

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO, CARACTERIZAÇÃO E ACIONAMENTO DE
ATUADORES VIBROTÁTEIS DESTINADO AO
DESENVOLVIMENTO DE INTERFACES HÁPTICAS PARA
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

Ian Moura Alexandre

Brasília, Maio de 2021



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO, CARACTERIZAÇÃO E ACIONAMENTO DE
ATUADORES VIBROTÁTEIS DESTINADO AO
DESENVOLVIMENTO DE INTERFACES HÁPTICAS PARA
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

Ian Moura Alexandre

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcus Vinicius Lamar, CIC/UnB

Orientador

Profa. Dra. Carla Maria Chagas e Cavalcante

Koike, CIC/UnB

Examinador interno

Prof. Dr. Marcelo Grandi Mandelli, CIC/UnB

Examinador interno

Brasília, Maio de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

IAN, MOURA ALEXANDRE

Estudo, Caracterização e Controle de Atuadores Vibrotáteis Destinado ao Desenvolvimento de Interfaces para Pessoas com Deficiência Auditiva

[Distrito Federal] 2021.

x, 101p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2020). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Redes tátil

2. ESP-32

3. Atuador vibrotátil

4. Motor ERM

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALEXANDRE, IAN MOURA, (2021). Estudo, Caracterização e Controle de Atuadores Vibrotáteis Destinado ao Desenvolvimento de Interfaces para Pessoas com Deficiência Auditiva. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-*n*°022, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 101p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ian Moura Alexandre

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Estudo, Caracterização e Controle de Atuadores Vibrotáteis Destinado ao Desenvolvimento de Interfaces para Pessoas com Deficiência Auditiva

GRAU: Engenheiro

ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ian Moura Alexandre

Rua 24-Norte, qd. 2, apt. 1302-A, ed. Piazza D'oro.

71916-750 Águas Claras – DF – Brasil.

Dedicatória

Dedico este trabalho a todas as pessoas que estiveram juntas e puderam me dar o suporte necessário, superando qualquer barreira geográfica. Em especial, a minha mãe, a minha vó, a minha madrinha e a minha amada noiva Giordana, que me ajudaram neste passo tão importante da vida.

Ian Moura Alexandre

Agradecimentos

Agradeço profundamente a minha família pelo enorme apoio que tive de vocês, desde o início de minha graduação até a entrega deste trabalho.

Agradeço enormemente a minha mãe, Tania, por fazer o possível e impossível para poder me tornar o que sou hoje, e ser essa grande inspiração para a minha vida acadêmica.

Agradeço a minha noiva, Giordana, por ser um porto seguro durante todos os momentos juntos, principalmente na realização deste trabalho.

Agradeço a minha avó, Leonídia, por seu enorme e amoroso coração. Agradeço aos meus tios, Leonídia e Antônio, por me aceitarem de braços abertos em seus lares, sendo fundamental o apoio emocional, sentimental e financeiro do início ao fim da minha graduação.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Marcus Lamar, por ter primeiramente aceitado me orientar, mesmo com tantos outros orientandos, e mesmo assim, me assistido de maneira exemplar para a conclusão do trabalho.

Ian Moura Alexandre

RESUMO

Este documento versa o estudo e aprimoramento do sistema vibrotátil desenvolvido por Tito Klautau em sua monografia defendida em 2019. Aplicam-se mudanças no projeto inicial a fim de alterar o microcontrolador utilizado no projeto, de forma a facilitar a sua implementação. Foi realizado ainda um estudo teórico-prático a respeito do controle realizado sobre motores de vibração do tipo ERM, por meio de um transistor de junção bipolar. Realiza-se o estudo de mudanças realizadas no circuito, analisando seus efeitos sobre a intensidade de vibração obtida pelo atuador. Em último passo, realiza a testagem com voluntários, de forma a relatar a experiência sentida da interação do usuário com o dispositivo e a descobrir limites da sensibilidade tátil humana.

Palavras Chave: dispositivo vibrotátil, ESP-32, motor de vibração, motor ERM, transistor

ABSTRAC

This document deals with the study and improvement of the vibrotactile system developed by Tito Klautau in his monograph. Changes are made to the initial design in order to ease its replication and a new firmware is developed that maintains the objectives initially desired. A theoretical-practical study was also carried out regarding the control carried out on vibration motors of the ERM type, by means of a bipolar junction transistor. Then indicating, as steps for the next part of the project, the implementation of changes and studies of the interaction of the system with the human body. In conclusion, a report with volunteers is made, reporting their experience with the device and appoiting thresholds of the tacitile human sense.

Keywords: Tacitile Technology, EPS-32, vibrotacitile actuator, ERM motor, transistor

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA | 2 |
| 1.1.1 | OBJETIVO GERAL | 2 |
| 1.1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.2 | ESTRUTURA DO DOCUMENTO | 2 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 4 |
| 2.1 | MOTORES DE VIBRAÇÃO | 4 |
| 2.2 | MOTORES DE VIBRAÇÃO ERM | 5 |
| 2.3 | CRIANDO VIBRAÇÕES UTILIZANDO MOTORES DE VIBRAÇÃO ERM | 6 |
| 2.3.1 | PARTE MECÂNICA DO MOTOR | 7 |
| 2.3.2 | PARTE ELÉTRICA DO MOTOR | 8 |
| 2.3.3 | AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO | 8 |
| 2.4 | VARIÁVEIS DE ESTUDO | 9 |
| 2.5 | ESTADO DA ARTE | 10 |
| 3 | Sistema Proposto | 12 |
| 3.1 | MICROCONTROLADOR | 13 |
| 3.1.1 | TESTE DE CANAL BLUETOOTH | 14 |
| 3.2 | MOTORES DE VIBRAÇÃO | 15 |
| 3.3 | MEDIDA DA VIBRAÇÃO | 16 |
| 3.4 | CARACTERIZAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA | 18 |
| 3.5 | CONTROLE DOS MOTORES DE VIBRAÇÃO | 18 |
| 3.5.1 | ANÁLISE DE FREQUÊNCIA | 20 |
| 3.5.2 | ANÁLISE DE AMPLITUDE | 20 |
| 3.5.3 | MOTORES MODELO A E B | 21 |
| 3.6 | TESTES COM VOLUNTÁRIOS | 21 |
| 4 | Resultados | 24 |
| 4.1 | COMUNICAÇÃO WIRELESS | 24 |
| 4.1.1 | MEDIDA DA VIBRAÇÃO USANDO MPU6050 | 24 |
| 4.1.2 | CARACTERIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIAS | 26 |
| 4.1.3 | ANÁLISE DE ZONA MORTA E ATRASO | 27 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1.4 | RESPOSTA DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA..... | 28 |
| 4.2 | ESPECTROGRAMAS | 29 |
| 4.3 | RESULTADOS DE SIMULAÇÕES | 31 |
| 4.3.1 | DIAGRAMAS DE BODE | 40 |
| 4.3.2 | SIMULAÇÕES COM MODELO DE MOTOR DC | 42 |
| 4.4 | VIBRAÇÃO COM NOVA CONFIGURAÇÃO DE CIRCUITO | 44 |
| 4.4.1 | RESULTADOS OBTIDOS COM MOTOR B | 45 |
| 4.4.2 | RESULTADOS OBTIDOS COM MOTOR A | 47 |
| 4.5 | TESTES COM VOLUNTÁRIOS | 48 |
| 4.5.1 | VOLUNTÁRIO 1 | 49 |
| 4.5.2 | VOLUNTÁRIO 2 | 49 |
| 4.5.3 | VOLUNTÁRIO 3 | 50 |
| 4.5.4 | VOLUNTÁRIO 4 | 51 |
| 4.5.5 | VOLUNTÁRIO 5 | 52 |
| 4.5.6 | VOLUNTÁRIO 6 | 52 |
| 4.5.7 | VOLUNTÁRIO 7 | 53 |
| 4.5.8 | VOLUNTÁRIO 8 | 54 |
| 4.5.9 | ANÁLISE DOS DADOS DOS VOLUNTÁRIOS | 55 |
| 5 | Conclusões..... | 58 |
| 5.1 | PERSPECTIVAS FUTURAS..... | 59 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 60 |
| | Anexos..... | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Motor ERM do tipo moeda aberto e fechado..... | 5 |
| 2.2 | Representação do motor ERM com um grau de liberdade. Fonte: [1] | 6 |
| 2.3 | Representação de parte elétrica do circuito. | 8 |
| 3.1 | Fluxograma do funcionamento do sistema proposto por Klautau [2] | 12 |
| 3.2 | Circuito utilizado na monografia de Tito[2]..... | 13 |
| 3.3 | Placa do Microcontrolador ESP32 | 14 |
| 3.4 | Design circuito com transistor 2N2222 - software LTSpice [®] | 16 |
| 3.5 | Forma de aplicação de estímulo vibrotátil em voluntários | 22 |
| 4.1 | Resposta do motor A ao degrau utilizando-se o MPU6050 | 25 |
| 4.2 | Resposta do motor A à rampa utilizando-se o MPU6050 | 25 |
| 4.3 | Resposta do motor A à cossenóide utilizando-se o MPU6050 | 25 |
| 4.4 | Resposta do motor B ao degrau utilizando-se o MPU6050 | 26 |
| 4.5 | Resposta das funções transferência estimadas para os motores A e B | 27 |
| 4.6 | Resposta do Motor B à rampa | 27 |
| 4.7 | Resposta da Simulação do Motor A à rampa..... | 28 |
| 4.8 | Resposta da Simulação do Motor B à rampa..... | 29 |
| 4.9 | Espectrograma da vibração do motor com rampa de entrada..... | 29 |
| 4.10 | Espectrograma da vibração do motor com degrau de entrada | 30 |
| 4.11 | Espectrograma da vibração do motor com senoide de entrada | 31 |
| 4.13 | Representação do Circuito I no LTSpice..... | 32 |
| 4.12 | Circuito simulador de fonte PWM | 32 |
| 4.14 | Corrente na carga com a aplicação de uma rampa PWM no circuito da Figura 3.4 .. | 33 |
| 4.15 | Corrente na carga com a aplicação de uma rampa PWM filtrada no circuito 3.4 | 34 |
| 4.16 | Corrente na carga com a aplicação de uma rampa PWM utilizando NMOS..... | 35 |
| 4.17 | Circuito amplificador utilizado | 35 |
| 4.18 | Simulação do circuito da Figura 4.17..... | 36 |
| 4.19 | Circuito com mudança da posição do capacitor C2..... | 37 |
| 4.20 | Simulação do circuito da Figura 4.19..... | 37 |
| 4.21 | Simulação da aplicação de uma rampa na topologia 4.19 utilizando o transistor AO6408..... | 38 |
| 4.22 | Simulação da aplicação de uma rampa na topologia 4.19 utilizando o transistor TIP122 | 39 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.23 | Resposta de uma rampa do circuito 4.19 com dois motores em paralelo..... | 40 |
| 4.24 | Diagrama de Bode do circuito da Figura 4.17 | 40 |
| 4.25 | Curva de Bode da resposta do circuito 3.4..... | 41 |
| 4.26 | Modelo Spice do Motor de Vibração..... | 42 |
| 4.27 | Resposta do modelo do motor de vibração a um sinal degrau | 43 |
| 4.28 | Resposta do motor em vibração a um sinal rampa | 44 |
| 4.29 | Vibração do motor medida pelo acelerômetro no circuito 4.17 | 45 |
| 4.30 | Vibração do motor medida pelo acelerômetro no circuito II | 46 |
| 4.31 | Vibração do motor medida pelo acelerômetro mudando a polarização | 46 |
| 4.32 | Vibração do motor com carga em paralelo..... | 47 |
| 4.33 | Vibração do motor modelo A no circuito II | 47 |
| 4.34 | Modelo de Pertinência da Intensidade de Vibração Sentida pelas Pessoas | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Representação da mensagem de identificação no protocolo I ² C | 17 |
| 3.2 | Endereços dos dados no MPU6050 | 17 |
| 4.1 | Atraso de resposta do motor tipo B | 28 |
| 4.2 | Características dos voluntários da pesquisa | 48 |
| 4.3 | Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 1 | 49 |
| 4.4 | Níveis de intensidades percebidos pelo voluntário 2 | 50 |
| 4.5 | Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 3 | 50 |
| 4.6 | Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 4 | 51 |
| 4.7 | Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 5 | 52 |
| 4.8 | Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 6 | 53 |
| 4.9 | Níveis de intensidades percebidos pelo voluntário 7 | 53 |
| 4.10 | Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 8 | 54 |
| 4.11 | Médias e estatísticas dos dados obtidos dos voluntários | 55 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | | |
|-------|---------------------------------------|-------------|
| k | constante elástica da mola | [N/m] |
| x | deslocamento | [m] |
| c | coeficiente de amortecimento | [N × s/m] |
| F_0 | Força centrípeta | [N] |
| t | tempo | [s] |
| R | resistência | [Ω] |
| L | indutância | [H] |
| T | torque | [Nm] |
| n | número do canal analógico selecionado | |
| x_p | Solução Particular | |
| K_c | Constante de Tensão do Motor | [V × s/rad] |

Símbolos Gregos

| | | |
|----------|--------------------|---------|
| ω | Velocidade angular | [rad/s] |
| θ | Posição angular | [rad] |
| Φ | Fase | [rad] |

Siglas

| | |
|------|---|
| ERM | Rotação de Massa Excêntrica - <i>Excentric Rotation Mass</i> |
| BLE | <i>Bluetooth Low Energy</i> |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| EMF | Força Eletromotriz - <i>Electromotive Force</i> |
| LRA | Atuador de Ressonância Linear - <i>Linear Resonant Actuator</i> |
| DC | Corrente Contínua - <i>Direct Current</i> |
| SCL | <i>Synchronous Clock</i> |
| SDA | <i>Synchronous Data</i> |
| UART | <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> |
| HFM | <i>Haptic Feedback Music</i> |

Capítulo 1

Introdução

No contexto atual, a comunidade surda e as pessoas com algum nível de deficiência auditiva compõem um núcleo social expressivo, possuindo suas próprias línguas, escritas, culturas e expressões musicais [3]. Apesar da música estar predominantemente relacionada a audição, privando assim, as pessoas com deficiências auditivas de experimentá-la com toda sua inteireza, a musicalidade é percebida de uma maneira singular por elas, fazendo uso de outros sentidos, como visão e tato [4], e através de uma expressão artística de sua linguagem [5].

A barreira linguística com relação a fala, presente entre os surdos e ouvintes é visto como um atrito, principalmente em ambientes familiares, gerando preconceito e impondo limitações. Estes são fatores que geram consequências em diversos âmbitos, refletindo-se também, no ambiente musical, por ser visto apenas como um instrumento para desenvolvimento rítmico da fala, negligenciando seu papel como meio de lazer [3]. O estímulo através da pele mostra-se como um caminho de conexão, ou seja, uma forma de intercomunicação da experiência musical.

O estudo de sistemas táteis é uma área de grande interesse dos pesquisadores. Tais sistemas possuem aplicações nas mais diversas áreas, desde o estudo da percepção humana de texturas [6] até a realização de sensação tátil em mão robótica [7]. Estes incorporam atuadores e/ou sensores, baseando-se no sentido do tato para perceber e manipular variáveis sentidas pela pele humana, como o toque, a vibração, o calor e a pressão.

À primeira vista a música pode não parecer ser um tema relacionado ao tato, sendo inerente ao sentido da audição, no entanto, nota-se que suas conexões sensíveis podem ser inúmeras [8]. A forma como o ser-humano percebe [9] e pratica [10] a música está intrinsecamente relacionada como a forma que a pessoa pode senti-la.

O principal foco deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo que possa ser usado por quem tem alguma diminuição da acuidade auditiva a partir de um feedback vibrotátil. O dispositivo foi avaliado em um cenário real de uso com pessoas de diversas idades, no entanto, pela condição pandêmica do covid-19, foi impossível efetuar testes em usuários com deficiência severa. A avaliação foi feita através da observação direta dos participantes dos testes, verificando-se o uso do dispositivo e os resultados considerados neste estudo.

1.1 Definição do problema

Com base em estudos envolvendo a comunidade surda e a interação entre indivíduo e música através do sentido tátil, em 2019, o aluno Tito Klautau da UnB desenvolveu um trabalho com objetivo de sentir a música através de sinais vibrotáteis [2]. Nesse estudo foi proposto um sistema capaz de realizar a tradução de arquivos sonoros musicais em sinais que pudessem ser interpretados pelo sentido tátil humano. No desenvolvimento do projeto, foi implementado um programa executado no computador para a tradução de arquivos musicais, de forma a serem processados por um sistema computacional Raspberry Pi, que gera e envia o sinal necessário para um conjunto de 16 atuadores emitirem a vibração desejada. No entanto, o trabalho tratou os atuadores apenas como dispositivo de controle on-off. Para este atual trabalho, foi realizado o estudo a respeito do projeto realizado em 2019, tendo como focos principais a melhoria do sistema microcontrolado, a comunicação sem-fio por interface Bluetooth, a caracterização dos atuadores como dispositivos de resposta contínua e a testagem em usuários com o dispositivo proposto.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar a caracterização física dos atuadores e propor melhorias ao circuito controlador de modo a permitir um melhor aproveitamento na geração de diferentes tipos de vibrações.

1.1.2 Objetivos específicos

- Aprimorar o estudo do sistema controlador dos atuadores;
- Propor e analisar melhorias a serem aplicadas ao sistema háptico;
- Determinar uma maneira de comunicar as sensações ao executar os padrões por meio da interface;
- Caracterizar eletricamente e mecanicamente os atuadores;
- Verificar a experiência de uso do dispositivo por voluntários em um estudo de campo.

1.2 Estrutura do Documento

O trabalho descrito é composto de 5 capítulos, sendo estes:

- O Capítulo 1 faz uma breve apresentação do trabalho, mostrando suas motivações para analisar o dispositivo e o contexto no qual ele está inserido, assim como a organização documental;
- O Capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos no qual o trabalho se baseia para sua elaboração e realiza um estudo do estado da arte da área de pesquisa;

- O Capítulo 3 descreve as etapas tomadas para a realização do estudo até a obtenção do sistema proposto, mostrando a forma como foram analisadas as características do motor, a base para análise das mudanças propostas e a testagem realizada com as pessoas;
- O Capítulo 4 expõe a análise e tratamento dos dados obtidos através dos estudos e do resultado das testagens;
- O Capítulo 5 é feita a descrição das considerações finais do trabalho, apontando as conclusões tiradas por meio dos resultados obtidos, apresentando assim, as perspectivas futuras a serem trabalhadas.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentada a base teórica necessária ao entendimento e implementação do projeto. Além dos conhecimentos de eletrônica e controle utilizados no projeto, são apresentados os aspectos biológicos aplicados para a modelagem do produto e o estado da arte, mostrando pesquisas recentes realizadas nesta área.

2.1 Motores de Vibração

De modo geral quando se fala de vibração em motores, esta está associada a uma perda de energia no sistema, no qual deve ser minimizada ao máximo, já que ela pode gerar ruídos, causando a fadiga e desgaste, diminuindo a eficiência desejada para o processo [1]. Entretanto, quando o objeto de estudo é a resposta tátil do usuário, uma das principais formas de se emitir uma mensagem é através da vibração. De acordo com o dicionário, define-se “háptico” como “Que se refere ao tato” [11]. Os sistemas hápticos são aqueles capazes provocar estímulos capazes de serem sentidos pela superfície da pele através de seus sensores [12]. Apesar das palavras “háptico” e “tátil” serem sinônimas na língua portuguesa, os sistemas hápticos englobam os sistemas cinéticos, aos quais envolvem sensações de músculos e juntas, permitindo sensações de peso e orientação, e os sistemas táteis, caracterizada pelo estímulo à superfície da pele apenas, permitindo ao usuário perceber vibração, temperatura, textura e consistência [13].

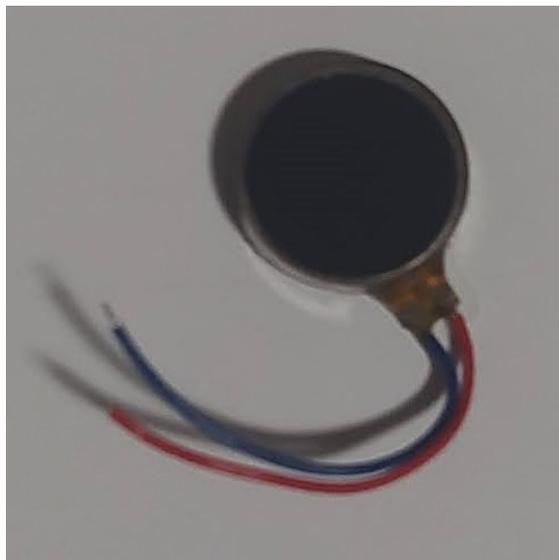
Atualmente, existem três tipos de motores de vibração disponíveis no mercado: o de massa excêntrica rotacional (ERM, do inglês *Eccentric Rotating Mass*), o atuador ressonante linear (LRA, do inglês *Linear Resonant Actuator*) e o atuador piezoelétrico. O atuador do tipo ERM é o mais antigo deles e é construído com uma massa deslocada ao eixo, fazendo com que a sua aceleração seja propagada para todo o motor, gerando sua vibração. Esse tipo de motor terá um destaque maior neste trabalho. O motor LRA funciona com um ímã conectado a uma mola, cercada por bobinas, e trilhada de forma a se deslocar de maneira unidimensional, apresentando uma evolução diante de seu antecessor, com precisão e economia energética, sendo utilizado em grande parte dos smartphones recentes. Diferentemente das duas tecnologias previamente mostradas, os atuadores piezoelétricos não são baseados em motores, sendo fabricados com materiais cerâmicos capazes de

se deformar quando aplicado corrente elétrica, gerando força e movimento. Apesar de serem mais confiáveis e permitirem uma gama maior de amplitudes e frequências de vibração, eles acabaram não sendo muito adotados devido a sua fragilidade e necessidade de maior consumo energético.

