.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Figura 28 – Protótipo montado.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Um ponto importante a ser ressaltado neste trabalho, é maneira de como os motores reagem ao sinal de entrada, de forma que ao passar um sinal sonoro diretamente para um meio digital considera-se a intensidade para gerar a tensão, nesse caso, a intensidade está diretamente relacionada ao volume do som, usada para determinar o corte do sinal, o que implica em resultados não representativos.

Porém, ao realizarmos a análise do sinal no domínio da frequência, a variação passa a ser dada puramente por meio da frequência, e com o uso do *PWM* é possível alterar a tensão média passada para os motores de acordo com tal variação. Assim, à medida em que a frequência diminui a rotação do motor é alterada, visto que, a tensão passada para ele diminuiu, da mesma forma acontece com a identificação de frequências maiores, o motor tende a girar mais rápido de forma que a tensão passada para ele será maior.

No capítulo seguinte, 5, serão apresentados os dados dos testes e a análise dos resultados, os dois últimos pontos que completam a metodologia abordada neste projeto.

4.4 Validação do protótipo de transmissão de música por meio de estímulos táteis com deficientes auditivos

Para a validação serão realizados alguns testes após a montagem do *hardware* e implementação do *firmware*, de modo a verificar se o protótipo necessita de melhorias ou se está funcionando em totalidade de acordo com o que foi proposto em sua modelagem.

Alguns testes a serem realizados são testes de desempenho das funções para as quais foi projetado, por exemplo, se está captando o som e transmitindo-o em forma de vibração de acordo com os parâmetros de frequência. Teste de funcionalidade dos componentes que o integram de forma conjunta para saber se o produto está funcionando adequadamente.

Ainda no quesito de validação, teremos a realização dos testes de usabilidade, com o objetivo de verificar a percepção dos deficientes auditivos com relação ao protótipo, constatando-se a necessidade de ajustes e melhorias nos atuadores, possibilitando ao indivíduo a capacidade de sentir a música como é proposto no objetivo geral deste trabalho.

4.4.1 *Teste de Usabilidade*

Para avaliar o sistema proposto, utilizaremos o método de avaliação por observação que permitem coletar dados sobre situações reais de uso, avalia a usabilidade a partir de observações de experiências de uso, para identificar problemas que os usuários enfrentaram em Interação Humano-Computador, descrito por Barbosa e Silva (2010). com esse método permite que o avaliador faça a captação de dados sobre situações em que os participantes do teste efetuam suas atividades, podendo ou não ter apoio tecnológico.

A Figura 29 apresenta um quadro com as etapas utilizadas para a realização de um teste de usabilidade.

Figura 29 – Atividades do teste de Usabilidade

teste de usabilidade	
atividade	tarefa
Preparação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ definir tarefas para os participantes executarem ▪ definir o perfil dos participantes e recrutá-los ▪ preparar material para observar e registrar o uso ▪ executar um teste-piloto
Coleta de dados	<ul style="list-style-type: none"> ▪ observar e registrar a performance e a opinião dos participantes durante sessões de uso controladas
Interpretação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ reunir, contabilizar e sumarizar os dados coletados dos participantes
Consolidação dos resultados	
Relato dos resultados	<ul style="list-style-type: none"> ▪ relatar a performance e a opinião dos participantes

Fonte: Barbosa e Silva (2010)

Para o sistema que proposto neste trabalho, avançaremos de acordo as atividades exibidas no quadro. É importante salientar que todos os resultados obtidos nos testes serão analisados para que seja possível obtermos os índices de desempenho do protótipo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os dados de testes realizados no protótipo criado para este projeto e os resultados obtidos.

Para fins de avaliação, foram realizados experimentos que pudessem verificar as funcionalidades e os possíveis aspectos de melhoria no protótipo proposto. Devido às restrições impostas pela pandemia do COVID-19 os experimentos tiveram suas limitações de testes, visto que não foi possível realizar testes com deficientes auditivos. Sendo assim, os experimentos foram realizados com cinco voluntários que não apresentam nenhum tipo de deficiência, de ambos os sexos e idades variando de dezenove à trinta anos. Os critérios para participação da validação foi possuir idade mínima de dezoito anos e que não apresentar dificuldade motora.

Para que os experimentos ocorressem da melhor forma, preocupações éticas foram consideradas. Na primeira etapa, os usuários foram instruídos sobre a pesquisa e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) que está disponível no Anexo I, que orientava como seria o experimento. Além disso, por conta da pandemia da COVID-19, foram tomadas todas medidas cabíveis sobre as questões de distanciamento, assim como, a utilização de máscaras, álcool em gel e a higienização do dispositivo.

Os participantes foram orientados a interromper o experimento a qualquer momento, uma vez que, se sentissem inseguros ou desconfortáveis. Cada participante executou uma sessão de teste, com duração máxima de 20 minutos, tempo correspondente para testar o sistema proposto. Foi utilizado como critério de finalização do teste quando todos os itens do roteiro da avaliação fossem executados.

Todos os experimentos realizados com o protótipo ocorreram em ambientes controlados, locais residenciais. Para a validação da ideia proposta neste trabalho, simulamos diversas situações de comparação entre duas frequências, a fim de verificar se a pesquisa levantada até esse momento tem fundamentação prática. As frequências utilizadas nos testes foram previamente mapeadas para que as limitações impostas pelo Arduino UNO não interferissem na validação da ideia.

Durante os experimentos os participantes não usaram nenhum outro adereço no braço, permaneceram sentados e fizeram o uso do protótipo na parte externa do antebraço, no qual sentiram por meio da vibração dos motores as diferentes frequências. Tais frequências foram comparadas por pares distintos ou semelhantes, ambas com durações iguais de 0,5 (meio) segundo, de forma que os motores vibram alternadamente. Desse modo, o participante realizava

a comparação entre as duas frequências e dizia se conseguia identificar a diferença entre as sensações sentidas a cada teste ou não.

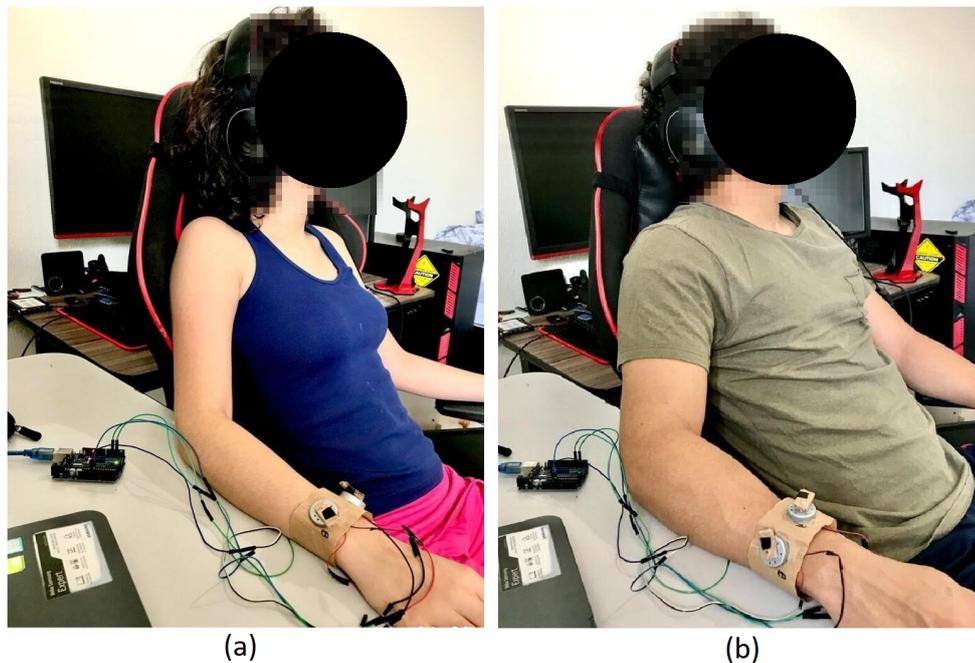
O objetivo dessa avaliação buscou além de estimar se os participantes seriam capazes de sentir diferentes vibrações de forma tátil, validar ainda a ideia do desbalanceamento dos motores com pesos diferentes, a fim de que os participantes consigam sentir diferentes sensações ainda que as frequências sejam idênticas.

Com base nas abordagens levantadas na Seção 4.4 deste trabalho, os experimentos foram divididos nas seguintes etapas:

- Explicações: o avaliador esclarecia o objetivo do projeto e a forma que avaliação seria realizada, deixando claro que os dados colhidos durante a avaliação serão exclusivamente para fins acadêmicos. Assim como, foi solicitado aos participantes a assinatura do TCLE;
- Observação: o avaliador observa os usuários e anotava suas percepções sobre a variação das frequências;
- Entrevista pós-teste: os participantes respondiam perguntas de um questionário curto semi-estruturado e davam seus *feedbacks* sobre a tecnologia.