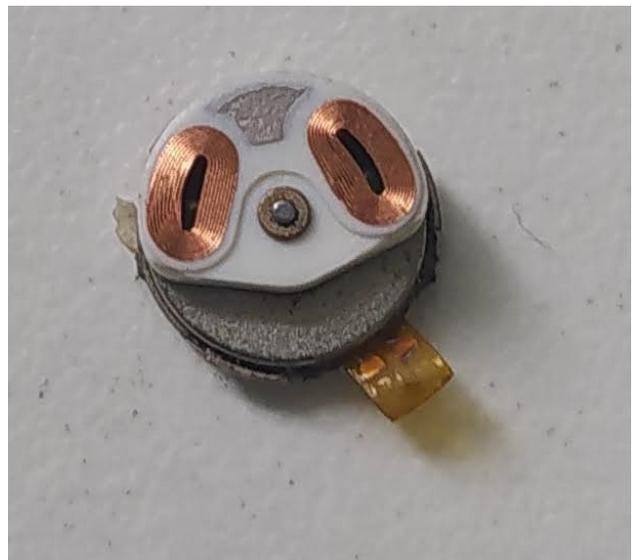
2.2 Motores de vibração ERM

Os motores de vibração do tipo rotação de massa excêntrica (ERM) são motores DC que possuem em seu eixo uma massa levemente deslocada de seu centro. Com a aplicação de corrente no motor, a rotação da massa ao redor do eixo provoca uma força centrípeta de forma assimétrica, que faz com que o motor todo se desloque juntamente, fazendo com que a sua aplicação constante resulte em vibração. A vibração gerada por este tipo de motor é do tipo harmônica forçada, sendo ela provocada pelo movimento da massa acoplada em seu eixo, forçando-o a girar com a frequência de excitação.

Existem dois tipos de motores ERM: os cilíndricos e os moedas. O princípio de geração de vibração é o mesmo, mudando somente a forma de construção de cada um deles, podendo ser escovados ou não escovados. Os motores cilíndricos são fabricados de forma a gerarem um torque maior, tendo uma massa maior acoplada ao seu eixo, enquanto dentro da carcaça do motor encontram-se o ímã, os enrolamentos e o comutador. Já no motor do tipo moeda, como mostrado nas Figuras 2.1(a) e 2.1(b), a massa do motor está inserida dentro do encapsulamento do motor, tornando-o compacto. O comutador e as bobinas estão conectadas à massa giratória, ao passo que na parte anterior do motor estão o ímã e a escova. Tendo um tamanho e massa bem reduzidos, a sua capacidade vibratória também são bem menores, mesmo que muitos desses motores tenham uma frequência nominal de até 12000 rpm.



(a) Motor Fechado



(b) Motor Aberto

Figura 2.1: Motor ERM do tipo moeda aberto e fechado.

A vibração possui duas principais características: a frequência e a amplitude. Em um processo

harmônico, a frequência de vibração sentida utilizando-se motores ERM possui como sua componente principal a mesma frequência na qual a carga acoplada ao eixo do motor está girando. Já a amplitude varia de acordo com a magnitude da aceleração sentida pela massa acoplada ao motor. Na Seção 2.3 é explicada, de maneira detalhada, a resposta da vibração de acordo com a corrente do motor.

2.3 Criando vibrações utilizando motores de vibração ERM

De acordo com Singiresu [14], qualquer movimento que se repita após um certo intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação, das quais possuem em geral um meio de armazenamento de energia potencial (mola), um meio de armazenamento de energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda de energia (amortecedor). Em um motor de vibração do tipo rotação de massa excêntrica, a excitação de entrada é causada pela rotação da massa deslocada ao redor de seu eixo, classificando-o como um sistema de vibração harmonicamente forçada [14], já que a fonte de oscilação é aplicada por meio de uma força aplicada, no caso a força centrípeta que atua sobre a massa acoplada, e ela possui uma frequência constante.

Considerando o sistema em estudo com apenas um grau de liberdade, pode-se representá-lo de acordo com a Figura 2.2, consistindo de um sistema massa-mola amortecido. Os cálculos vistos nas Subseções 2.3.1 e 2.3.2 são apresentados nos manuais da *Precision Microdrives* [1] e no livro de Singiresu [14].

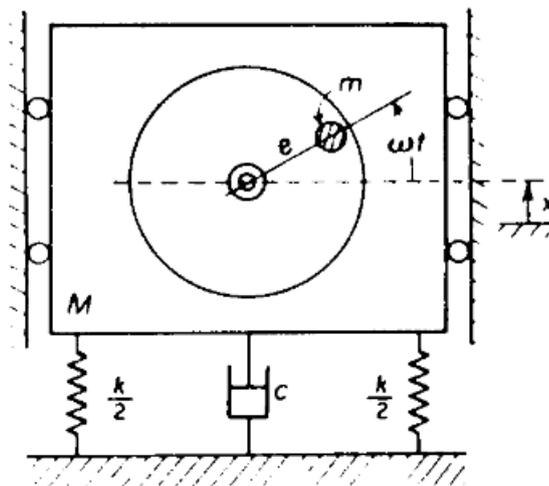


Figura 2.2: Representação do motor ERM com um grau de liberdade. Fonte: [1]

2.3.1 Parte Mecânica do Motor

Como mostra a Figura 2.2, o motor pode ser representado como um sistema massa-mola amortecido, onde x corresponde ao deslocamento do centro de massa, k a constante de rigidez da mola e c a constante de amortecimento. A força obtida por meio da Lei de Hooke, descrita por meio da equação

$$F_{el} = -k \times x, \quad (2.1)$$

o amortecimento viscoso, encontrado por meio da função

$$F_{am} = c \frac{dx}{dt} \quad (2.2)$$

e a força gravitacional, obtida por meio da Segunda Lei de Newton,

$$F_g = (M - m) \frac{dx^2}{dt^2} \quad (2.3)$$

compõe a força resultante do sistema em repouso, representada por

$$kx + c \frac{dx}{dt} + (M - m) \frac{d^2x}{dt^2} = F. \quad (2.4)$$

Por outro lado, como a força centrípeta da massa acoplada m , representada por

$$F_c = mr\omega^2, \quad (2.5)$$

é a força externa capaz de provocar a vibração no motor, a Equação 2.4 passa a ser representado como mostrado na equação

$$kx + c \frac{dx}{dt} + (M - m) \frac{d^2x}{dt^2} = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.6)$$

onde para se obter a resultante no eixo x , multiplica-se por $e^{i\omega t}$. Considerando a solução particular

$$x_p(t) = X e^{i\omega t} \quad (2.7)$$

tem-se por substituição na Equação 2.6 que

$$X = \frac{F_0}{(k - x\omega^2) + ic\omega} \quad (2.8)$$

Multiplicando-se $[(k - x\omega^2) + ic\omega]$ no numerador e denominador da Equação 2.8, chega-se ao resultado

$$X = F_0 \left[\frac{k - m\omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + ic\omega} - i \frac{c\omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + ic\omega} \right] \quad (2.9)$$

Por meio da relação de $x + iy = Ae^{i\Phi}$, onde a magnitude $A = \sqrt{x^2 + y^2}$ e $tg(\Phi) = y/x$, a Equação 2.9 pode ser expressa como

$$X = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} e^{-i\Phi} \quad (2.10)$$

sendo $\Phi = tg^{-1} \frac{c\omega}{k - m\omega^2}$. Assim, a solução em regime permanente obtida é representada por

$$x_p(t) = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} e^{i(\omega t - \Phi)} \quad (2.11)$$

2.3.2 Parte Elétrica do Motor

Seguindo para a parte elétrica do motor ERM, sua representação é realizada representando um resistência R , referente a resistência de armadura, uma indutância L , referente a indutância de enrolamento do motor DC, e uma tensão eletromotriz, representada por EMF (do inglês *Electromotive Force*), proporcional a velocidade de rotação do motor ω_0 e a constante de tensão do motor K_e . Utilizando-se a Lei das Malhas, chega-se então a equação

$$Vm(t) = R.I_M(t) + L \frac{dI_M}{dt} + EMF = R.I_M + L \frac{dI_M}{dt} + K_e \omega_0 \quad (2.12)$$

onde I é diretamente proporcional ao torque do motor por meio de $I = \tau/K_t$, sendo K_t a constante de torque do motor.

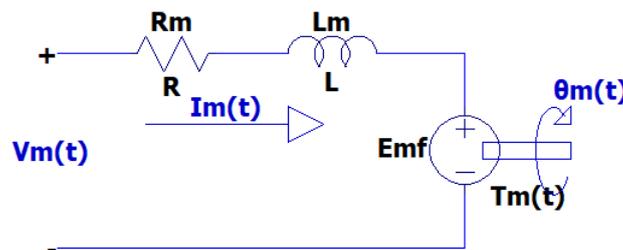


Figura 2.3: Representação de parte elétrica do circuito.

2.3.3 Amplitude de vibração

Como exposto anteriormente, a vibração de um motor ERM é causado pela força centrípeta causado pela rotação da massa excêntrica, mostrada na Equação 2.13. Considerando um dos eixos

de referência [15], a força é dada pela Equação 2.14, onde θ é a posição angular do rotor.

$$F = m_{excêntrica} \times r \times \omega^2 \quad (2.13)$$

$$F = m_{excêntrica} \times r \times \omega^2 \cos \theta \quad (2.14)$$

De acordo com a Segunda Lei de Newton, tem-se que a força centrípeta será a força resultante sobre o sistema que compõe o motor e a superfície sobre a qual o motor encontra-se, expandindo a Fórmula 2.14 em

$$a_{total,x} \times m_{total,x} = m_{excêntrica} \times r \times \omega^2 \cos \theta \quad (2.15)$$

Dessa maneira, encontra-se a amplitude de vibração isolando a aceleração da conforme

$$a_{total,x} = \frac{m_{excêntrica} \times r \times \omega^2 \cos \theta}{m_{total,x}} \quad (2.16)$$

onde $m_{total,x}$ é massa total do motor.

2.4 Variáveis de estudo

A medida em que passou a se considerar um sistema vibrotátil, o efeito do sistema sobre a pele humana e como o cérebro o interpreta, novas variáveis de saída foram sendo incorporadas. De acordo com Jones e Sarter [16], pesquisas mostram que o corpo humano sente uma vibração por meio de 5 diferentes variáveis: intensidade, frequência, duração, local e área de aplicação.

Atualmente, as variáveis mais utilizadas para a codificação de uma mensagem são intensidade, frequência e local da aplicação, sendo as duas primeiras as consideradas para a caracterização das ondas neste projeto. A intensidade de vibração, também chamada de amplitude, corresponde a força aplicada pelo impulso gerado. Em diferentes regiões do corpo humano, há distintos tipos de sensibilidade e respostas para os estímulos vibrotáteis, com variação das sensações da frequência de aplicação de um impulso sobre a pele e a amplitude desse impulso, ou seja, o deslocamento de pele provocado pelo mesmo, tem percepções distintas para a mesma vibração [16]. Outro desafio encontrado na modelagem de sistemas vibrotáteis é que a percepção de amplitude e frequência são diferentes ao se modificar uma das variáveis, mesmo que o local de sua aplicação seja o mesmo, o que ocorre devido as diferentes densidades nervosas de mecanorreceptores e ao efeito amortecedor do tecido macio abaixo da pele [16].

2.5 Estado da Arte

A área de desenvolvimento de dispositivos táteis vem despertando bastante interesse de estudo, principalmente a partir de 2007, com o surgimento do iPhone e a popularização dos celulares com LCD com tecnologia *touchscreen*. Apesar de ser antigo o interesse em se descobrir a sensibilidade tátil humana, a relevância no desenvolvimento da utilização da pele como uma forma de comunicação é recente. Assim como, aconteceu com o aprimoramento dos dispositivos de interação com a pele, que se tornaram mais leves, mais eficientes, menos intrusivos e mais aceitáveis para a utilização humana [16]. O desenvolvimento de dispositivos para a transmissão de mensagens tem como principais sentidos a visão e audição, enquanto o tato ainda é subutilizado. O sistema tátil tem um grande potencial de estudo devido a sua grande área de cobertura, sendo possível o seu estímulo da cabeça aos pés, cobrindo cerca de 1,8 - 2,0m² em um adulto médio, sua eficiência na captura de atenção e o nível de imersão obtido por meio desse sentido em conjunto com os outros [17]. Além disso, algumas sensações percebidas pela pele humana, como toque e pressão, são bidirecionais, já que a mesma é capaz de sentir e provocar esses estímulos no ambiente ao seu redor. Já foram mostradas evidências de que é possível a transmissão de mensagens complexas através da pele, como mostra o método Todoma [12], ao qual registrou grandes resultados para a comunicação onde pessoas possuem tanto deficiências auditivas como visual. Desde 1992, o IEEE organiza o *IEEE Haptic Symposium* como um fórum interdisciplinar, envolvendo áreas de design de produtos, neurociência e engenharia para compartilhar os conhecimentos referentes ao desenvolvimento de dispositivos táteis. Com grande apelo e necessidade pelo desenvolvimento de mais estudos, em 2010, o IEEE começou uma revista específica para a publicação de artigos na área tátil [18], tendo um foco ampliado no desenvolvimento de sensores táteis e integração com robótica.

A realização de pesquisas às quais tentam relacionar a interação entre música e o sentido tátil não é novidade, envolvendo áreas que estabelecem uma conexão entre a experiência auditiva e a tátil proporcionada por meio desta [8], mas também através do desenvolvimento de dispositivos que permitam a transmissão de melodias, notas e ritmos por meio de sinais vibracionais, como também, sugerido neste trabalho. Em 2018, Merchel e Altinsoy [19], desenvolveu uma cadeira capaz de transmitir as vibrações de uma música para um usuário, apresentando que a utilização do estímulo vibratório foi positivo na experiência de um concerto musical. Em um artigo lançado em 2009 por Karam, Russo e Fels [20], foi apresentado a construção de um dispositivo que exerce o papel de uma cóclea, onde a música é processada via software e depois mapeados para cada um dos oito auto-falantes, funcionando estes de maneira binária, além de examinar as sensações subjetivas sentidas por cada um dos voluntários.

Das pesquisas realizadas, a mais recente encontrada foi de 2020, em que Mirzaei, Kan e Kauffmann [21] que desenvolveram um dispositivo que possibilita que pessoas com deficiência auditiva interagir com jogos e aplicações em realidade virtual. Para isso, é realizado um processamento com o arquivo 3D de áudio e, então, mapeado para dois motores de vibração ERM do tipo moeda, que operam de maneira binária, indicando direção de atenção e não tendo grande foco em estabelecer critérios de distância.

Este trabalho vem apresentar um estudo que acompanha uma linha de pesquisa atual, entretanto, com um outro foco para o seu desenvolvimento. Como forma de se obter um dispositivo leve, flexível, portátil e que possa proporcionar uma variedade maior de sensações, o estudo propõe na realização de dispositivo que possa fornecer ao usuário uma facilidade de utilização, proporcionando uma experiência imersiva e complexa, assim como acontece a sensação ao se ouvir uma música.

Capítulo 3

Sistema Proposto

Neste capítulo descreve-se os passos seguidos para a realização do estudo e obtenção de um modelo final. Mostra-se as metodologias escolhidas para a caracterização do motor de vibração, para a análise das mudanças feitas no circuito e para o estudo da resposta humana aos sistemas estudados.

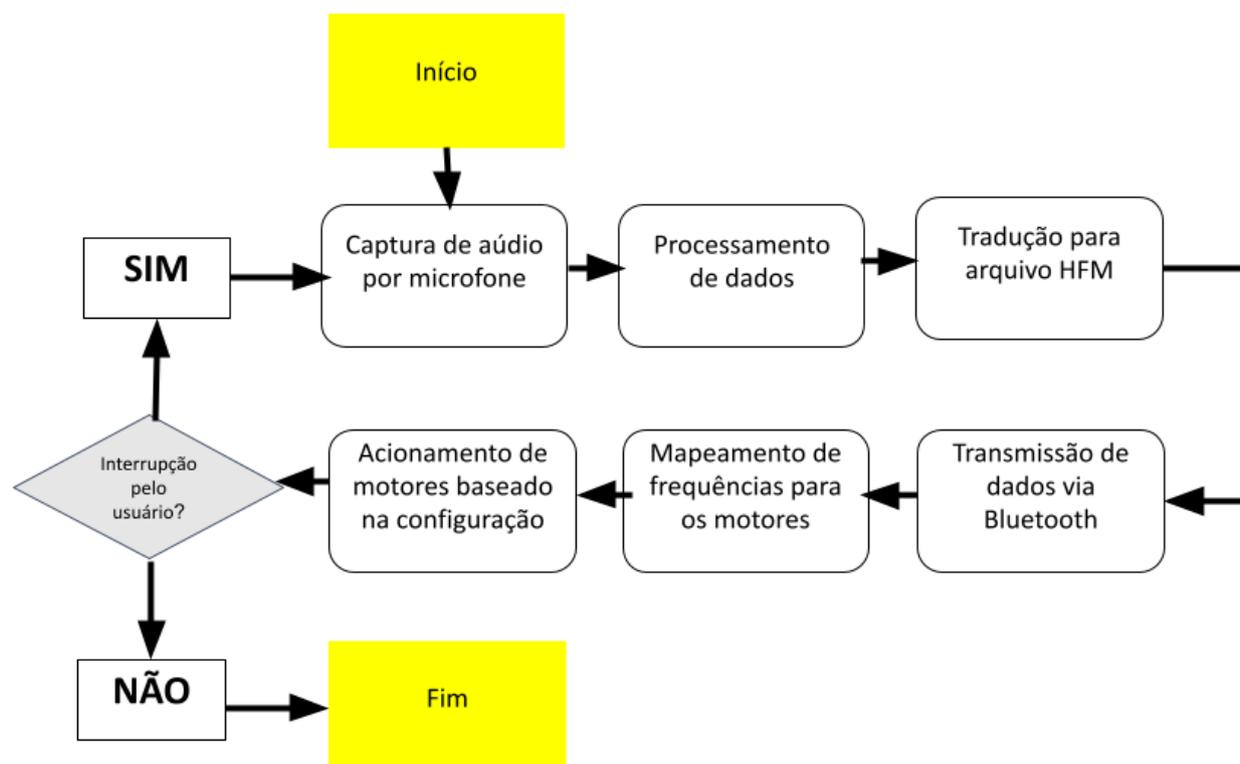


Figura 3.1: Fluxograma do funcionamento do sistema proposto por Klautau [2]

O sistema proposto por Tito Klautau em [2] foi construído através de duas interfaces, sendo uma utilizada através de um dispositivo móvel, e a outra através de um colete. Como apresenta o diagrama presente na Figura 3.1, o sistema é composto da captura de áudio por meio do microfone

do dispositivo *mobile*, do processamento deste, traduzindo-o em um arquivo HFM contendo o espectrograma, da transmissão dos dados via Bluetooth e do mapeamento do sinal processado para os motores de vibração, indicando quais motores acionar. O trabalho a ser apresentado foca na parte do microcontrolador, envolvendo a transmissão de dados por parte do receptor e o controle dos motores, apresentando estudos detalhados e possíveis melhorias na parte do *firmware* e do *hardware*. No estudo realizado, os motores eram mapeados de acordo com faixas de frequência do arquivo de espectrograma definidos no arquivo HFM (do inglês *Haptic Feedback Music*), onde dependendo do valor de entrada, uma parte dos 16 motores eram acionados, de maneira *on-off*. O circuito de controle é composto de um Raspberry Pi 3B, um circuito integrado SN74LS164[22], com cada uma de suas oito saídas conectada a porta de um transistor bipolar do tipo 2N2222[23], onde o motor de vibração do tipo BM0834 encontrava-se conectado a seu emissor, como mostra a Figura 3.2. No trabalho aqui apresentado, procura-se estudar o comportamento de vibração dos motores de maneira contínua, na qual aplicando-se um sinal a um dos circuitos contendo o transistor BJT e o atuador vibrotátil. De forma a melhorar a análise, removeu-se o circuito *shift register*, aplicando-se o sinal analógico diretamente ao circuito controlado pelo transistor.

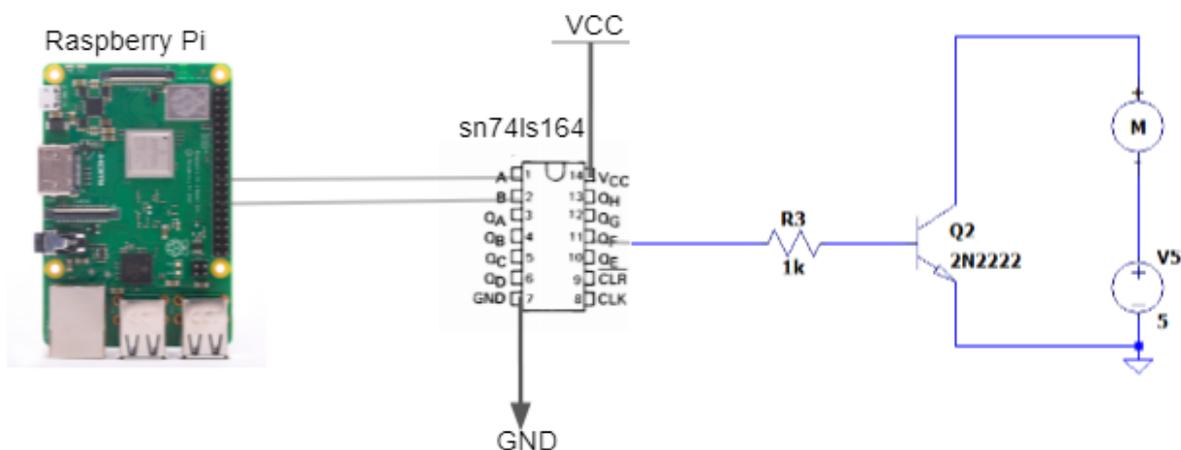


Figura 3.2: Circuito utilizado na monografia de Tito[2]

Como uma forma de analisar a possibilidade de mandar mensagens por meio de um motor, utilizando suas características de intensidade e frequência de vibração, o estudo realiza a caracterização do comportamento analógico adotado pelo atuador.

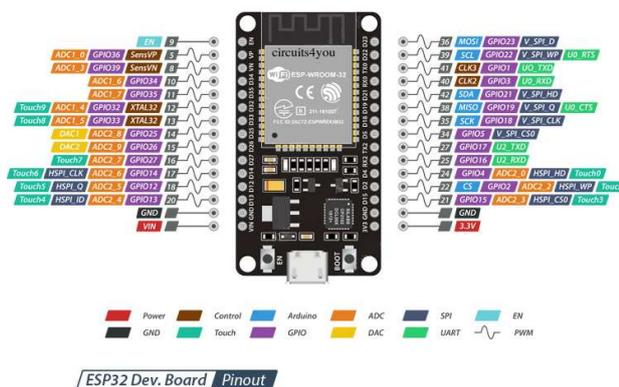
3.1 Microcontrolador

A primeira etapa do projeto consiste em realizar a montagem do projeto de forma a se medir a sua resposta. Como forma de se utilizar um controlador embarcado mais barato e portátil, utilizando-se ao invés do Raspberry Pi, um ESP32S, mostrado na Figura 3.3. Para verificar que a mudança no sistema não afeta o funcionamento do canal de comunicação, através do Bluetooth BLE, realizou-se um teste de vazão, como mostrado na seção 3.1.1. O principal motivo que motiva

a troca realizada foi o fato de que no momento da realização deste projeto, o ESP32S era a solução disponível para utilização no momento da realização do projeto.



(a) Foto da Placa Utilizada



(b) Pinout da Placa de Desenvolvimento

Figura 3.3: Placa do Microcontrolador ESP32

Apesar do Raspberry Pi ser uma placa amplamente difundida no mercado e ter um grande poder de processamento, as especificações de um microcontrolador da família ESP32 são suficientes para atender a demanda de projeto, sendo uma das tecnologias amplamente utilizadas no contexto da Internet das Coisas [24]. Ela possui em sua placa módulos Wi-Fi e Bluetooth e memória flash já inclusos, processador dual-core com frequência de clock ajustável entre 80MHz e 240MHz [25]. A sua facilidade de utilização chama a atenção dos programadores, possuindo a opção de programar utilizando-se a IDE do ESP-IDF, que possibilita a construção de programas nas linguagens C, C++ e até mesmo Python, utilizando do micropython, além de ter opção de se utilizar a IDE do Arduino. O sistema operacional utilizado pela placa para funcionamento é o FreeRTOS, um sistema especializado para aplicações em tempo-real.

3.1.1 Teste de canal Bluetooth

A comunicação entre estas duas interfaces é concebida através de uma comunicação *wireless*, utilizando-se especificamente o Bluetooth BLE (do inglês *Bluetooth Low Energy*). O critério de escolha do protocolo foi devido ao seu baixo consumo de energia, realizando a comunicação sobre a mesma frequência de rádio de 2,4GHz, porém com menor consumo de energia. No experimento realizado para testagem do canal de comunicação BLE foi utilizado um aparelho *smartphone* e um microcontrolador ESP32S. Por se tratar de uma rede do tipo sem-fio de área pessoal (WPAN), o teste limita-se em descobrir se a comunicação consegue ser efetivada em até 10 metros de distância entre o aparelho móvel e o microcontrolador. Para a comunicação, o código do servidor utilizado baseou-se no exemplo de contador de batimentos cardíacos presente no repositório `btstack`¹. Pelo lado do usuário utilizou-se o aplicativo Bluetooth Terminal HC-05[®], da empresa mightyIT, fornecendo uma interface simples para poder enviar dados para o servidor e monitorar a comunicação. Com os sistemas implementados, primeiramente buscou-se medir o tamanho máximo de dado a

¹<https://github.com/bluekitchen/btstack>

ser transmitido por pacote, sendo realizado com o dispositivo celular a 20 cm de distância do microcontrolador. Depois de medida, a segunda parte do experimento, consistiu na verificação se o pacote conseguia ser enviado de maneira síncrona, dentro de um tempo pré-estabelecido (*deadline*).

Para a definição do *deadline* a ser utilizado para a execução do teste, levou-se em consideração a sensibilidade frequencial do tato humano. O sistema tátil possui comportamento distinto em cada parte do corpo, tendo diferentes sensibilidades com relação amplitude e frequência de vibração e duração do estímulo, entretanto as diferentes áreas do corpo possuem a sensibilidade ótima em uma faixa de 150 a 300Hz [16]. Tendo este limite como base, realizou-se o teste com valores de 300Hz, 200Hz e 150Hz.

3.2 Motores de vibração

Realizados os testes de validação da troca do Raspberry-Pi pelo ESP32, os próximos testes objetivaram a montagem do circuito de controle dos motores de vibração e caracterização do sistema, obtendo uma função de transferência da amplitude de oscilação obtida em função do sinal analógico de entrada. Os motores de vibração trabalhados neste projetos são motores de rotação de massa excêntrica (RME), sendo mais especificamente os motores do tipo moeda. Apesar da existência de novas tecnologias, como o LRA e os atuadores de vibração piezoelétricos, os motores RME são os mais disponíveis no mercado, por um preço e documentações mais acessível, tornando-os mais fáceis de serem trabalhados.

O projeto anterior contava com oito motores do tipo moeda, sendo eles de pequeno porte e leves, o que permite sua disposição em várias partes do corpo humano, sem causar desconforto. Para os primeiros testes a serem apresentados, não há a intenção de possuir motores de diferentes tipos para diferentes faixas de sinais na construção do projeto, atendo-se apenas na construção de um circuito de controle dos motores e na análise dos sinais obtidos.

Os motores RME são motores DC com escovas de alta velocidade, com uma tensão nominal em torno em 3V. Para o design do circuito a ser trabalhado, deve-se explorar ao máximo possível a faixa linear de operação do atuador, antes de entrar em seu estado de saturação. A primeira abordagem a ser analisada foi a utilização de apenas um transistor, onde o sinal analógico da porta PWM do ESP32 estaria conectado à base do transistor, a tensão de alimentação do motor no coletor e o motor com um polo ligado ao emissor e o outro ao terra. Na Figura 3.4 apresenta o primeiro esquemático de circuito. O sinal de entrada aplicado a porta do transistor foi a canal PWM do ESP-32.

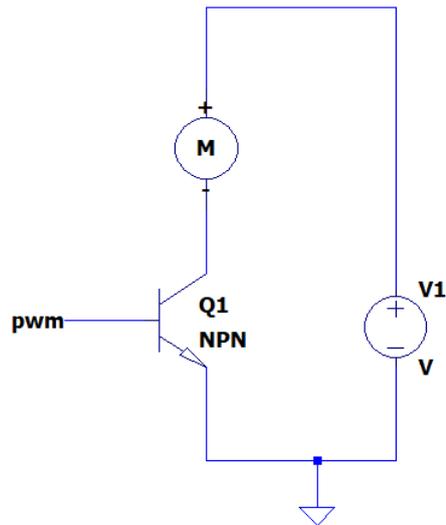


Figura 3.4: Design circuito com transistor 2N2222 - software LTSpice[®]

Originalmente, no circuito utilizado constava um transistor bipolar NPN modelo 2N2222 [23], sendo um componente de baixa tensão, com corrente de coletor máxima de 1,2A e tensão máxima de base-emissor de 5V. O transistor de característica BJT possui uma fácil polarização, possibilitando que seja feito o controle da corrente a ser consumida pelo motor através da corrente que passa por sua base. Para que seja alcançado o objetivo desejado com o circuito, necessita-se que possa ser alimentado o motor com a corrente necessária para alcançar sua maior amplitude de vibração.

3.3 Medida da Vibração

Com os sinais obtidos, passa-se então para as medidas utilizando um instrumento de medida para as vibrações. A primeira tentativa de captura da resposta do motor utilizou o acelerômetro circuito lógico MPU6050 [26]. Este CI possui um giroscópio e um acelerômetro com dados de 16-bits de precisão, ao qual utiliza-se da interface I²C para a realização da comunicação entre o sensor e o microcontrolador. O sensor de aceleração possui um filtro passa baixas programável de 5 a 260Hz e uma faixa de saída entre 4Hz e 1000Hz, suficiente para o caso do projeto apresentado, já que a frequência máxima do motor é entorno de 12000 rpm, equivalente a 200Hz.

A tecnologia I²C é um meio síncrono de comunicação entre circuitos integrados através de dois fios de barramento, sendo um o SCL (do inglês *Synchronous CLock*) e o outro o SDA (do inglês *Synchronous DAta*) [27]. A comunicação é iniciada pelo mestre, que gera um sinal de clock para que o escravo sincronize-se e seja iniciada a transferência de dado. Em casos onde há a presença de mais de um escravo ou mais de um mestre, o início da transmissão é indicada com o SCL com sinal high e o SDA com sinal down, sendo em seguida enviado o endereço do receptor em 8 bits mais um bit que indica a operação de leitura ou escrita, como mostrado na Tabela 3.1, tendo como

resposta um bit 0 de *acknowledgment* em caso de sucesso, iniciando assim a transmissão do dado. O ESP32 oferece um driver que possibilita o controle através de funções de alto nível em C [28], podendo atuar das duas maneiras. No caso aqui estudado, o microcontrolador atuará como um mestre e o MPU6050 como escravo.

Tabela 3.1: Representação da mensagem de identificação no protocolo I²C

| Endereço (7 bits) | | | | | | | Escrita ou Leitura |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| End 6 | End 5 | End 4 | End 3 | End 2 | End 1 | End 0 | R/ \overline{W} |

O código para a obtenção dos dados de vibração do motor no ESP32 pode ser visualizado no apêndice. A primeira parte do algoritmo consiste em realizar a configuração dos pinos a serem utilizados como SDA e SCL, do pino PWM para a utilização do motor, assim como a definição do modo de operação do microcontrolador como mestre, a instalação do driver e a criação de link de comunicação com o MPU6050. A segunda parte, onde realmente é realizada a coleta dos dados, realiza-se um ciclo de repetição, registrando o endereço de captura da aceleração em X, como mostrado na Tabela 3.2, captura-se os 6 bytes referentes aos dados de aceleração e então realiza-se o cálculo para obter o valor correto de aceleração no eixo desejado. Como o acelerômetro está disposto de maneira horizontal, o eixo que contém o dado de interesse é o eixo Z. Por fim, o dado é enviado via serial UART (do inglês *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) para o computador, onde serão realizados os gráficos e estudos a respeito das características dos motores.

Tabela 3.2: Endereços dos dados no MPU6050

| Endereço | Dado contido |
|----------|----------------------------------|
| 0x3B | Aceleração eixo X (HIGH) |
| 0x3C | Aceleração eixo X (LOW) |
| 0x3D | Aceleração eixo Y (HIGH) |
| 0x3E | Aceleração eixo Y (LOW) |
| 0x3F | Aceleração eixo Z (HIGH) |
| 0x50 | Aceleração eixo Z (LOW) |
| 0x41 | Temperatura (HIGH) |
| 0x42 | Temperatura (LOW) |
| 0x43 | Aceleração Angular eixo X (HIGH) |
| 0x44 | Aceleração Angular eixo X (LOW) |
| 0x45 | Aceleração Angular eixo Y (HIGH) |
| 0x46 | Aceleração Angular eixo Y (LOW) |
| 0x47 | Aceleração Angular eixo Z (HIGH) |
| 0x48 | Aceleração Angular eixo Z (LOW) |

3.4 Caracterização da Função de Transferência

Com os dados coletados, a próxima etapa a ser realizada é a obtenção de informações do sistema por meio dos gráficos de saída na tentativa de encontrar uma função de transferência que apresente a relação entre a entrada da porta analógica e a amplitude de vibração apresentada. Com estes dados, sendo possível então a caracterização do sistema e depois, uma análise de sua aplicabilidade com relação ao projeto proposto e sua relação com o sistema tátil humano.

A abordagem escolhida para se encontrar a função transferência foi utilizando a *Toolbox* do Matlab de identificação de sistemas [29], analisando-o como uma caixa preta. Nesta ferramenta, utiliza-se os dados de entrada e saída do sistema e, através do método escolhido de estimação, retornando um modelo de sistema. A primeira tentativa de utilização da *Toolbox* não foi bem sucedida, pois a ferramenta trabalhada não conseguia estimar bem com dados puramente oscilatório, com grande número de amostras e alta frequência, sendo necessário o pré processamento prévio dos valores a serem trabalhados. Para melhoria do sistema analisado, realizou-se os seguintes passos, de forma a mudar o formato dos dados analisados, sem alterar o comportamento do sistema:

- Remoção do deslocamento vertical devido a gravidade
- Divisão dos dados com relação ao valor máximo possível a ser observado na variável em observação
- Adição de um filtro passa-baixas para remoção de componentes de alta frequência

Com a iniciativa de se expandir o projeto anteriormente apresentado, comprou-se mais motores, podendo assim construir-se um colete com atuadores nas costas, braço e mão esquerda e tórax. Com o intuito de observar se as características dos motores anteriormente analisados eram compatíveis com a dos novos, replicou-se o estudo anteriormente feito para os motores recém comprados.

3.5 Controle dos Motores de Vibração

Realizadas as medidas com os dois motores e suas devidas caracterizações, o trabalho a ser realizado consistiu na sugestão de melhorias ao sistema atualmente apresentado. Os transistores do tipo junção bipolar possuem alguns tipos de características que fazem com que outras opções de transistores seja mais adequados, como sua relativamente baixa impedância de entrada, fazendo com que a corrente de base seja alta, a interferência aleatória de sinal e o fato de que a condutividade do transistor BJT aumente com o aumento de temperaturas [30].

Na configuração atual do circuito, onde o transistor atua como chave, observa-se que o regime linear de operação do transistor é ainda muito curto. Era preciso torná-lo maior, de forma com que a faixa de valores de entrada seja aproveitada ao máximo, proporcionando ao usuário final

diferentes sensações. Realizou-se pois, mudanças no sistema. A primeira abordagem a ser considerada foi tentar trabalhar com diferentes tipos de ondas para a entrada do processo. O PWM é essencialmente uma onda quadrada, que varia em valores de 0 e 1 de maneira muito rápida, sob diferentes *duty cycles*, fazendo com que a tensão eficaz percebida pelo sistema seja diferente. Uma das maneiras de se obter uma onda que mais se aproxima de uma característica puramente analógica é aumentando a frequência da modulação. A escolha de uma diferente frequência vem acompanhada também de uma mudança de resolução do sistema, seguindo-se a seguinte proporção

$$f = \frac{\text{Frequência}}{\text{Divisor} \times \text{Precisão}}. \quad (3.1)$$

No caso do ESP32, é possível trabalhar-se com a resolução de 8 a 15 bits, enquanto a frequência do clock é possível se trabalhar de 8MHz a 80MHz. Uma das possibilidades também oferecidas é através de uma filtragem passa-baixas em baixo nível, fornecendo ao sistema uma onda analógica em uma frequência bem inferior.

Trabalhando com o ESP32 é possível utilizar de outras técnicas para manipular valores próximos de um sinal analógico além do PWM. O microcontrolador permite a utilização dos conversores digital-analógico de 8 bits para sua utilização das portas 25 e 26, podendo assim fazer um controle através da tensão de saída. Infelizmente, apenas dois canais DAC são disponíveis para uso, sendo um deles inutilizável em um caso em que haja a comunicação via Wi-Fi ou Bluetooth. A outra possibilidade existente é trabalhando com a modulação sigma-delta, sendo implementada em baixo nível, chamadas através de módulos nativos da ESP-IDF. É possível se trabalhar com 8 canais com este tipo de modulação, tendo uma resolução de 8 bits.

Além das abordagens de *software* descritas, estudos foram realizados considerando filtragens e modificações no hardware do sistema. Apesar da simples implementação do circuito, previamente mostrado, ele é muito dependente das características específicas do transistor utilizado no teste, variando muito a resposta ao trocar o componente. Além disso, a zona de operação de saída é bem pequena, o que torna o mapeamento das diferentes características musicais mais limitada. Dessa forma, realizou-se o estudo do comportamento da vibração registrada pelo acelerômetro com outras topologias de circuito, trabalhando com uma filtragem passa-baixas por circuito RC e um estudo da definição do ganho de forma a se obter as características de saída desejadas.

A primeira topologia alternativa a ser testada foi um amplificador de tensão utilizando o transistor 2N2222. Com esta topologia, aplica-se um sinal filtrado com um capacitor na porta do transistor, e trabalha com o motor sendo utilizado como a impedância de coletor. Realizou então variações do sistema previamente proposto, procurando formas de se obter uma faixa operacional maior e testando diferentes tipos de transistores. Nesses casos, foram feitas simulações com as topologia MOSFET e Darlington, além de ajustes necessários para cada uma das topologias e comparando aos resultados obtidos. De forma a facilitar a descrição dos circuitos, daqui para frente adota-se a seguinte nomenclatura:

- Circuito I - Circuito representado pela Figura 3.4, onde o transistor atua como chave
- Circuito II - Circuito representado pela Figura 4.18, no qual o capacitor está conectado ao

emissor do transistor

- Circuito III - Circuito representado pela Figura 4.18, no qual o capacitor está conectado ao coletor do transistor, de forma a filtrar a corrente I_c

Os circuitos propostos foram primeiramente simuladas utilizando o software LTSpice® e depois montadas e registrados os valores de aceleração registrados do motor de vibração. No LTSpice®, realizou-se a implementação de um gerador de ondas PWM, onde poderia simular a entrada do microcontrolador, de forma a se perceber ao máximo o efeito dele sobre o sistema e como a sua frequência pode afetar a resposta percebida.

Na análise realizada, a variável de saída sob estudo foi a corrente que passa pelo motor. Depois, os mesmos foram montados em uma *protoboard*, registrando os sinais de vibração do motor e analisando as diferentes características obtidas, comparando com o circuito que estava sendo utilizado anteriormente e julgando assim qual das montagens estudadas consegue fornecer a maior faixa de saída.

3.5.1 Análise de frequência

A análise do comportamento do sistema tendo como variável a frequência foi realizado utilizando gráficos capturados e através da coleta de novos sinais, com novos sinais de entrada. Por meio do estudo desses dados, foi permitido relacionar a variação de frequência com a entrada do sistema, sendo assim, parâmetro para comparação com a sensibilidade da pele humana.

Os estudos de espectrograma obtidos através dos gráficos permitiram encontrar quais eram as componentes dominantes de frequência ao se aplicar um sinal de entrada. Utilizou para isso o Matlab, com uma janela de Hamming, sendo mostrados os dados coletados no Capítulo 4. Foram realizadas as mudanças no circuito e no modelo do motor. A realização e análise de novos dados foram feitas modificando as variáveis de frequência das funções de entrada do sistema. Um estudo de comportamento com ondas senoidais e quadradas foi feito, registrando os limites de frequência que podem ser aplicados de forma que o acelerômetro ainda possa marcar alguma diferença.

3.5.2 Análise de amplitude

À partir dos gráficos coletados contendo as resposta dos motores registradas por meio do acelerômetro do MPU6050, foi realizada uma análise do comportamento das curvas focando na variação de sua amplitude. Assim, analisando também, as respostas obtidas pelo motor nas três entradas e expandindo as coletas para se marcar dados de zona-morta, atraso do sistema e variação de amplitude percebida pelo sensor. Desta variável resultou a caracterização através de uma função de transferência contínua.

Para as outras características do circuito a serem medidas, foram usadas ondas predominantemente quadradas e triangular, além da análise dos gráficos previamente obtidos. Para caracterização da zona morta e da discretização entre os diferentes valores de entrada, permite-se que seja

definido uma faixa de operação do sistema e a base para se comparar a discretização percebida pelo sensor eletrônico e biológico.