Os usuários concluíram o teste de observação em média em 15 minutos. Notou-se que os usuários não demonstraram nenhuma dificuldade para a utilização da tecnologia. As Figuras 30(a) e 30(b) apresentam momentos dos teste de observação.

Figura 30 – Momentos do Teste de Observação.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Para uma melhor avaliação, durante os experimentos, os usuários tiveram os ouvidos tapados por um fone de ouvido com almofadas acolchoadas, com a finalidade de diminuir os sons externos, os fones estavam desligados, o uso era apenas uma forma para que os ruídos emitidos pelos motores não causasse nenhum impacto nas respostas durante a avaliação. Outra medida tomada foi a condição de manter o braço em que o protótipo foi colocado fora da área de visualização do usuário, para que a observação do motor também não viesse a interferir nos resultados. Seguindo a orientação, os participantes além de manterem-se com a cabeça virada para o lado oposto ao braço em que estava o protótipo, ainda fecharam os olhos para evitar qualquer contato visual.

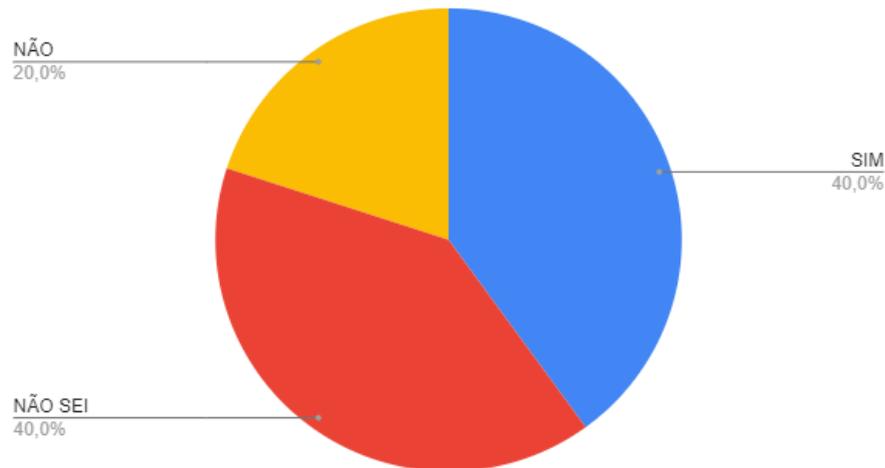
Em relação à usabilidade do protótipo foi bem simples, uma vez que, realizamos apenas uma análise para a validação da ideia levantada durante o estudo. Vale ressaltar que durante o uso, um dos cinco participantes relatou sentir uma sensação de arrepio pelo braço em determinadas variações de frequências. Assim como, foi perceptível que na comparação de algumas frequências todos os usuários foram muito convictos em suas respostas.

Os usuários foram submetidos a 30 comparações em 60 testes, onde todas as comparações foram refeitas pelo menos uma vez, para que assim, tenhamos dados mais expressivos sobre a finalidade desta apuração.

Praticamente todas as comparações feitas durante o experimento apresentaram resultados iguais ou superiores à 50%, onde os usuários conseguiram identificar a variação de frequências, com exceção apenas de uma comparação que apresentou apenas 40% de respostas positivas, outros 40% não tinham certeza sobre a variação e 20% não sentiram diferença alguma, é analisar melhor o resultado na Figura 31. Esse teste comparou frequências com 200Hz no motor A e 400Hz no motor B, sendo assim, este foi o que mais apresentou respostas distintas, e por vezes parecia confundir o participante.

Em contrapartida, em 20 das 30 comparações predeterminadas, obtivemos resultados iguais ou superiores à 80% de respostas positivas quanto a identificação da diferença entre as frequências, dentre as quais os 20% restantes não conseguiram sentir diferença entre as vibrações ou não souberam responder. Dessas, 6 comparações não houveram dúvidas entre os participantes, os mesmos conseguiram identificar a diferença entre as vibrações em 100% das vezes. Para melhor análise desses dados, podemos observar na Tabela 3 as comparações entre as frequências de cada motor e suas respectivas porcentagens de respostas positivas em que os participantes conseguiram identificar a diferença entre as vibrações.