3.5.3 Motores Modelo A e B

Durante a realização do projeto, foram comprados novos motores para a realização de testes. Apesar de ambos serem motores ERM do tipo moeda, observou-se que o comportamento mostrado pelos dois era um pouco diferente. Procurando descobrir alguma documentação a respeito do novo motor, de comparando-o com o modelo utilizado no trabalho do Tito [2], descobriu que de fato tratavam-se de modelos diferentes. Tendo isto em vista, para observar de maneira empírica a diferença apresentada no comportamento de ambos, optou-se por realizar os testes, tanto com o acelerômetro, quanto com as pessoas, utilizando os dois modelos. À partir daqui, a nomenclatura utilizada para diferenciar os dois será

- Motor A - Motor utilizado no trabalho do Tito, do modelo 0834[31], com faixa de operação de 2,5 a 4V, velocidade de vibração que varia entre 9000 e 12000 rpm.
- Motor B - Motor comprado posteriormente, do modelo 1027, com tensão operacional de 2,5 a 3,5V, velocidade de vibração de 9000 rpm em 3V e corrente máxima de 120mA.

3.6 Testes com Voluntários

O experimento foi realizado em um espaço preparado para que os participantes se mantivessem focados nas tarefas solicitadas. Foram dadas as informações prévias que o objetivo do projeto era a percepção da sensibilidade da pele com relação aos estímulos de vibração. Na segunda etapa de teste, o objetivo foi realizar um teste com relacionando o aprendizado das pessoas com os formatos de onda e a posição de aplicação.

No projeto apresentado, o local de estudo serão regiões contidas nos membros superiores humanos, mais especificamente nos antebraços, como mostrado na Figura 3.5, e dedos. Estas estão entre as regiões com maior sensibilidades, conseguindo sentir uma faixa maior de frequências, variando de vibrações menores do que 0,5Hz a até 500Hz, sob pequenas intensidades, onde enquanto os dedos sentem uma vibração de 200Hz com $0,07\mu\text{m}$ de deslocamento de pele, a região abdominal precisa de valores que variam entre $4\text{-}14\mu\text{m}$ [16]. Entretanto, apesar da quantidade inervações neurais permitir uma maior sensibilidade de frequência, Verrilo e Chamberlain notaram que com relação a diferentes intensidades possui uma relação inversamente proporcional [32] indicando que as mudanças de intensidades percebidas em abdômen e braço são maiores do que nos dedos. Dessa forma, planejar a realização do dispositivo tendo como base o braço, pareceu ser ideal, conseguindo reunir uma alta sensibilidade de frequência, com uma considerável discretização de intensidades.

Os experimentos foram realizados com pessoas de um núcleo social próximo, respeitando as regras de distanciamento social geradas pela condição pandêmica do Covid19, dessa forma o estudo foi inicialmente conduzido com voluntários de diferentes faixa-etárias e gêneros. Apesar

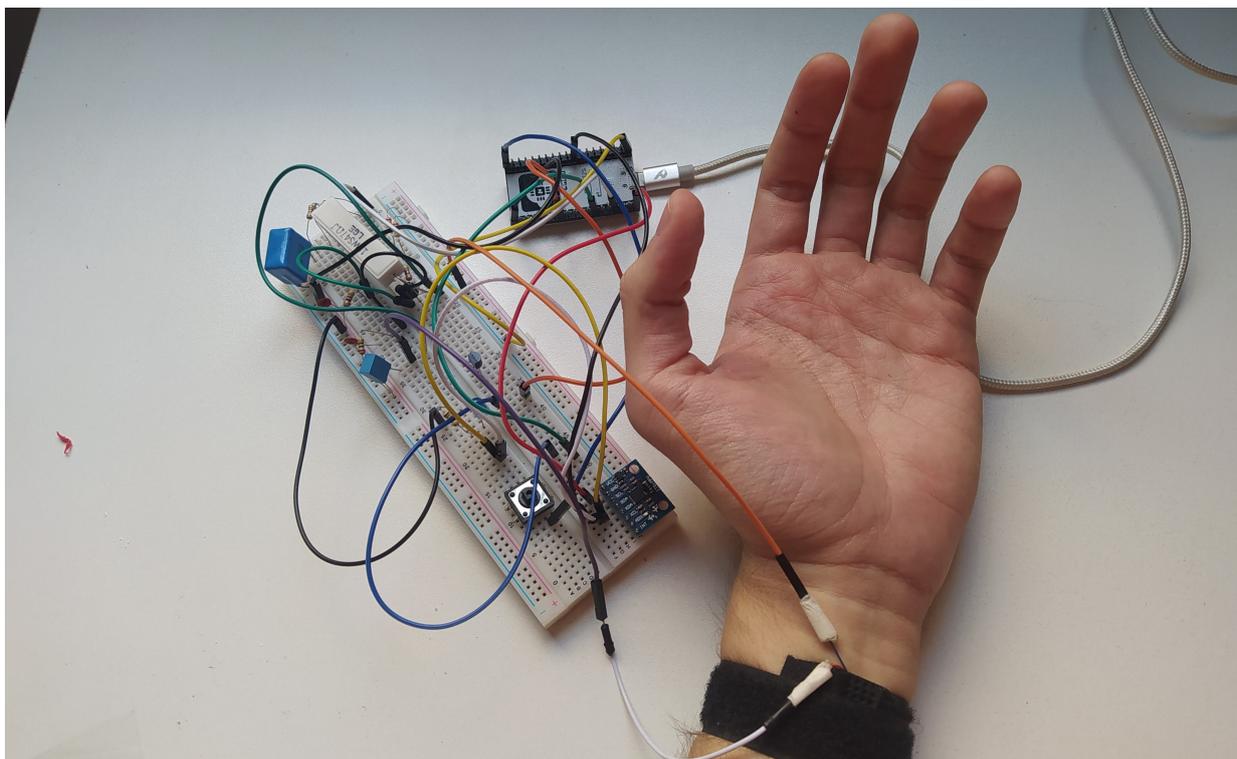


Figura 3.5: Forma de aplicação de estímulo vibrotátil em voluntários

dos estudos apontarem a diferença de sensibilidade tátil das pessoas, suas as qualidades físicas e mentais não foram consideradas, sendo os dados considerados para as estatísticas.

Foi informado, também, aos participantes que o experimento não representava nenhum risco para sua integridade física e que estavam livres para abandonar o estudo se desejassem e que os dados obtidos seriam utilizados de maneira anônima em um trabalho acadêmico, uma monografia de projeto final de curso. Após as devidas instruções um formulário foi preenchimento com intuito de caracterizar os estados físicos e emocionais do participante. Durante os experimentos, foi solicitado que as pessoas expressassem as sensações sentidas por meio dos motores de maneira objetiva e subjetiva.

A testagem conduzida com os voluntários teve como intenção caracterizar a resposta obtida pelo sistema tátil para os parâmetros de amplitude e frequência de vibração. O foco da área de aplicações e testes foi antebraço e mão. Dessa forma, a análise realizada de percepção de amplitude e frequência da vibração serão separadas da variável local de aplicação, conduzindo todos os testes para descobrir a sensibilidade desses parâmetros na área específica. A escolha desses locais de aplicação se deram por dois fatores principais: o primeiro a facilidade de fixação dos motores junto a pele do participante e, assim, aplicar os impulsos e, o segundo, a grande sensibilidade tátil dos membros superiores, principalmente das regiões terminais, como os dedos.

Os testes conduzidos foram com sinais de entrada iguais aos utilizados anteriormente no projeto, descobrindo como os parâmetros e qualidades do sistemas se diferenciam da caracterização

obtida previamente utilizando o acelerômetro. Os parâmetros encontrados foram fundamentais para se obter o nível de complexidade e a variedade de sensações possíveis de se gerar com um único motor. Desta maneira foi-se estabelecendo os parâmetros necessários para mapear características sonoras, como altura, intensidade e timbre. Além das características capturadas com as ondas de entradas, verificou-se a sensibilidade das pessoas a respeito das diferentes configurações de circuitos e de motor, analisando se as mudanças identificadas pelo acelerômetro chegam a ser sentidas pelos voluntários.

Os testes foram feitos utilizando o motor de vibração conectado ao circuito e uma pulseira de velcro, com propósito de sustentação. Foi colocada a pulseira com o motor no pulso, na região interna do antebraço, de maneira confortável a todos os participantes. Para adequar aos sinais de vibração, foi aplicado impulsos com característica senoidal, rampa e quadrática. Em seguida, foi feita análise da quantidade de intensidades diferentes notáveis pelas pessoas, solicitando que contassem quantos níveis diferentes de vibração foi possível perceber. Este experimento foi feito utilizando-se diferentes faixas de entrada, variando o *duty cycle* do PWM de acordo com o desejado, permitindo perceber em quais regiões as pessoas conseguiam diferenciar as intensidades percebidas. Para descobrir a região de zona morta com relação a amplitude, utilizou-se a onda quadrada, onde aplicava dois impulsos, um deles com o maior valor máximo de PWM de entrada, enquanto o outro era variado a cada experimento, até o momento em que a pessoa não conseguia mais senti-lo.

A testagem da frequência percebida pela pessoa foi realizada utilizando uma vibração com entrada de um sinal senoidal de diferentes frequências, tentando descobrir até qual ponto foi possível distinguir entre um sinal ondulatório e um sinal constante. Na perspectiva de registrar alguma possível diferença, na testagem foi utilizada uma onda quadrática. Após esta etapa o motor foi trocado pelo mais antigo, como uma forma de encontrar os mesmos parâmetros. Em uma etapa seguinte foi fixado um motor de cada modelo em cada um dos pulsos dos voluntários, pedindo que descrevesse de maneira comparativa a ação de ambos.

Com a finalidade de comparar a ação de cada um dos circuitos sobre o sinal de vibração percebido, os voluntários foram submetidos a aplicação de um sinal de rampa crescente, onde o motor estava conectado ao transistor em configuração de chave, pedindo então para que assinalasse as diferenças sentidas com relação ao sinal anterior.

Apesar de o experimento ter como foco a medição da sensibilidade das pessoas na região do pulso, foi pedido aos voluntários que segurassem o motor com os dedos e falassem sobre as sensações obtidas. Assim como, como comparavam a experiência de ter uma vibração aplicada aos dedos e ao pulso. Mesmo que neste experimento há os resultados adquiridos apenas na região interna do antebraço, a coleta desses dados objetivos e subjetivos são importantes, pois auxiliam na condução de estudos futuros e em um possível desenvolvimento de um produto final.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio das metodologias propostas, através de simulações e experimentos, analisando e comparando os resultados obtidos com os resultados esperados.

4.1 Comunicação Wireless

Na comunicação entre o dispositivo móvel e o microcontrolador usando Bluetooth BLE, o maior tamanho de pacote que conseguiu ser enviado com sucesso, sem quebrar a sincronicidade, foi de 106 bytes. Quando apresentados os trabalhos realizados com as portas analógicas do ESP32, este tamanho de dado foi suficiente para o envio de sinal a todos os motores presentes no sistema contendo um microcontrolador. O teste de frequência máxima alcançada foi abaixo do esperado, operando em 100Hz sem perdas significativas de pacotes e falha de sincronização.

4.1.1 Medida da Vibração usando MPU6050

Os motores foram analisados com três diferentes tipos de curvas de entrada: degrau, rampa e senoidal. A partir das respostas obtidas são analisadas as características inerentes ao processo, como atraso, sobressalto, tempo de resposta, zona morta e então formalizar uma função de transferência para o sistema observado. Os gráficos das respostas são apresentados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

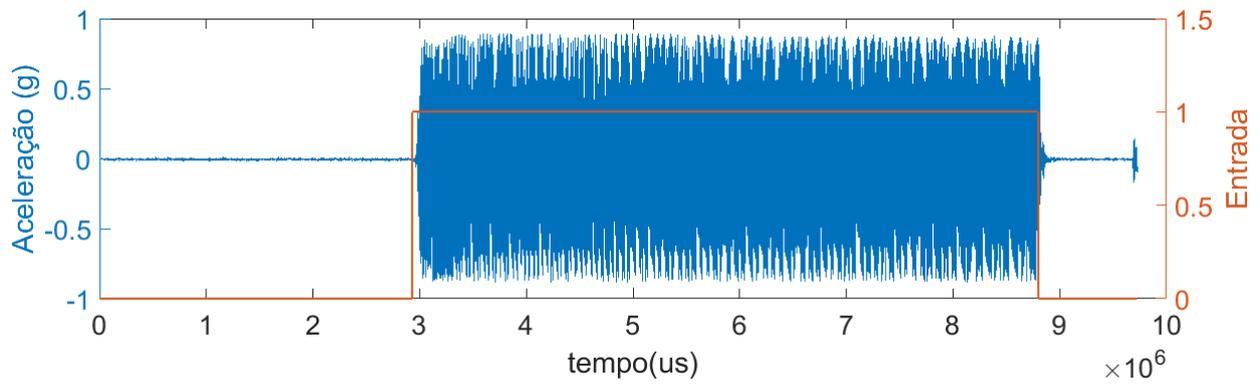


Figura 4.1: Resposta do motor A ao degrau utilizando-se o MPU6050

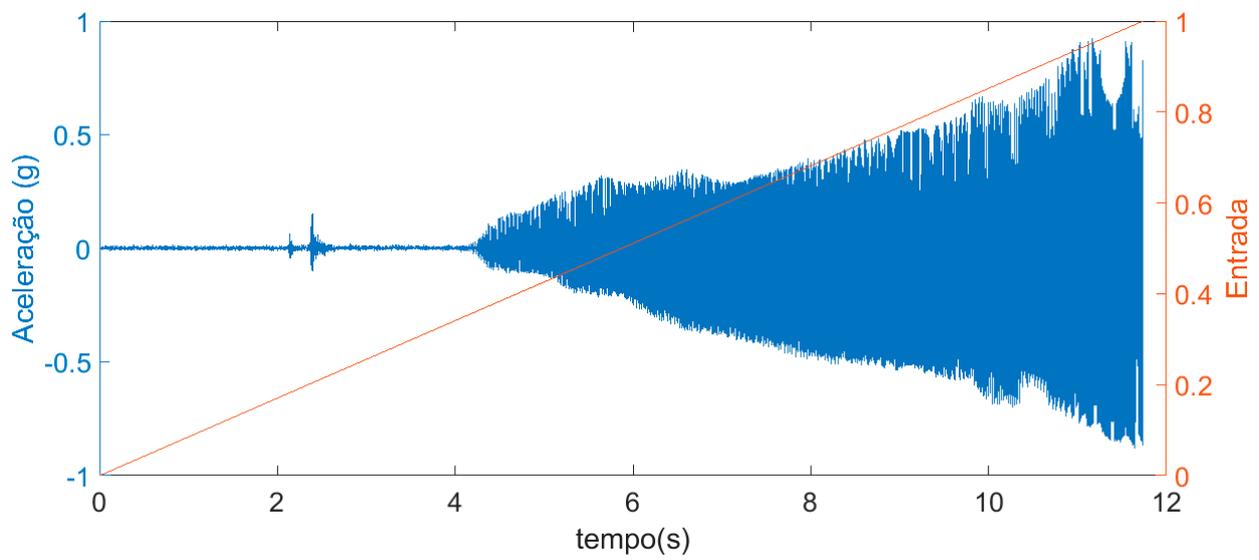


Figura 4.2: Resposta do motor A à rampa utilizando-se o MPU6050

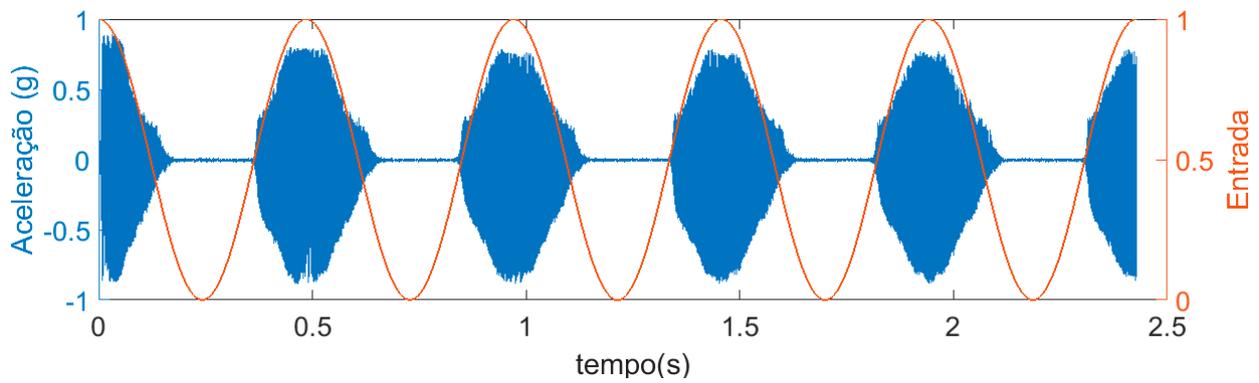


Figura 4.3: Resposta do motor A à cossenóide utilizando-se o MPU6050

Pelos gráficos observa-se que o comportamento era o mesmo dos dados obtidos com o acelerômetro do celular, havendo pequenas variações dentro do esperado, conseguindo assim, trabalhar com uma taxa de coleta de dados ainda maior, enquanto a taxa máxima de captura no acelerômetro do smartphone era de 2ms, no MPU conseguiu-se uma taxa de uma amostra a cada 1,1ms.

As diferenças apresentadas foram o deslocamento vertical do gráfico, devido ao valor da aceleração da gravidade que não foi subtraída, e os valores numéricos da aceleração, pois a unidade utilizada pelo MPU é diferente da unidade apresentada pelo acelerômetro antes analisado. Entretanto, estas disparidades não chegam a causar interferência nas análises dos dados apresentados.

4.1.2 Caracterização das Funções de Transferências

Tratando-se da amplitude da vibração como variável de saída a ser analisado, pode-se remover o comportamento ondulatório apresentado pelo sistema original. Como descrito na Seção 3.4, a filtragem dos dados tornou possível a estimação da amplitude máxima de vibração sistema através da *toolbox* de identificação de sistemas do Matlab. A função de transferência que melhor modela o sistema do Motor A é dada por

$$H_A(s) = \frac{6.091 \times 10^5 (s - 0,0124)}{s^2 + 41,76s + 0,008793}. \quad (4.1)$$

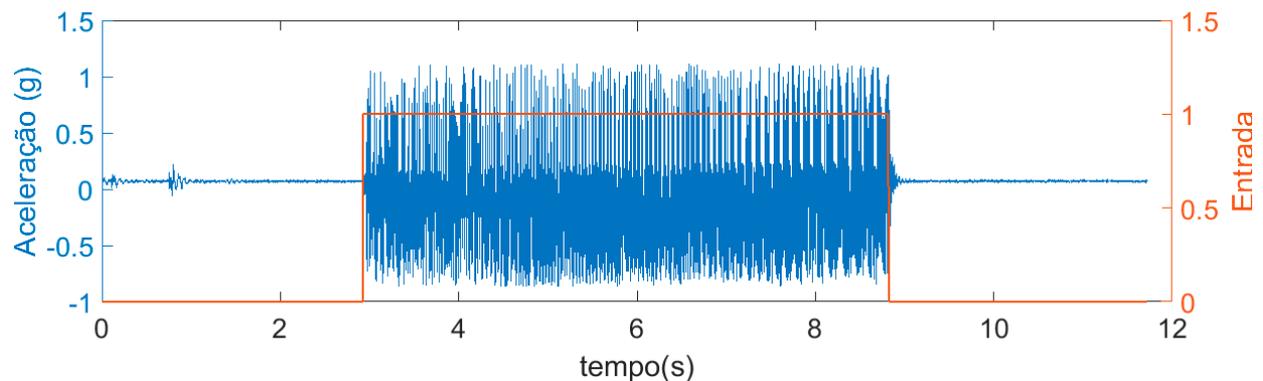


Figura 4.4: Resposta do motor B ao degrau utilizando-se o MPU6050

Para o Motor B a função de transferência obtida, da Figura 4.4 é descrita por

$$H_B(s) = \frac{34.93s + 2403}{s^2 + 65.59s + 2359}. \quad (4.2)$$

Utilizando-se a *Toolbox* Simulink do Matlab para realizar a simulação dos dois sistemas à aplicação de um degrau, chega-se então aos resultados mostrados pela Figura 4.5

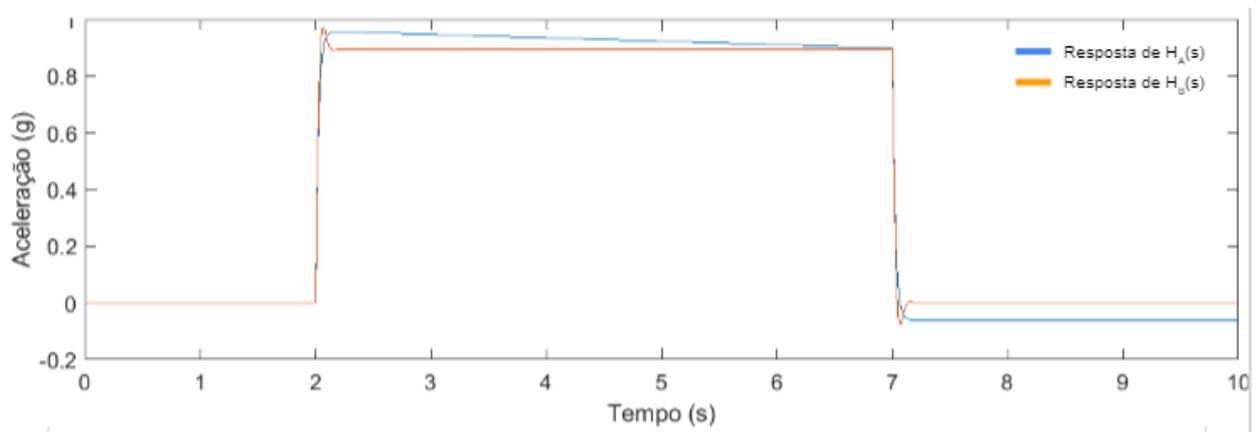


Figura 4.5: Resposta das funções transferência estimadas para os motores A e B

Comparando-se a resposta obtida com as duas funções de transferência, percebe-se que a resposta obtida por ambas são similares, indicando que com relação aos parâmetros de intensidade de vibração das amostras observadas, o comportamento dos dois atuadores foi próximo.