Figura 31 – Identificação de diferenças entre 200Hz e 400Hz.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Tabela 3 – Testes com grandes taxas de respostas positivas.

Motor A	Motor B	Porcentagem de respostas positivas
200 Hz	200 Hz	80 %
200 Hz	1 KHz	80 %
500 Hz	800 Hz	80 %
1 KHz	500 Hz	80 %
12 KHz	14 KHz	80 %
500 Hz	5 KHz	80 %
10 KHz	10 KHz	80 %
12 KHz	6 KHz	80 %
2 KHz	2 KHz	90 %
2 KHz	6 KHz	90 %
5 KHz	500 Hz	90 %
15 KHz	1 KHz	90 %
20 KHz	15 KHz	90 %
20 KHz	900 Hz	90 %
1 KHz	200 Hz	100 %
800 Hz	500 Hz	100 %
800 Hz	18 KHz	100 %
900 Hz	10 KHz	100 %
1 KHz	15 KHz	100 %
6 KHz	2 KHz	100 %

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Ao fim do teste, realizamos uma breve entrevista para extrair ainda mais informações dos participantes. Nenhum dos participantes se sentiu incomodado pelo protótipo durante os testes, embora o Participante 1 tenha relatado que: "Acredito que com o uso por um tempo mais demorado as funções táteis do braço se adaptem aos motores e a diferença entre as vibrações não fiquem tão aparentes, mas é uma sensação interessante". O Participante 2 ao sentir determinadas

variações de frequências sentiu um arrepio em todo o braço em que o protótipo atuava, na entrevista ele relatou: "Não é uma sensação ruim, mas é algo que parece atingir um ponto sensível do meu corpo".

Pelo fato dos experimentos terem sido realizados com pessoas distintas, observamos também a variação no que diz respeito aos pelos de cada braço, temendo que isto pudesse afetar a experiência do usuário. Durante a observação não notamos nada nesse sentido, ao indagar sobre isto com os participantes tivemos as seguintes respostas: Participante 1: "Talvez os pelos atrapalhem de certa forma eu não tenha conseguido sentir da mesma forma que pessoas com poucos pelos"; Participante 2: "Não acho que os pelos tenham tanta diferença, já que tenho poucos pelos, mas acho que a área interna do braço possui maior sensibilidade e as sensações sejam mais eficientes"; Participante 3: "Creio que as sensações são as mesmas, tenho pelos mas senti tudo que foi proposto"; Participante 4: "Tenho o braço bastante peludo e pelo contrário, acredito que a quantidade de pelos não atrapalha, de certa forma acredito que os pelos deixe a sensação da vibração ainda mais intensa" e por fim o Participante 5: "Tenho poucos pelos no braço, mas algumas vibrações não foram tão evidentes, quase não as senti, talvez essa parte do meu corpo não seja tão sensível à vibração".

De forma unânime todos os participantes comentaram sobre a diferença entre algumas vibrações serem muito mais fáceis de identificar do que outras. Como considerações gerais, o Participante 5 comentou que: "Seria interessante que essas sensações fossem divididas nos dois braços, talvez a diferença de sensações pudesse ser ainda melhor".

Ao serem questionados sobre o interesse de usar um equipamento como este, porém com mais atuadores, conseqüentemente com ainda mais sensações de vibrações, seguindo um ritmo de músicas, como uma forma de complementar a experiência de ouvir música, as respostas foram as seguintes: Participante 1: "Sim, acho que seria muito interessante, caso fosse algo bem portátil para que eu pudesse usar em diferentes locais"; Participante 2: "com certeza, seria uma experiência prazerosa"; Participante 3: "Sim, acredito que seja uma sensação incrível poder sentir as variações de vibração conforme a variação musical", Participante 4: "Acho que não, ouço música enquanto estou trabalhando ou estudando, acho que isso não seria muito aplicável para mim, a não ser que seja algo para usar apenas em uma ocasião especial ou coisa do tipo"; Participante 5: "Sim, a sensação seria ainda melhor se houvesse vários desse tipo espalhados pelo corpo, ao invés de ser apenas um bracelete, talvez as sensações sejam mais intensas".

Em seguida realizamos um segundo teste, seguindo os mesmos parâmetros de

usabilidade de forma bem semelhante ao experimento anterior, com apenas uma diferença, dessa vez, os motores foram posicionados na parte interna do braço. Ressaltamos que o número de comparações e testes foram exatamente os mesmos, assim como, o experimento foi realizado no mesmo braço que o anterior.

Pretendemos verificar se as sensações sentidas pelos participantes foram impactadas com a mudança de local dos atuadores. Assim como as outras características do experimento anterior, este teve a previsão de duração máxima também de 20 minutos.

Durante a observação dos testes foi possível observar que a maioria do participantes identificaram a diferença em um maior número de vezes comparado ao experimento anterior, com exceção de um participante que assim como não conseguiu identificar as diferentes sensações no experimento anterior, a resposta se manteve a mesma no experimento atual.

Ao final deste experimento, na entrevista, quando perguntados sobre a diferença de sensações da parte externa e interna do antebraço, as respostas foram praticamente as mesmas, 4 dos 5 participantes comentaram sentir a diferença de vibração entre os motores de forma mais clara na parte interna do antebraço. Já o Participante 4 comentou: "Tanto na parte interna quanto externa foi possível identificar a maioria das comparações, porém eu senti sensações mais claras na parte externa, talvez isso tenha ligação com os pelos do meu corpo".

Um ponto interessante para ser ressaltado, é que o participante que demonstrou arrepios no experimento passado, voltou a senti-los novamente no atual experimento. O participante identificou as diferenças entre as vibrações, mas é perceptível que esses arrepios são intensos e passageiros.

Sendo assim, com a verificação dos dados obtidos é possível afirmar que os testes legitimam a ideia, e que é possível sentir diferentes sensações à medida que motores desbalanceados vibram de acordo com as frequências, e mesmo para frequências iguais a variação da sensação está diretamente ligada aos pesos de cada motor.

Ainda com base nos resultados, foi possível realizarmos um mapeamento em cinco faixas de frequências que representem os sons com variações de frequências entre 200Hz e 20KHz. O mapeamento teve como base o resultado dos testes realizados, por meio de uma relação entre aproximação de frequências que foram testadas e os maiores níveis de respostas positivas apresentados na Tabela 3.

Já na Tabela 4 podemos observar o resultado do mapeamento realizado, contendo as faixas de frequências estabelecidas e as frequências que representam cada faixa relacionadas aos

motores. É possível notar que o par das frequências não necessariamente abrange toda a faixa, porém realizamos aproximações baseadas nas informações adquiridas no resultado dos testes, pelo mesmo motivo, podemos perceber que as faixas não possuem proporcionalidade, uma vez que não haviam valores representativos suficientes.

Tabela 4 – Resultado do mapeamento.

Faixa de Frequência	Motor A	Motor B
200 Hz - 2 KHz	1 KHz	200 Hz
2 KHz - 6 KHz	2 KHz	6 KHz
6 KHz - 12 KHz	12 KHz	6 KHz
12 KHz - 14 KHz	12 KHz	14 KHz
15 KHz - 20 KHz	20 KHz	15 KHz

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Dessa forma, obtemos uma generalização, onde os sons reconhecidos em cada faixa de frequência tenham *feedbacks* táteis por meio dos motores com as frequências mapeadas na Tabela 4.

Observando os resultados alcançados até aqui, abre-se um leque de oportunidades e aplicações para esta ideia, já que com a possibilidade do mapeamento do sinal, o reconhecimento de diferentes frequências e a transdução do som em diferentes sensações por meio de vibração, temos diversos casos para aplicações. Casos estes que podem impactar positivamente a vida de pessoas com deficiência auditiva, como uma possível aplicação podemos citar a segurança na rua, onde o sistema capta os sons continuamente e no momento que identificar um som que esteja em uma faixa de frequência conhecida, como a frequência média das buzinas automotivas convencionais, ative um ou mais motores, gerando a vibração, sendo possível que o usuário atente-se nos acontecimentos ao seu redor. Assim como esta, outras situações podem ser mapeadas como barulho de freios, sirenes, explosões, entre outras.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho abordou o estudo, o projeto e a validação da ideia de desenvolver um sistema computacional com uso de atuadores para aprimorar mecanismos capazes de realizar a transdução de sons em vibrações perceptíveis ao tato. Com base nas pesquisas bibliográficas foi possível entender as ondas sonoras e as necessidades de processamento de sinais em áudio, a fim de atender as demandas existentes. Os parâmetros, os critérios e as metodologias de projeto são mostradas e discutidas no decorrer do trabalho.