4.1.3 Análise de zona morta e atraso

Realizando-se a análise utilizando sinais do tipo rampa, é possível encontrar os resultados referentes a zona morta dos dois modelos de motores trabalhados. Para os estudos realizados utilizando-se o circuito I Observa-se que os dois atuadores chegaram a 10% de seu valor de referência à partir de 1,2V. Entretanto, como mostrado anteriormente, o Motor A apresenta um sinal bem mais linear quando comparado com o do tipo B, com este atingindo o valor de 5% de sua referência com uma entrada de 0,8V e chegando a 10% em 1,25V. A figuras utilizadas em questão são a Figura 4.2 para o motor do modelo A e a Figura 4.6 para o modelo B.

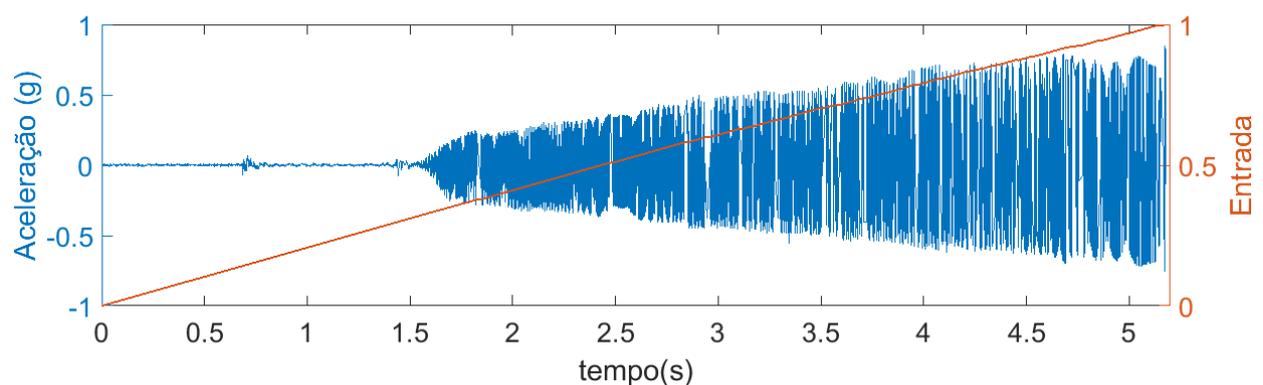


Figura 4.6: Resposta do Motor B à rampa

Com relação ao atraso percebido, os dois atuadores apresentaram valores similares. Um dos

detalhes observado, entretanto, foi que a entrada aplicada ao motor influencia o atraso de sua resposta, em que para menores entradas o atraso é maior. Este efeito pode ser notado de maneira clara nos dados expostos na Tabela 4.1, onde o atraso obtido com a entrada de 3,3 V é 20% do atraso obtido aplicando-se um degrau de 1,21V.

Tabela 4.1: Atraso de resposta do motor tipo B

| Tensão de Entrada (V) | Tempo para alcançar 5% do máx. (ms) | Tempo para alcançar 10% do máx. (ms) |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1,21 | 67 | 189 |
| 1,65 | 50 | 92 |
| 3,3 | 28 | 39 |

4.1.4 Resposta das Funções de Transferência

Tendo os dados de zona morta, atraso e a função de transferência, torna-se possível realizar uma simulação com os sistemas. Nas Funções de Transferência representadas pelas Equações 4.1 e 4.2, a representação realizada considerava-se apenas a amplitude máxima de vibração. Para tentar representar o comportamento oscilatório, mediu-se a vibração detectada por cada motor quando aplicado o degrau, com valor máximo do PWM, sendo para o motor A o valor de 6500 rpm e para o motor B, 7500 rpm. Utilizando o Simulink do Matlab, aplicando-se uma rampa variando de 0 a 1 em sua entrada, a resposta obtida foi a mostrada pelas Figuras 4.7 e 4.8. Na simulação realizada com os dois modelos, utilizou-se diferentes formas de se representar a zona morta. Para o Motor A, utilizou-se o componente *deadzone* presente na biblioteca do Simulink, enquanto que para o Motor B utilizou-se um *switch*, de forma a representar melhor o comportamento apresentado pelos motores.

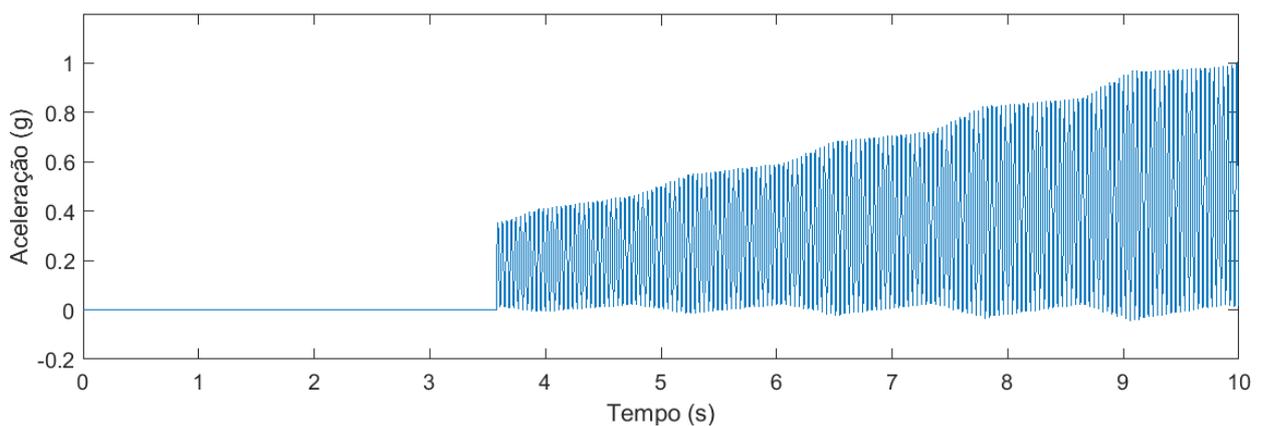


Figura 4.7: Resposta da Simulação do Motor A à rampa

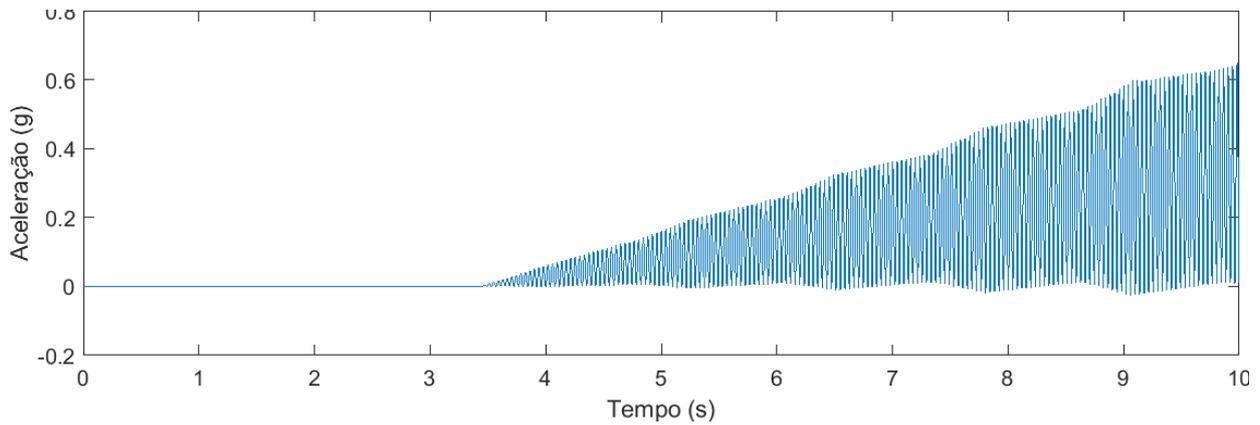


Figura 4.8: Resposta da Simulação do Motor B à rampa

Na simulação realizada, a frequência utilizada é constante, de acordo com a medição realizada. Entretanto, para verificar de que forma a frequência varia com relação a entrada, os dados contidos na Seção 4.2, contendo os espectrogramas das respostas obtidas, mostram de que forma a frequência varia de acordo com a entrada aplicada.

4.2 Espectrogramas

Realizada a análise da intensidade de vibração dos motores, o estudo da frequência de vibração foi feita coletando o espectrograma referente aos dados anteriormente adquiridos. Para isso, utilizou-se a ferramenta `spectrogram` do Matlab, ao qual conta com a função de obtenção dos espectrogramas em esquema de cores, sendo as mais quentes referentes às frequências com amplitudes mais altas presentes no sinal, e as mais frias as com menor amplitude. Como uma forma de melhorar a visualização das diferentes harmônicas encontradas, utilizou-se a filtragem pelo método de janelamento de Hamming de 256 amostras, discretizando os valores de frequência.

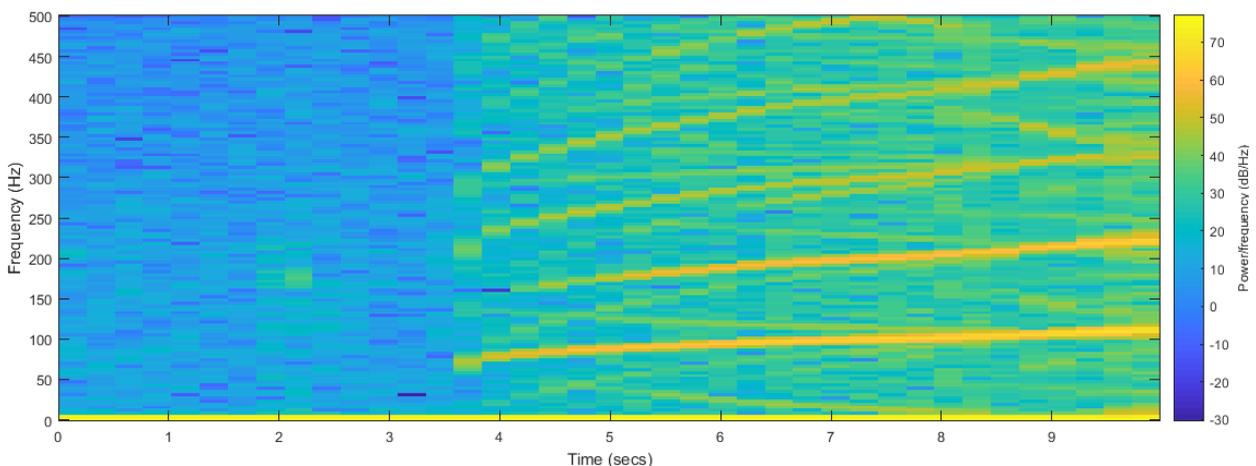


Figura 4.9: Espectrograma da vibração do motor com rampa de entrada

Visualizando ambos, percebe-se que a frequência aumenta linearmente, juntamente com o aumento do sinal de entrada, como era esperado, já que a vibração do motor é causada pela força centrípeta causada pela massa acoplada que rotaciona em seu eixo.

Para o Motor A, a primeira harmônica presente aproxima-se de uma reta à partir de 3,6 segundos, momento em que é vencida a zona morta do atuador, variando linearmente de 70Hz a 110Hz. Entretanto, observa-se que apesar de ter uma primeira harmônica característica, referente a rotação do motor, há a presença de outras harmônicas no sistema em análise, sendo observadas com clareza 3 outras retas, proporcionais a esta. Este fenômeno também é identificável no gráfico do espectrograma da resposta ao degrau, mostrado na Figura 4.10, no qual é bastante nítida componente fundamental de 110Hz, mas com a presença marcante das harmônicas alta frequência.

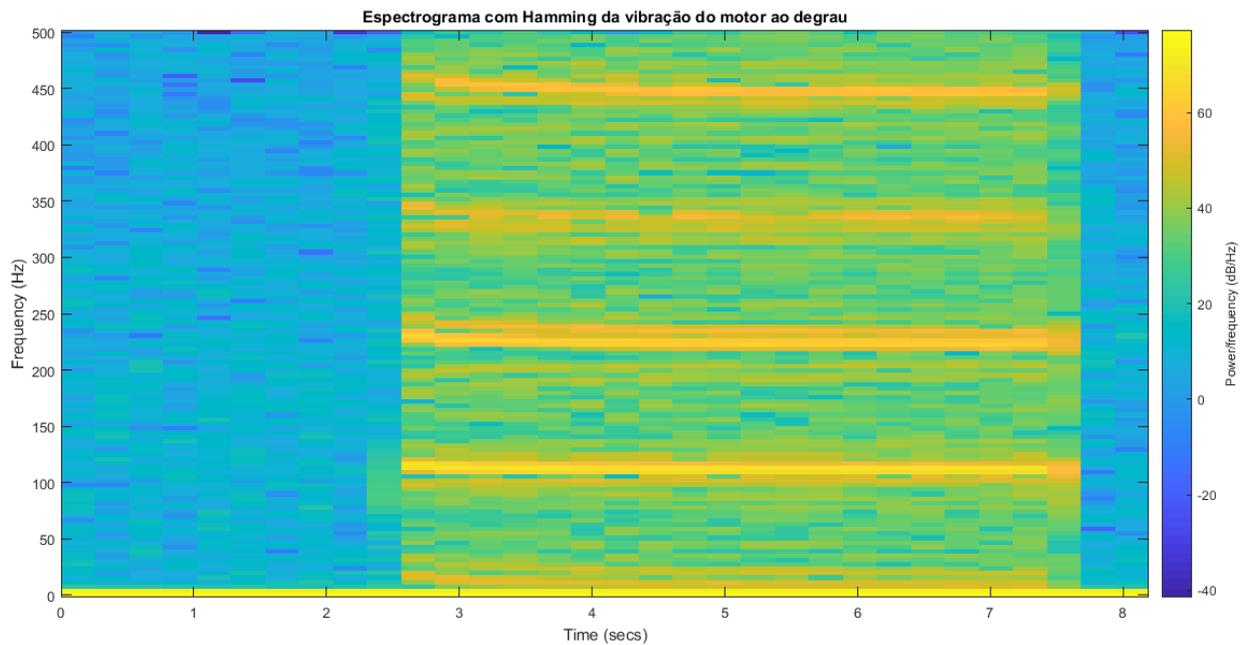


Figura 4.10: Espectrograma da vibração do motor com degrau de entrada

Analisando o gráfico obtido com a onda senoidal, percebe-se que há alguns resultados que agregam bastante na análise de frequência.

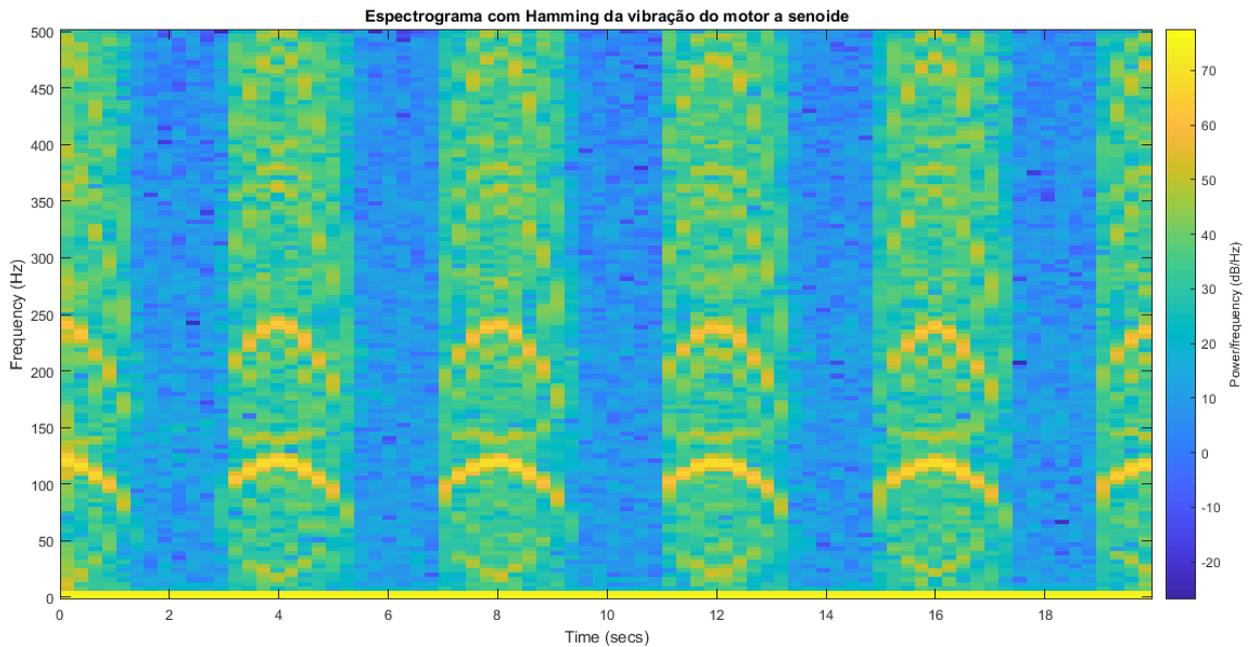


Figura 4.11: Espectrograma da vibração do motor com senoide de entrada

No espectrograma apresentado na Figura 4.11, é possível visualizar que o número de harmônicas mais intensas é menor, quando comparado aos outros tipos de onda, além de ser notável a variação presente na resposta a onda senoidal.

Com a análise realizada por meio dos espectrogramas, mostra-se o comportamento seguido pela frequência do motor, ao qual varia de maneira proporcional com a entrada aplicada ao sistema. Observa-se também que, devido a interferências do sistema de medição e características internas, tanto do atuador como do circuito controlador, há a presença de harmônicas de frequência mais alta presentes nos dados apresentados. Outro fator que pode ocasionar no aparecimento de componentes de alta frequência nos espectrogramas é o fato de que os dados analisados do acelerômetro não são pré-processados antes da análise feita.

4.3 Resultados de Simulações

As simulações dos circuitos foram realizadas utilizando-se o software LTSpice®. Para as primeiras montagens utilizou-se o transistor BJT do modelo 2N2222, sendo este o que estava sendo utilizado no trabalho anterior. Este é um transistor de baixa potência do tipo NPN, com tensão coletor-emissor máxima de 30 V, corrente contínua máxima de 800mA e dissipação de potência de 500 mW em 25°C [23]. De acordo com a documentação do componente, a tensão de saturação coletor-emissor, nas condições de corrente de coletor 150mA e corrente de base 15mA, é em 0,4V, enquanto que a saturação base-emissor ocorre entre 0,6 e 1,3V, sob as mesmas condições de teste.

Para a realização da simulação com o PWM, realizou-se o teste com diferentes abordagens. A primeira foi por meio da geração de um arquivo pelo Matlab, contendo valores de tempo e

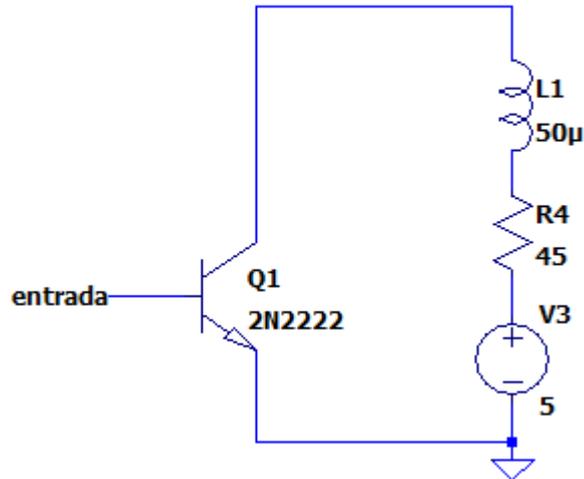


Figura 4.13: Representação do Circuito I no LTSpice

tensão de cada amostra separados por tabulação, sendo depois este arquivo importado pela fonte no LTSpice através de um PWL (*Piece-Wise linear*). Entre os tempos de amostras t_k e t_{k+1} , a tensão é variada de maneira linear. Apesar do resultado ser o desejado, devido ao grande número de dados necessários para se alcançar a precisão do microcontrolador, os arquivos PWL obtidos foram muito grandes, gerando demora tanto em sua criação como em seu processamento pelo simulador. Neste caso, a alternativa foi a utilização da mesma lógica utilizada no script Matlab para a confecção da fonte, conforme apresentado na Figura 4.12.