Com o objetivo de estudar bases para o desenvolvimento de um sistema embarcado de reprodução de música por meios de estímulos físicos para pessoas com deficiência auditiva, foi fundamental realizar um estudo dos componentes que poderiam ser utilizados na elaboração do produto e efetuar testes de um protótipo. Este trabalho apresentou estrutura, propriedades e características para a criação de um equipamento que atende os objetivos propostos, ainda que alguns conceitos apresentados, em primeiro momento, seriam utilizados na execução, entretanto, por restrições de tempo e disponibilidade não foram possíveis de serem implementados.

Os resultados alcançados através de testes no Capítulo 5, indicam que o estudo realizado teve seus objetivos alcançados com êxito. Porém, o trabalho não ocorreu como havia sido planejado devido ao atual cenário em que estamos vivendo por conta da pandemia do COVID-19 os testes não foram realizados com deficientes auditivos, muitas restrições foram impostas e o escopo do projeto teve que ser reduzido para que fosse possível realizar a validação da ideia.

As principais dificuldades estão relacionadas à componentes eletrônicos e processamento do sinal de áudio, no qual adaptamos o protótipo para fazer o uso da melhor forma dos componentes que tínhamos disponíveis no momento. Contudo, as pesquisas realizadas foram de suma importância, visto que, foram uma forma de adquirir mais conhecimento tanto teórico quanto prático.

Como trabalhos futuros temos a criação de uma versão do produto que consiga passar para o usuários mais sensações diferentes ao vibrar, ou ainda, adaptar e testar o sistema para a tradução em estímulos táteis de forma contínua com o mapeamento de frequências em tempo real. Outro possível trabalho é a elaboração de novos requisitos para um novo produto, tomando as ideias apresentadas neste documento como base, a fim de obter soluções ainda melhores, como por exemplo, ter além do bracelete, outros dispositivos vestíveis com atuadores espalhados por diversas partes do corpo, despertando ainda mais sensações.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, B. d. **Contribuições para o desenvolvimento de um sistema para auxílio a deficientes auditivos**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Faculdade Campo Limpo Paulista – FACCAMP, Campo Limpo Paulista, 2017.
- BARBOSA, S.; SILVA, B. **Interação humano-computador**. [S. l.]: Elsevier Brasil, 2010.
- BENITES, C.; SILVEIRA; FRANGO, I. Adaptation of assistive and robotic technology to teach music to deaf children. In: **Anais do Workshop de Informática na Escola**. [S. l.: s. n.], 2019. v. 25, n. 1, p. 335.
- BENITES, C. da S.; SILVEIRA, I. F. Utilizando robótica para permitir a experiência musical de crianças surdas por meio da vibração: visão prática. **Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação**, Associação Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informacao, n. E28, p. 412–422, 2020.
- BIANCHI, A. J. **Processamento de áudio em tempo real em dispositivos computacionais de alta disponibilidade e baixo custo**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- BONACORSO, N. G.; NOLL, V. **Automação eletropneumática**. [S. l.]: Saraiva Educação SA, 2000.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. [S. l.]: Prentice-Hall do Brasil, 1984. v. 6.
- BRAGA, N. C. **Controles PWM de potência**. 2009. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/projetos/375-controles-pwm-de-potencia-art006.html?showall=1>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- BRAGA, N. C. **Manual de Mecatrônica**. São Paulo: Editora Newton C. Braga, 2017. Volume 7.
- BRUGNARI, A.; MAESTRELLI, L. H. M. **Automação residencial via WEB**. 2010. 36 f. Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2010.
- BRUSCIA, K. **Definindo Musicoterapia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Enelivros. 2000.
- BUSCH, S. **Moda e tecnologia - uma análise da relação da moda com a tecnologia vestível no Século XXI**. Tecnólogo em design de moda - Florianópolis. 2017.
- CARDOSO, L. F. C. Sistema de automação residencial via rede celular usando microcontroladores e sensores. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, v. 8, n. 2, p. 68–83, 2014.
- CARRER, L. R. J. **MUSICOTERAPIA (()) VIBROACÚSTICA: Um movimento transdisciplinar promovendo qualidade de vida: um estudo de caso**. 2007. Monografia (Graduação em Musicoterapia) – Faculdade Paulista de Artes, São Paulo, 2007.
- CASTRO, F. S. **Protótipo de software de detecção de degrau para andadores ortopédico**. Monografia (Bacharelado em Sistema de Informação) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Marília, SP, 2015.

COSTANZO, L. S. **Fisiologia**. [S. l.]: Elsevier Brasil, 2007.