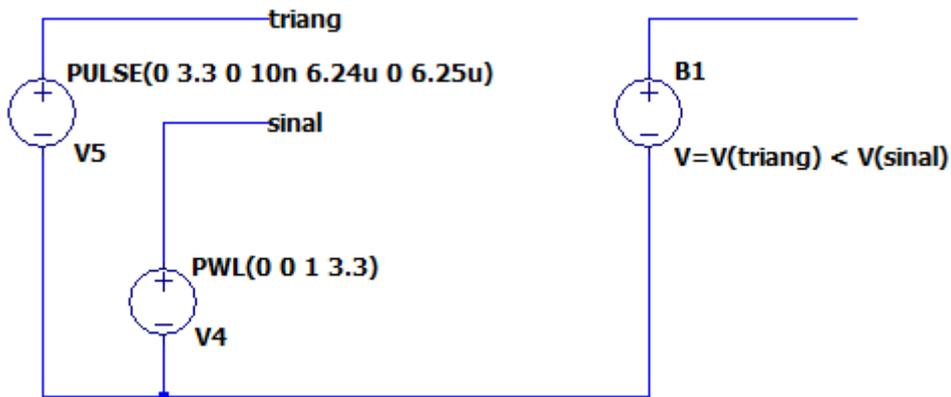


Figura 4.12: Circuito simulador de fonte PWM

Utilizou-se um gerador de onda dente de serra decrescente, uma fonte contendo as informações do sinal analógico a ser convertido e um comparador de tensão de 3,3V. Neste caso, a frequência do PWM é de 160kHz, assim como o valor utilizado na captura de resultados práticos com precisão de 8 bits, e a fonte de sinal uma rampa crescente, que vai de 0 a 3,3V em 100ms.

A primeira simulação foi feita com o circuito mostrado na Figura 4.13, sendo o bloco do motor contendo um indutor de $50\mu H$, um resistor de 45Ω , e o transistor 2N2222. As medições

realizadas foram com base na corrente de entrada da carga. Apesar de não mostrar o resultado que se obtém das medições utilizando o acelerômetro, realizar a captura da corrente forneceu a informação necessária para saber a aceleração do motor, com base nas características deste. Na resposta apresentada na Figura 4.14, percebe-se que o modelo atualmente utilizado não consegue lidar bem com a alta frequência do sinal de entrada, o que se torna algo não desejado para o sistema em estudo, pois esta variação atrapalha na realização do controle do motor. Neste caso, realizou-se a filtragem passa-baixas RC de 1ª ordem do sinal do PWM utilizando um capacitor de $5,6\mu F$, tendo como saída uma função próxima do analógico. Na resposta mostrada na Figura 4.15, obtida aplicando-se a entrada PWM filtrada ao circuito na Figura 4.13, nota-se que a variação de corrente coletor-emissor diminui consideravelmente, o que melhora muito o controle e durabilidade do motor. Entretanto, observando o comportamento da corrente na carga, o transistor utilizado acaba funcionando em grande parte como uma chave, devido a zona de saturação do BJT bastante curta, limitando bastante a área de trabalho com o motor.

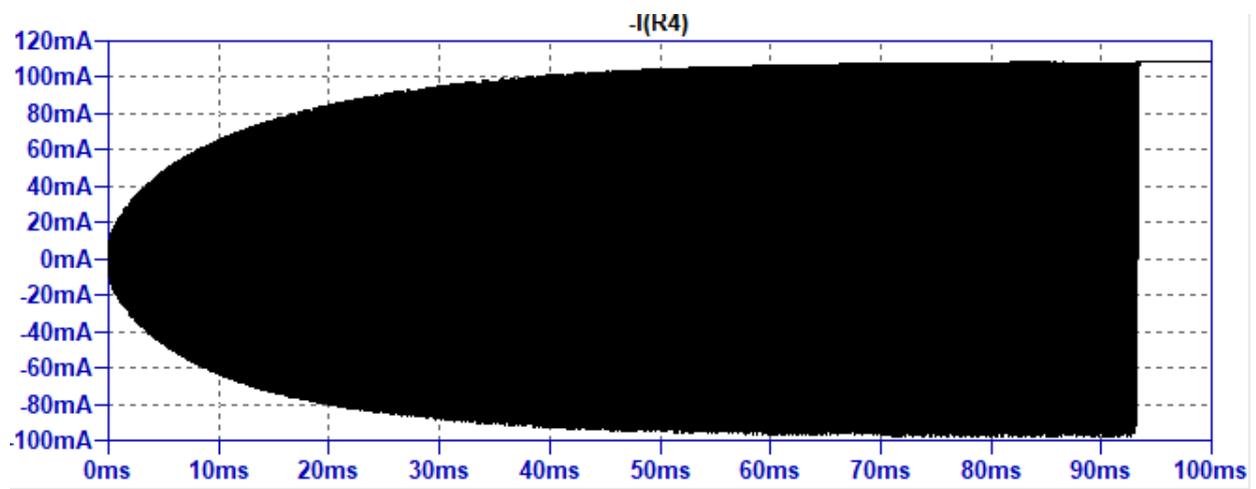


Figura 4.14: Corrente na carga com a aplicação de uma rampa PWM no circuito da Figura 3.4

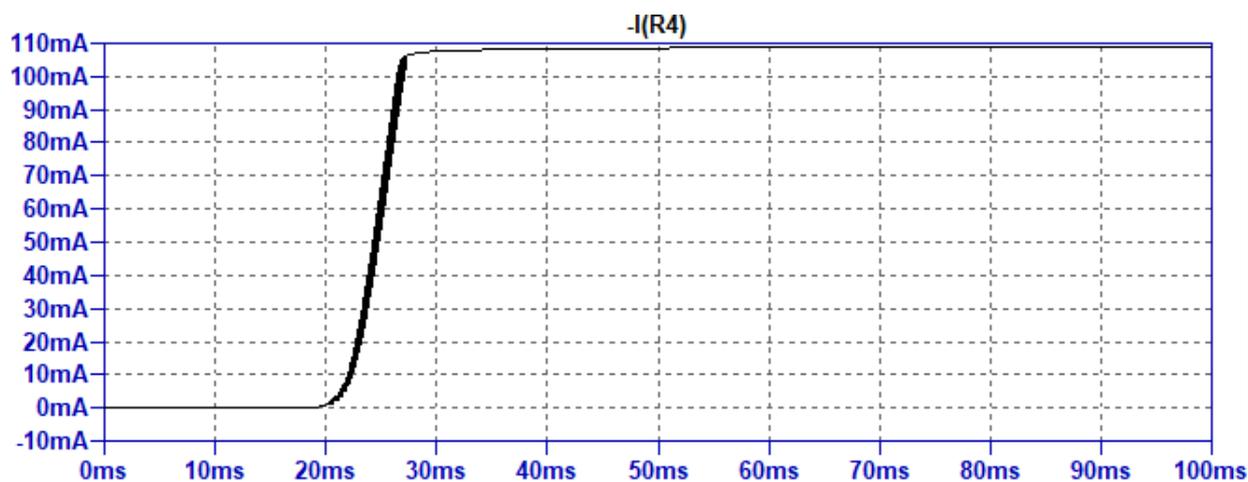


Figura 4.15: Corrente na carga com a aplicação de uma rampa PWM filtrada no circuito 3.4

Como uma primeira tentativa de visualizar o comportamento adquirido, realizou-se o teste com outros tipos de transistores, utilizando as tecnologias NMOS e Darlington. O transistor NMOS utilizado foi do modelo AO6408, da fabricante Alpha e Omega, com V_{ds} máximo de 20V e tensão porta-fonte máxima de 12V, corrente de dreno de 8,8A, resistência de ativação dreno-fonte menor que $25m\Omega$ para tensão V_{gs} de 2,5V [33]. O modelo Darlington utilizado foi o TIP122 [34], com corrente contínua máxima de coletor de 5A, dissipação de potência de 65W a $25^{\circ}C$ e 100V de tensão coletor-emissor.

Como pode ser visto na Figura 4.16, percebe-se que o ganho de informação obtido com o CMOS não foi considerável, precisando de uma mudança na construção e configuração do circuito para que ele funcione de maneira mais adequada. O mesmo ocorre no caso de se utilizar o transistor do tipo *Darlington*, no qual para se obter uma resposta mais próxima do esperado, precisa de alterações no circuito, de maneira a atuar como um amplificador mais linear.

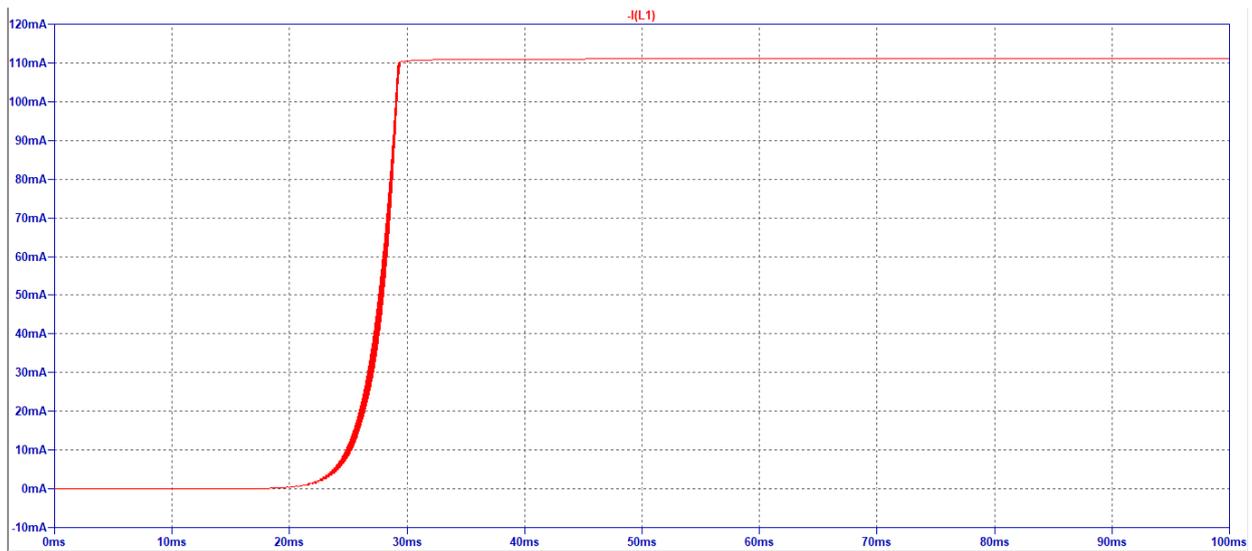


Figura 4.16: Corrente na carga com a aplicação de uma rampa PWM utilizando NMOS

Visando a obtenção de um controle maior sobre a corrente coletor-emissor, foram necessárias mudanças para aumentar a região linear de operação do transistor BJT. Assim, realizou-se a polarização do transistor, utilizando a clássica configuração de amplificador emissor-comum, colocando um divisor de tensão na base e uma resistência conectada ao emissor, aumentando um pouco a impedância de saída do sistema e fazendo o controle para que o sistema atue de maneira mais próxima da zona de operação desejada. É apresentado na Figura 4.17 o diagrama esquemático do controle do motor (modelado como circuito RL) com o filtro PB RC na entrada.

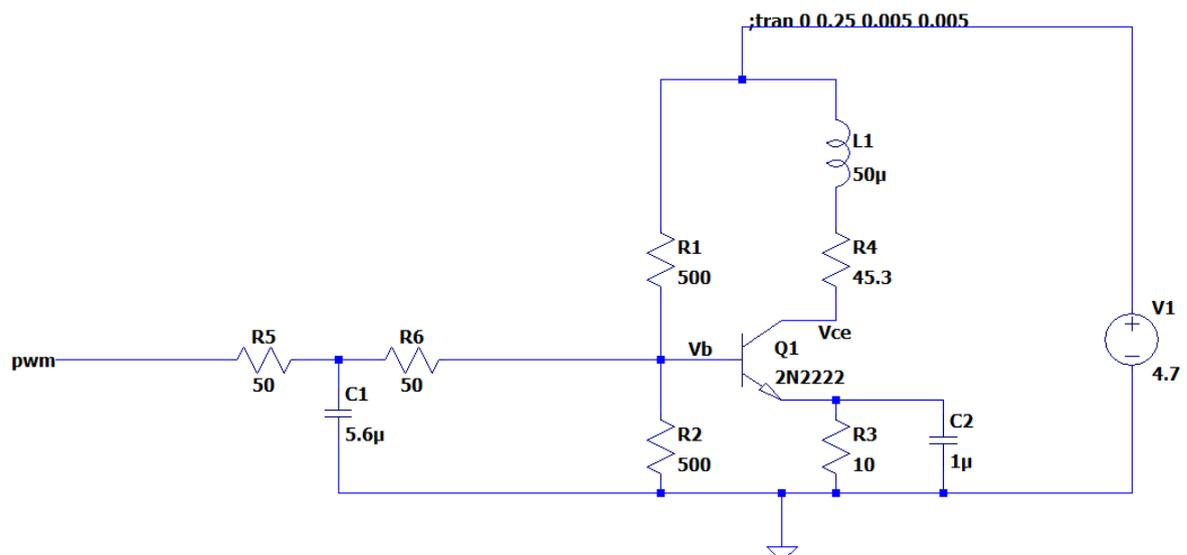


Figura 4.17: Circuito amplificador utilizado

Realizando a simulação, apresentada na Figura 4.18, onde a curva preta representa a corrente que passa pela carga R4, e a curva azul representa a tensão de base Vb, com os parâmetros utilizados anteriormente, percebe-se que o comportamento desejado foi alcançado com sucesso, levando um tempo maior para o sistema saturar.

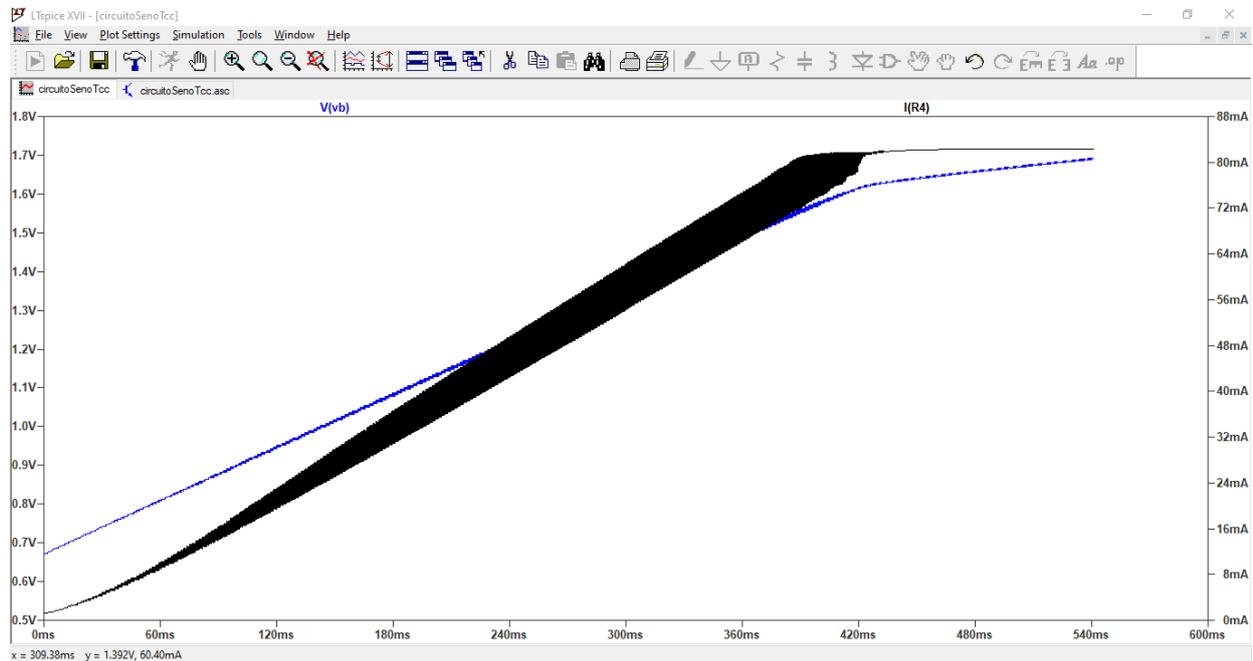


Figura 4.18: Simulação do circuito da Figura 4.17

Observando o comportamento desta simulação, percebe-se que o comportamento da curva, por mais que a zona de trabalho tenha sido maior, a corrente que passa pela carga ainda sofre bastantes variações, o que pode provocar ruídos de alta frequência na vibração do motor, algo que deseja-se ser filtrado ao máximo. Dessa forma, mudando a posição do capacitor C2 do emissor para o coletor, como mostrada na Figura 4.19, as variações de alta frequência passam a ser filtradas, obtendo assim um sinal mais linear, como mostrado na Figura 4.20.

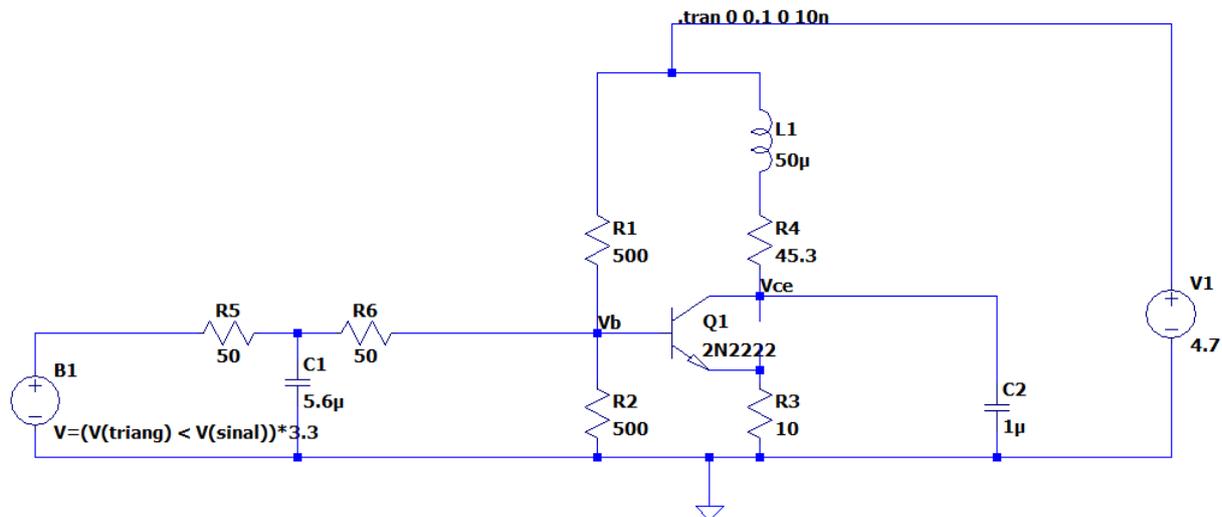


Figura 4.19: Circuito com mudança da posição do capacitor C2

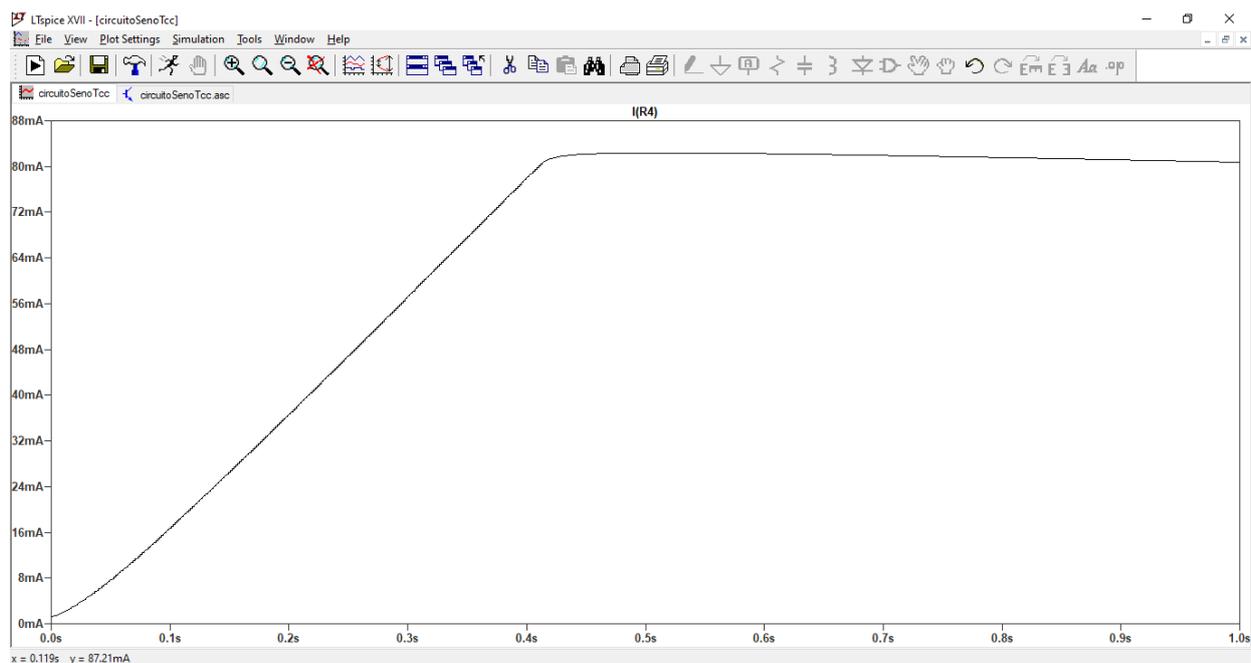


Figura 4.20: Simulação do circuito da Figura 4.19

Realizando as mudanças de maneira proporcional aos outros tipos de transistor, percebeu-se que o resultado obtido com ambos não teve uma melhora quando comparado com a utilização do 2N2222. Os resultados obtidos acabam por não justificarem, pelo menos em simulação, a mudança do tipo de transistor utilizado. Percebe-se que no resultado utilizando TIP122, utilizando um

modelo de subcircuito¹, já que o LTSpice não conta com este dispositivo em sua biblioteca, a tensão de corte só é superada à partir de 1V, fazendo com que o motor não gire com a aplicação de sinais pequenos. Dessa forma, como a tensão de saturação é aproximadamente a mesma dos outros transistores, isso fez que a sua zona de operação seja pequena para o projeto. Já com relação a utilização do AO6408, a resposta obtida é muito próxima do que se observa com o transistor do tipo BJT, verificando que a saturação obtida com este é de 1,62V na tensão da base, enquanto que com aquele é de 1,75V.