DADAM, A. P. **Analizador de frequência e espectro sonoro para alinhamento de sistemas de áudio**. 102 p. Monografia (Graduação em Mecatrônica Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Joinville, 2019.

FARIA, A. W. *et al.* **Modelagem por elementos finitos de placas compostas dotadas de sensores e atuadores piezoelétricos**: implementação computacional e avaliação numérica. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos**. 2002. Bauru: Unesp, 2002.

FERREIRA, F.; HECKLER, M. V. T. Filtro passa-faixa em tecnologia de microfita. In: **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**. Rio Grande do Sul: [S. n.], 2020. v. 6, n. 2.

FILHO, R. de Castro d'Ávila; BRAGA, M. F.; SILVA, S. M. Aplicação de filtros ativos e passivos de potência: Estudo de caso. In: **Conferência Internacional de Aplicações Industriais**. Poços de Caldas: [S. n.], 2008.

FINCK, R. **Ensinando música ao aluno surdo**: Perspectivas para ação pedagógica inclusiva. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GESCHIEDER, G. A. Cutaneous sound localization. **Journal of Experimental Psychology**, American Psychological Association, v. 70, n. 6, p. 617, 1965.

HAGUIARA-CERVELLINI, N. **A musicalidade do surdo**: representação e estigma. [S. l.]: Plexus Editora, 2003.

HEVNER, K. The affective character of the major and minor modes in music. **The American Journal of Psychology**, JSTOR, v. 47, n. 1, p. 103–118, 1935.

HOLLANDA, A.; MIYANO, S. S. **Acessibilidade com Arduino**. Monografia (Graduação em Sistemas de Informação) – Faculdade Adventista de Hortolândia, Hortolândia, 2015.

JUNIOR, M. O.; DUARTE, R. d. O. **Apostila sobre introdução ao projeto com microcontroladores e programação de periféricos**. 2011. Departamento de Engenharia Eletrônica – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

JUNIOR, P. de O. C. **Controle da velocidade de um motor DC aplicado em um mecanismo utilizando Arduino**. Projeto acadêmico interdisciplinar, p. 50, 2012.

JÚNIOR, V. P. d. S. **Microcontroladores PIC 16F e 18F–Teoria e Prática**. [S. l.]: São Paulo: Instituto Newton C Braga, 2013.

MABUCHI MOTOR. **RF-300FA DataSheet**. [S. l.], 2021. RF-300FA-12350.

MAGALHÃES, D. A. d.; FILHO, J. P. A. Por que é mais difícil escutar os sons graves do que os sons médios e agudos? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 331–338, 2017.

MARTINS, L. E. G.; JÚNIOR, R. de S.; JR, H. P. de O.; PEIXOTO, C. S. A. Terase: Template para especificação de requisitos de ambiente em sistemas embarcados. In: **WER**. [S. l.: s. n.], 2010.

- MAZANTI, G. A.; CORRAL, D. C. **Filtros Ativos**. Laboratório de Aplicação de Circuitos Integrados Lineares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- MELO, C. **Camisa especial faz surdos sentirem a música**. 2017. Disponível em: <http://www.neomot.com/post/2017/05/25/camisa-especial-faz-surdos-sentirem-a-m%C3%BAAsica>. Acesso em: 02 fev. 2021.
- MONTAGU, A. **Tocar: o significado humano da pele**. [S. l.]: Grupo Editorial Summus, 1988. v. 34.
- MULINARI, B. M. **Filtros digitais em áudio**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.
- MUSSOI, F. L. R. Filtros passivos. **Gerência Educacional de Eletrônica**, p. 85, 2004.
- NANAYAKKARA, S. C.; WYSE, L.; ONG, S. H.; TAYLOR, E. A. Enhancing musical experience for the hearing-impaired using visual and haptic displays. **Human-Computer Interaction**, Taylor & Francis, v. 28, n. 2, p. 115–160, 2013.
- OLIVEIRA, R. R. **Uso do microcontrolador ESP8266 para automação residencial**. 2017. 42 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2017.
- PILOTTO, D.; TONIDANDEL, F. Criação e implementação do firmware da placa principal para futebol de robos. In: **IX Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI**. São Bernardo do Campo: [S. n.], 2019.
- PLANAS, O. **Tipos de motores**. 2018. Disponível em: <https://pt.demotor.net/tipos-motor>. Acesso em: 16 set. 2020.
- PROVENZA, F. **Pro-tec-Projetista de máquinas**, São Paulo: F. Provenza. 1996.
- RODRIGUES, I. O. **Os efeitos da musicoterapia através do software Cromotmusic em aspectos sensoriais, emocionais e musicais de crianças e jovens surdos: ensaio controlado randomizado**. 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado em Saúde da Criança e do Adolescente) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- ROEDERER, J. G. **Introdução à física e psicofísica da música**. [S. l.]: Edusp, 1998.
- SASAKI, C. M.; OSHIRO, L. K. **Kit didático para a implementação de filtros passivos e ativos**. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2013.
- SILVA, A. C. M. d.; PINTO, M. C. *et al.* Integração de estímulos táteis na percepção do som. 2018. SEMINÁRIOS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, v. 2, n. 1, 2018.
- SILVA, J. A. F. d.; LAGO, C. L. d. Módulo eletrônico de controle para válvulas solenóides. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 25, n. 5, p. 842–843, 2002.
- SILVA, M. A. G. da. **Filtros Digitais Aplicados em Sinais de Áudio**. Monografia (Bacharel em Ciência da Computação) – Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.