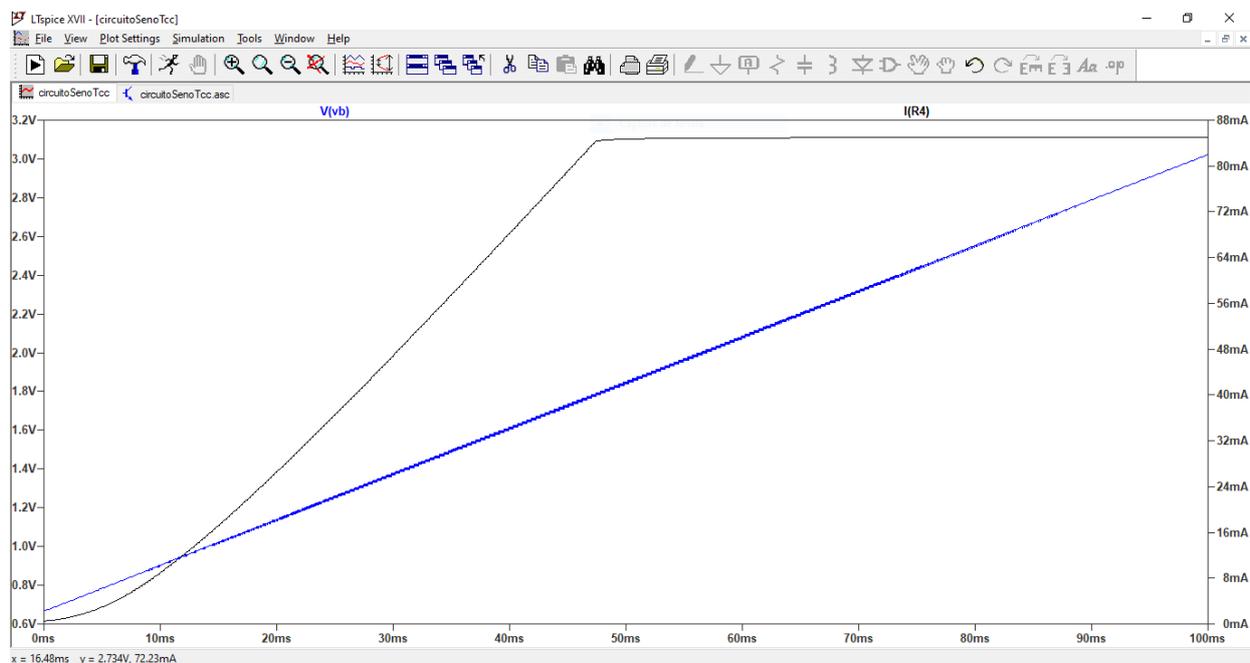


Figura 4.21: Simulação da aplicação de uma rampa na topologia 4.19 utilizando o transistor AO6408

¹<http://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP122.LIB>

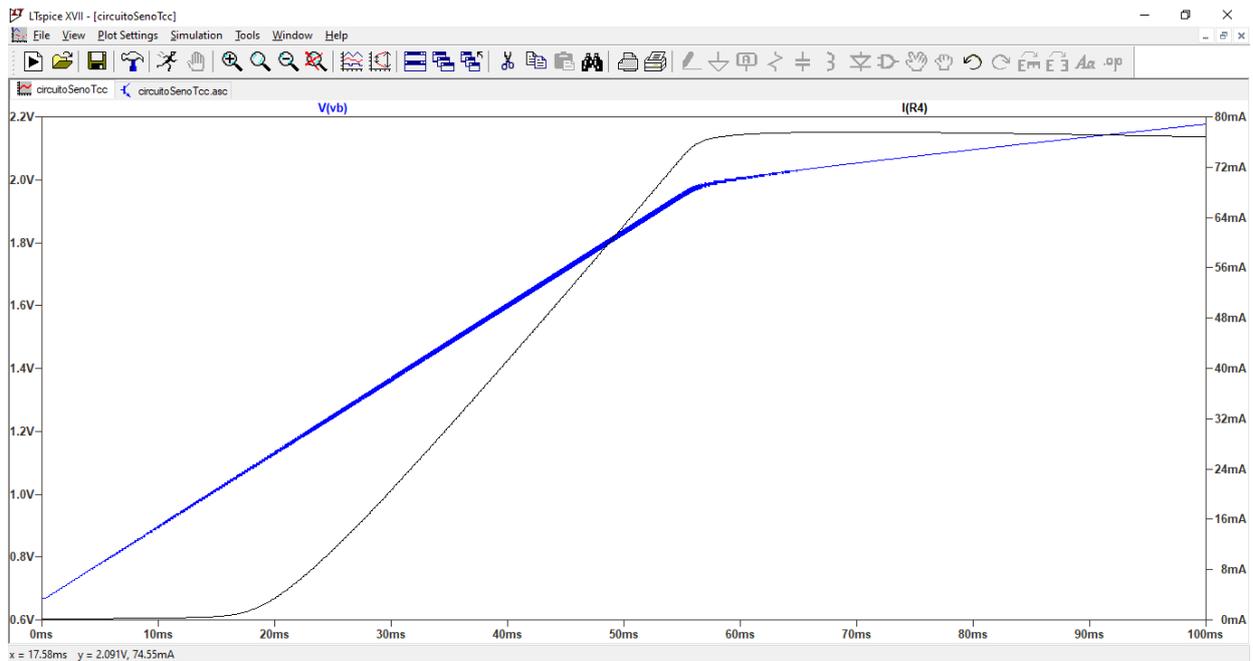


Figura 4.22: Simulação da aplicação de uma rampa na topologia 4.19 utilizando o transistor TIP122

Uma das observações feitas foi que diminuindo a impedância do coletor, colocando uma carga em paralelo a carga existente, a zona de operação aumentará também, possuindo uma faixa operacional ainda maior para se trabalhar com os sinais vindos do software, como visto na Figura 4.23, mostrando que a tensão de base de saturação passa a ser 2,2V, comparado aos 1,62V obtidos anteriormente, sendo um aumento de 35,8%. Além disso, a corrente do coletor de saturação é menor, o que pode fazer com que os motores estejam mais seguros, não precisando operar em correntes muito altas, evitando seu aquecimento.

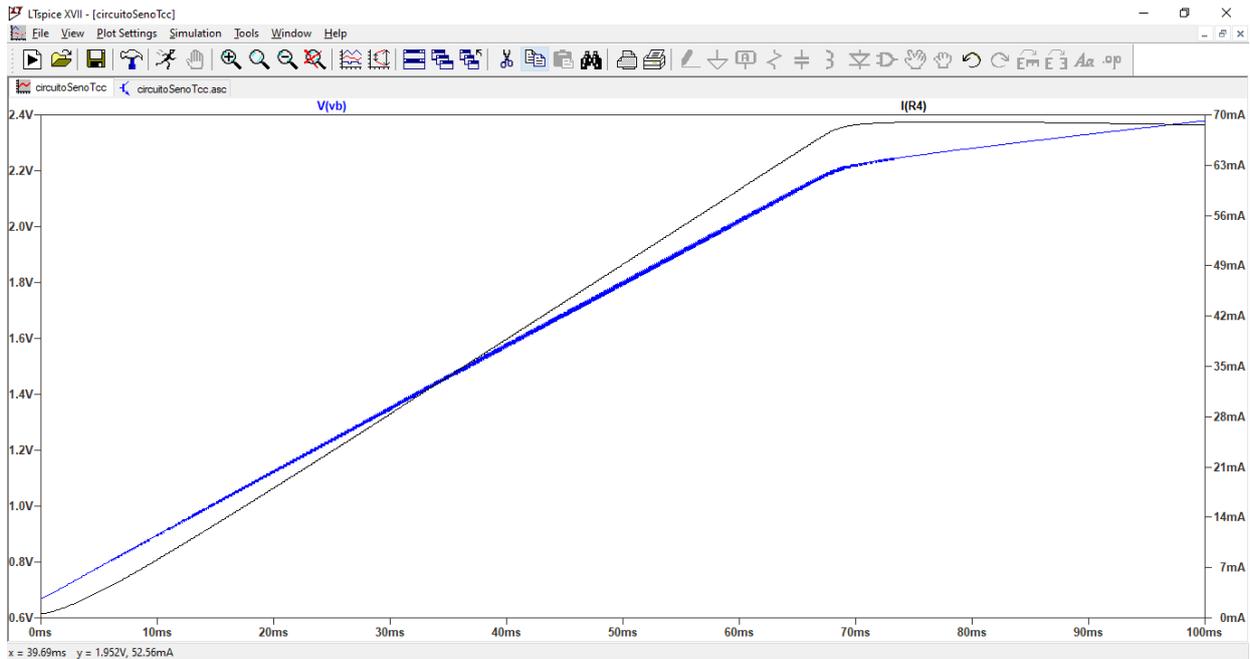


Figura 4.23: Resposta de uma rampa do circuito 4.19 com dois motores em paralelo

4.3.1 Diagramas de Bode

A Figura 4.24 apresenta o Diagrama de Bode referente a variável de saída, neste caso a corrente que passa pela carga.

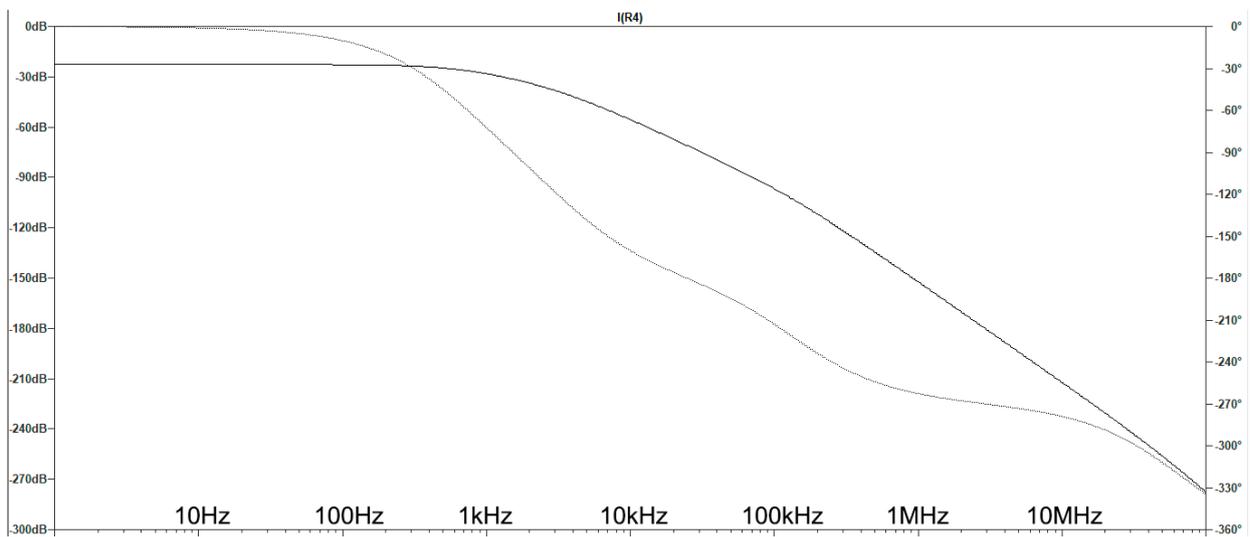


Figura 4.24: Diagrama de Bode do circuito da Figura 4.17

O comportamento da magnitude do sistema a baixa frequências possui um *offset* de -22,7dB, indicando o ganho obtido através do transistor, e à partir de 668Hz, a curva tem uma queda de 3dB,

sendo esta a frequência de corte, de onde passa a decrescer em taxa constante de 20dB/década. Esta taxa de decaimento se mantém até o valor de 6,68kHz, sendo à partir deste ponto, a queda passa a ser de 40dB/década. Esse comportamento indica que o circuito proposto apresenta uma resposta de segundo grau, possuindo a função de transferência

$$G_1(s) = \frac{9,823 \times 10^9}{(s + 4190,9)(s + 41,90 \times 10^3)}. \quad (4.3)$$

Porém, como a faixa de operação de frequência de entrada será muito menor do que as indicadas pelos pontos de corte do sistema, a resposta do circuito será correspondente ao ganho do circuito, mantendo também a fase do sinal de entrada.

Já para o comportamento do circuito I, o Diagrama de Bode é mostrado na Figura 4.25.

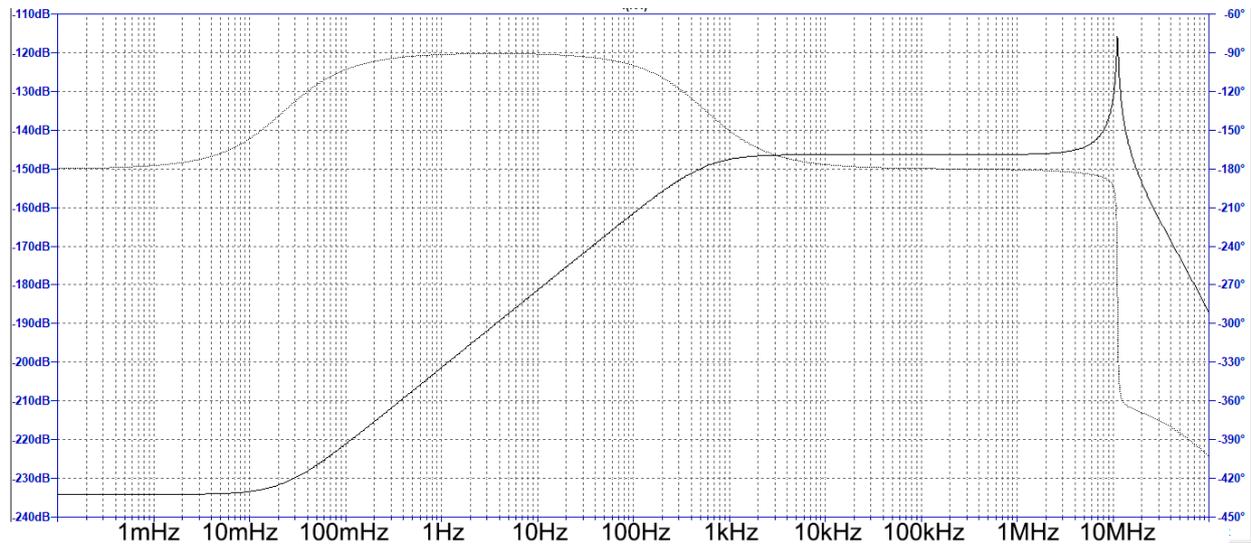


Figura 4.25: Curva de Bode da resposta do circuito 3.4

O comportamento observado foi de um zero dominante na frequência de 25mHz, apresentando uma subida de 20dB/década até a frequência de 575kHz, onde há um polo simples, permanecendo sem variações de ganho até a frequência de 10MHz, onde existe um par de pólos complexos conjugados com alto fator de qualidade. Ignorando a variação presente em frequências muito altas, o circuito apresenta o comportamento caracterizado pela função de transferência

$$G_2(s) = \frac{2 \times 10^{-12}(s + 0,157)}{(s + 3,613 \times 10^3)}. \quad (4.4)$$

Isso mostra que o comportamento do circuito *on-off* é bem diferente do obtido com o circuito amplificador. O circuito III atua como um passa-baixas, tendo uma região de corte ao qual começa em 676Hz, enquanto que o circuito I, representado pela Figura 4.25, apresenta um comportamento de passa banda, com uma região passante de 1kHz a 10MHz.

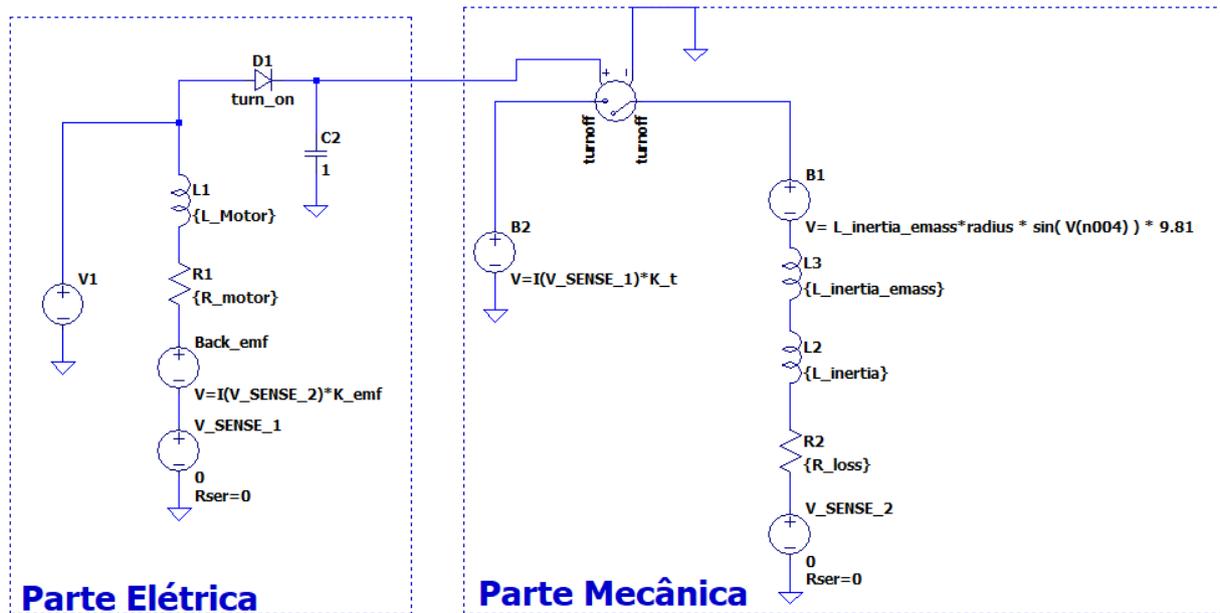


Figura 4.26: Modelo Spice do Motor de Vibração

4.3.2 Simulações com modelo de motor DC

Como uma forma de se realizar os cálculos de maneira mais próxima do circuito real, foi feito planejamento de um circuito para simular o comportamento obtido com o motor de vibração. Para isso, seguindo os cálculos mostrados no Capítulo 2 e o modelo fornecido pela Precision Microdrives [15], construiu-se os modelos do motor mostrados na Figura 4.26

Para a simulação do comportamento elétrico do motor, estão presentes a tensão contra-eletromotriz, a resistência de armadura e a indutância de enrolamento. O bloco de tensão V_SENSE_1 é utilizado apenas como forma de medir a corrente de entrada do sistema, mas o modelo funciona sem sua existência. Já com relação ao funcionamento mecânico do motor, com o circuito alimentado pelo torque, uma indutância de inércia do rotor e outra de inércia da massa acoplada, uma resistência de perda e um receptor de tensão referente ao efeito da gravidade sobre a massa. Além desses efeitos, para representação de zona morta, foi adicionado um diodo e um switch, fazendo que o motor fosse ativado à partir de 0,6V

Tendo o modelo realizado, utilizando-se a Fórmula 2.16 encontrada no Capítulo 2 para vibração, fez-se a simulação da resposta do motor ao degrau, apresentada na Figura 4.27.