SOUZA, D. J. d. **Desbravando o PIC**: ampliado e atualizado para PIC 16F628A. [S. l.]: Saraiva Educação SA, 2005.

TAGIAROLI, G. **Ludwig**: app para iPad ajuda surdos a sentirem música com vibrações. 2015. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2015/06/16/ludwig-app-para-ipad-ajuda-surdos-a-sentirem-musica-com-vibracoes.htm>. Acesso em: 20 jul. 2020.

THOMAZINI, D. **Sensores industriais**: fundamentos e aplicações. [S. l.]: Saraiva Educação SA, 2005.

TOMASSINI, A. **Wearable electronic accessory with led, bluetooth and rfid/nfc technology to receive information from connected devices, and for personal identification and data storage/exchange**. [S. l.]: Google Patents, 2017. US Patent App. 15/109,426.

VANZELLA, L. A. **Formatação de pulso em sistemas coerentes Nyquist-WDM**. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

WENDLING, M. **Sensores**. 2010. Universidade Estadual Paulista. São Paulo, v. 2.0, p. 20, 2010.

APÊNDICE A – TERMO DE CONSENTIMENTO

- **Nome do projeto:** VibraSom: sistema embarcado de reprodução sonora por meio de vibração para pessoas com deficiência auditiva
- **Instituição a que pertence:** Universidade Federal do Ceará

Você está sendo convidado(a) a participar de um estudo de um dispositivo vestível para auxiliar deficientes auditivos no que diz respeito à sons, trata-se de um protótipo que está sendo desenvolvido por alunos do curso de Engenharia de Computação na Universidade Federal do Ceará, Campus Quixadá. A ferramenta consiste em um bracelete com atuadores acoplados em seu entorno ligado por fios à filtros a um sistema embarcado, os atuadores adaptados ao bracelete, operam a medida em que o tratamento do sinal de áudio é realizado, identificando a variação do som e vibrando acordo com a mudança.

Eu, Camila Diógenes, sou o responsável pelo projeto, e tenho o objetivo de testar o funcionamento desse dispositivo em campo. Avaliando alguns fatores que podem ser importantes no desenvolvimento futuro dessa ferramenta. Usaremos gravação de voz para confirmar a sua participação no teste. Você deve dizer seu nome, e após, declarar que se voluntaria na participar do teste.

Sua participação envolve realizar algumas tarefas com o protótipo, e será realizado uma pequena entrevista pós-teste. A duração dessa avaliação é de aproximadamente 20 minutos. A participação sua nesse estudo será voluntária e se você decidir não participar mais ou quiser desistir de continuar em qualquer momento, tem absoluta liberdade de fazê-lo.

Você também tem acesso a todas as informações e esclarecimentos adicionais durante e depois do estudo. Na publicação dos resultados desta pesquisa, sua identidade será mantida no mais rigoroso sigilo. Serão omitidas todas as informações que permitam identificá-lo(a).

Mesmo não tendo benefícios diretos em participar, você estará contribuindo para a compreensão do fenômeno estudado e para a produção de conhecimento científico. Quaisquer dúvidas relativas à pesquisa poderão ser esclarecidas pela pesquisadora nos seguintes contatos: telefone: (85) 98168-2255 ou *e-mail*: camiladiogenes@alu.ufc.br.