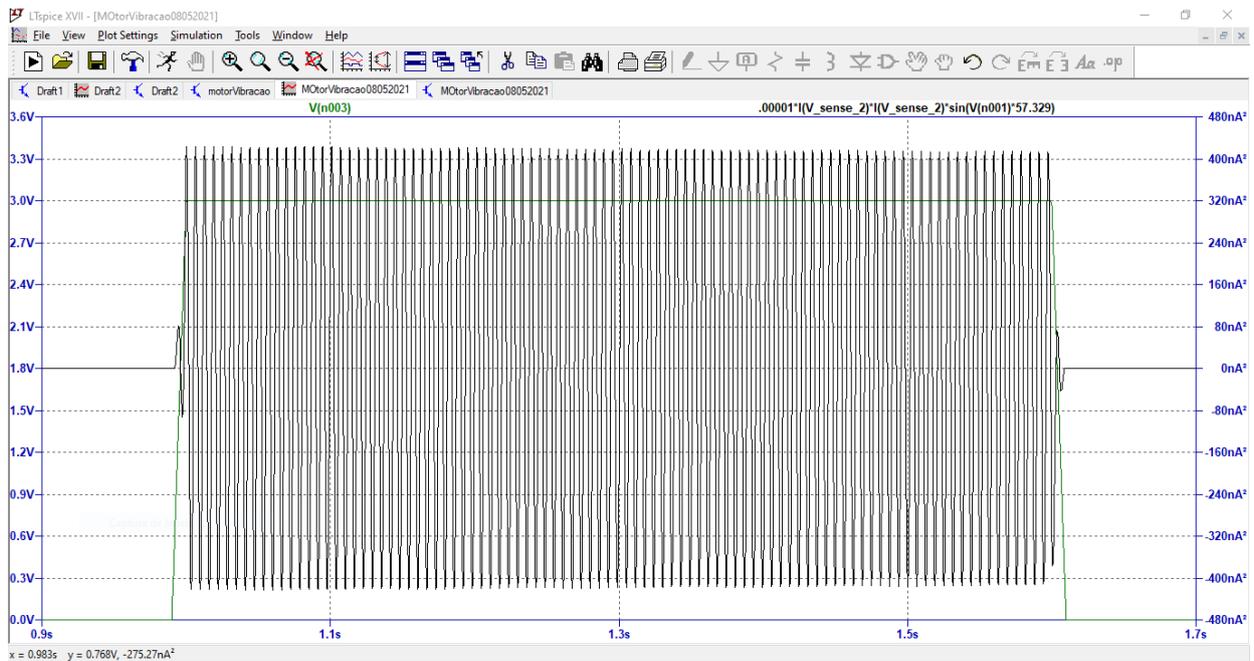


Figura 4.27: Resposta do modelo do motor de vibração a um sinal degrau

O modelo simulado apresenta um comportamento de aceleração oscilatório com frequência de 160Hz, tendo a sua amplitude medida na proporção de gravidades (número de g), assim como obtido pelo acelerômetro. Visto a sua ação na aplicação de um degrau de 3,3V, substitui-se do sistema com transistor a carga pelo modelo de motor apresentado. Aplicando uma onda rampa obtém-se a resposta apresentada na Figura 4.28.

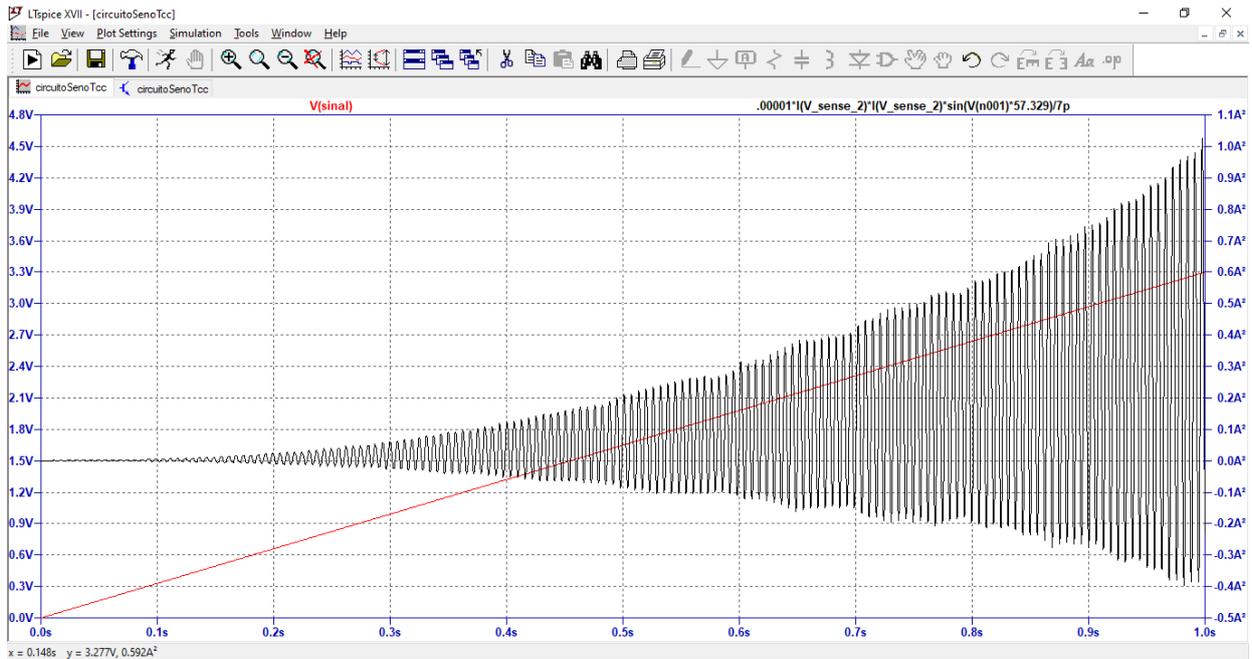


Figura 4.28: Resposta do motor em vibração a um sinal rampa

A característica do gráfico obtida da simulação do modelo do motor é bastante similar ao comportamento observado por meio da medição realizada pelo MPU6050, como mostrada na Figura 4.2, tendo um crescimento característico da corrente a medida com que a entrada aumenta. Desta maneira, sabendo as características internas do motor e sabendo a possível forma de saída da vibração, pode então encaminhar para as capturas experimentais, usando como base o que está exposto.

Para os resultados obtidos a frente, serão considerados os circuitos presentes nas Figuras 3.4 e 4.17 com uma carga e duas cargas em paralelo. Dessa forma, se pretendeu comparar as respostas obtidas por ambos circuitos, definindo assim qual topologia seria mais recomendada a ser utilizada, ou se utilizar mais de uma topologia poderia trazer uma variedade maior de sensações táteis para o usuário final.

4.4 Vibração com nova configuração de circuito

As Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 correspondem as respostas obtidas com a aplicação da rampa como entrada para os circuitos análogos. Optou-se por não colocar aqui outros tipos de ondas, pois o sinal crescente possui as características necessárias para se fazer a análise nesta seção. As mudanças realizadas foram replicadas para se capturar os resultados obtidos com os dois motores.

4.4.1 Resultados obtidos com motor B

Depois das simulações, realizou-se as coletas de vibração com os motores considerando a nova configuração de sistema. Como feito nos experimento com o circuito I, foi feita a captura aplicando na entrada ondas retangulares, senoidais e triangulares. As primeiras medidas obtidas foram capturadas considerando o circuito da Figura 4.17. Desta maneira é possível comparar o efeito provocado com a inserção de um capacitor no coletor do transistor, como apresentado no circuito da Figura 4.19.

A Figura 4.29 apresenta a resposta do acelerômetro do circuito da Figura 4.17.

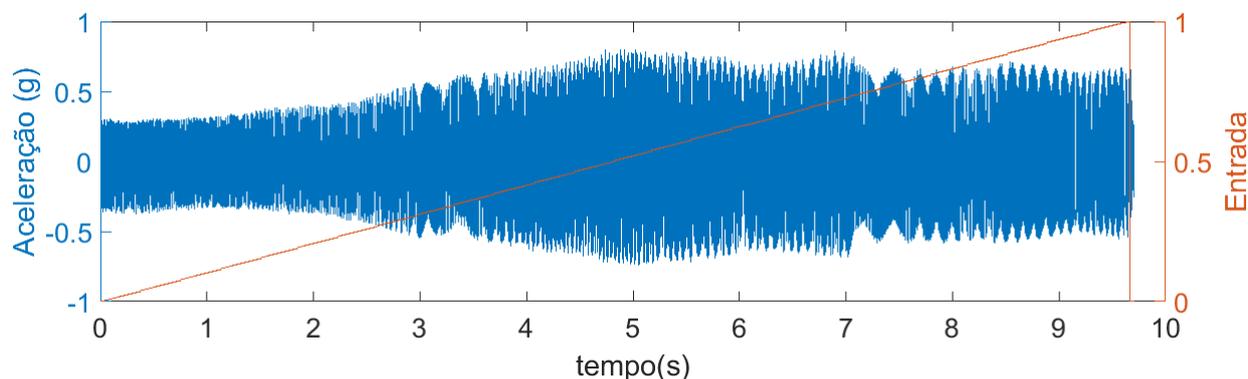


Figura 4.29: Vibração do motor medida pelo acelerômetro no circuito 4.17

Na Figura 4.29 percebe-se mesmo que a tensão do PWM seja de 0V, o motor já apresenta uma vibração. Isso se deu devido a polarização realizada com o divisor de tensão na base, com duas resistências de 500Ω , fazendo com que a corrente I_c seja suficiente para fazer o motor girar. Dessa forma, apesar de eliminada a zona morta, o fato do sistema ter um estado inicial onde o motor já apresenta uma vibração, torna-se algo que necessite de uma modificação no sistema. Analisando outros aspectos da vibração apresentada, percebeu que a amplitude da vibração possui comportamento similar ao observado pela corrente, tendo uma subida considerável até 5 segundos, onde a tensão de entrada chega a 1,65V, permanecendo futuramente em saturação. Neste ponto de saturação, o motor vibra com sua intensidade máxima, e depois sofre uma pequena queda, algo que pode ser explicado pela inércia e atraso de resposta do motor.

Na Figura 4.30, realizou o mesmo experimento, mas aumentando para 1 segundo o período mantido em cada nível do PWM, e o fenômeno que se observa é que o ponto de saturação é bem mais nítido e não apresenta o sobressalto visível na Figura 4.27

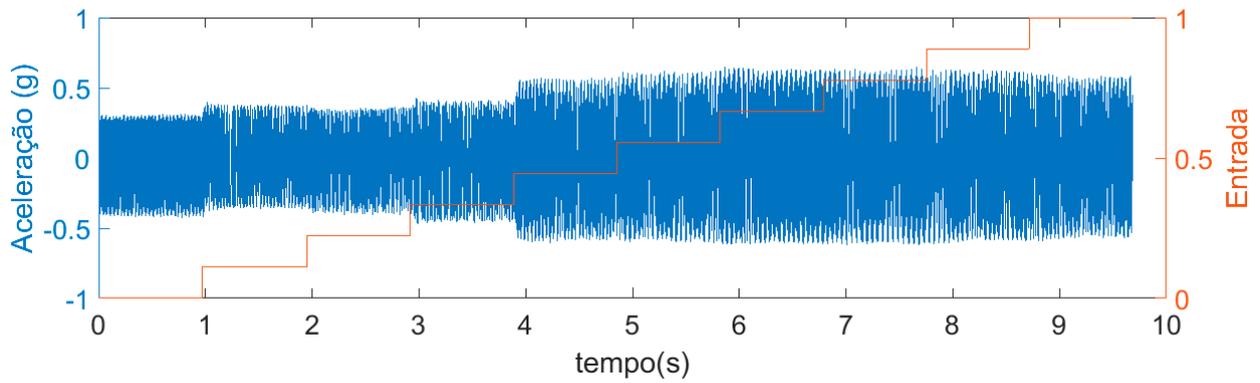


Figura 4.30: Vibração do motor medida pelo acelerômetro no circuito II

Realizando a polarização do sinal com um divisor de tensão de 700Ω conectado ao V_{cc} por 500Ω conectado ao terra, o resultado é mostrado na Figura 4.31.

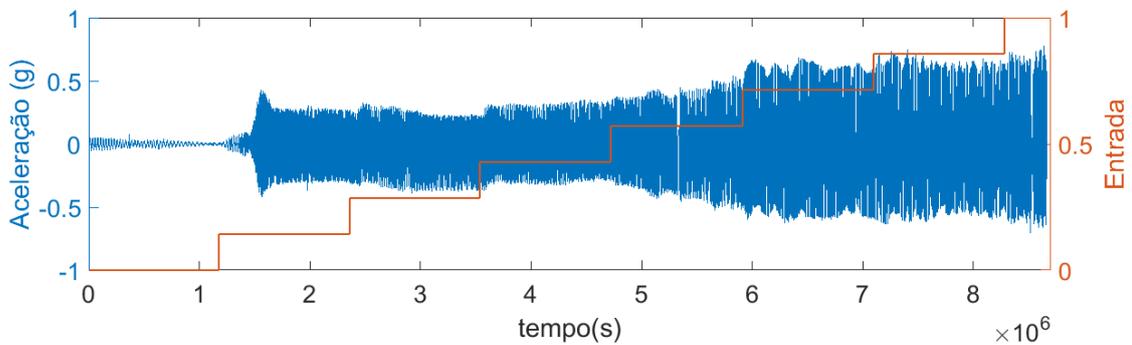


Figura 4.31: Vibração do motor medida pelo acelerômetro mudando a polarização

Observa-se que com a alteração realizada, com o sinal em $0V$, o motor não apresenta vibração, passando a vibrar somente quando a tensão de coletor vence a zona morta do motor. Além da saturação da vibração sentida ocorrer com valores maiores de entrada, assim como a rampa de crescimento da intensidade da vibração. Na expectativa de se obter uma impedância do coletor menor adicionando uma carga em paralelo do motor, realiza-se o teste, registrando a resposta obtida na 4.32. Entretanto, com o resultado obtido, o comportamento da frequência apresentou uma região maior de zona morta e uma pequena região ativa, não trazendo benefícios a sua utilização no projeto.

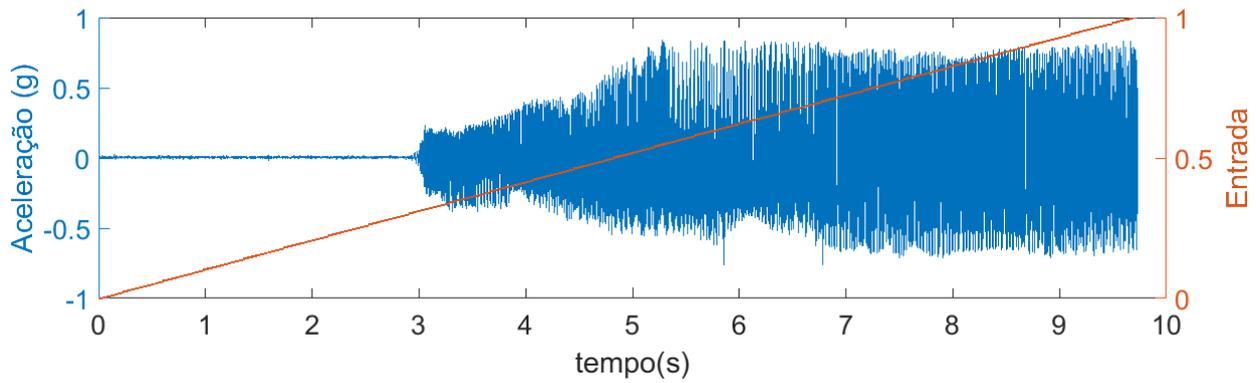


Figura 4.32: Vibração do motor com carga em paralelo

4.4.2 Resultados obtidos com motor A

O resultado de vibração obtida com o motor do modelo A pode ser percebido na Figura 4.33. Percebe-se de primeira vista o comportamento crescente logo no começo do experimento, o que se deve em parte a grande sensibilidade do motor ao vencer a tensão de ativação do mesmo. Observa de maneira clara o comportamento em rampa na primeira metade do ensaio, onde depois a vibração começa a decair lentamente. Comparando com a resposta obtida por meio da 4.2, é possível ver que a zona morta presente anteriormente foi superada, entretanto, a grande região de saturação presente acaba por apresentar um contraponto, ao qual torna a topologia não muito eficiente para a aplicação, já que a faixa de zona ativa do transistor não é maior. Outro ponto relevante que a ser considerado é de que a amplitude máxima de frequência registrada é menor do que o motor possui capacidade de vibrar, como mostrada na Figura 4.2.

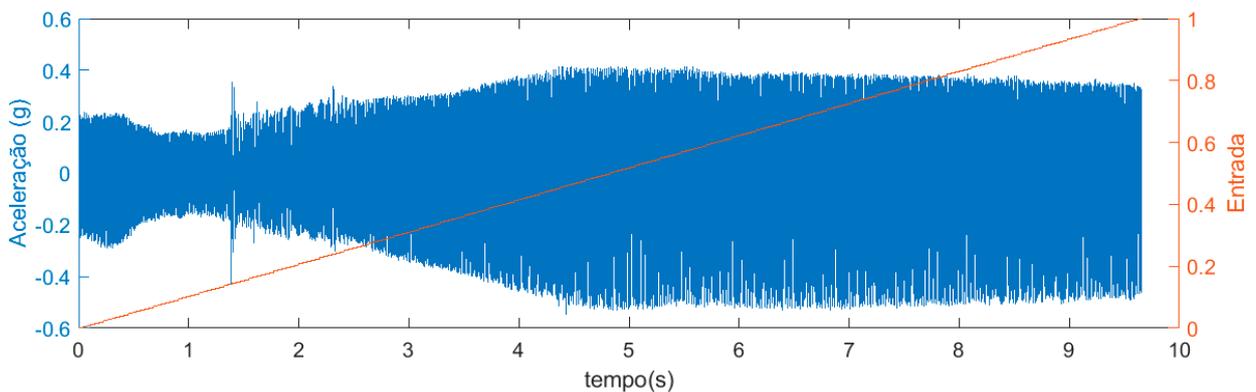


Figura 4.33: Vibração do motor modelo A no circuito II

Considerando os experimentos realizados com o acelerômetro e comparando os resultados obtidos dos circuitos I, II e III, a diferença de comportamento é bastante notória para ambos os tipos de motores. Utilizando-se o transistor como amplificador, como nos circuitos II e III, percebeu-se

que a grande zona morta encontrada no circuito I é superada com a utilização do amplificador, possibilitando uma região maior de trabalho. Outro fator no qual as medições se difere se diz em respeito da vibração máxima atingida por eles, onde observa-se nas respostas dos motores no circuito I, Figura 4.2 e Figura 4.6, que a amplitude máxima de vibração é maior, quando comparada com as abordagens obtidas nos circuitos II e III, Figuras 4.33 e 4.29, o que condiz com o fato de que a corrente I_c é maior. Com os diferentes comportamentos apontados, as duas montagens acabam podem ser utilizadas em conjunto para a representação de diferentes sensações e diferentes tipos de mensagens, ou para o caso musical, de timbres.

Realizada a coleta de dados e análise das respostas obtidas com o acelerômetro, passa-se para os resultados obtidos com os voluntários, descobrindo assim quais são as percepções dos usuários com relação ao dispositivo.

4.5 Testes com Voluntários

A realização dos testes com os voluntários foi feito em ambiente doméstico, para o cumprimento das medidas restritivas de isolamento, devido a pandemia de Covid-19. oito pessoas participaram da pesquisa, sendo estas pessoas de um convívio social próximo. O grupo é bastante heterogêneo com relação a idade e sexo, como apresentado na Tabela 4.2. Apesar de o projeto ter como público alvo pessoas com deficiência auditiva, nenhum dos participantes da pesquisa pertencem este grupo específico. No entanto, a voluntária idosa possui perda na acuidade auditiva.

Tabela 4.2: Características dos voluntários da pesquisa

| Voluntário | Idade | Sexo |
|------------|-------|-----------|
| 1 | 22 | Feminino |
| 2 | 23 | Masculino |
| 3 | 78 | Feminino |
| 4 | 52 | Feminino |
| 5 | 22 | Masculino |
| 6 | 23 | Feminino |
| 7 | 57 | Masculino |
| 8 | 57 | Feminino |

A descrição do experimentos realizados com cada um dos voluntários está descrito de maneira individual, relatando sensações objetivas e subjetivas a respeito do período de testes e traçando uma função de pertinência para a variável de amplitude de frequência. Ao final, analisou-se os dados coletados, registrando os limites do processo, identificando a sensibilidade de um usuário meio, baseado nas amostras do projeto.

4.5.1 Voluntário 1

Os dados referentes a sensibilidade percebida pela primeira voluntária para amplitude está descrito na Tabela 4.3. Realizando a medida com diferentes faixas de entrada, percebeu-se que o número de vibrações percebidas foi o mesmo, indicando que o tempo de aplicação de rampa de 0 a 100% foi suficiente para que ela conseguisse diferenciar os diferentes níveis de amplitude. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **5% do PWM**. Na aplicação de diferentes níveis de frequência, a voluntária conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada seno até **55,55Hz**. Com relação ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em **15ms**.

Tabela 4.3: Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 1

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (nº) |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 0 - 100 | 4 |
| 0 - 25 | 1 |
| 25 - 50 | 2 |
| 50 - 100 | 3 |

Com relação ao motor de modelo A, foi percebido um maior número de amplitudes de vibração em comparação com o atuador anterior, sendo reconhecidas 5. Também, segundo a voluntária, o motor tem uma característica menos grosseira e mais suave, vibrando com menos intensidade e tendo um crescimento de maneira menos brusca. Comparando a zona morta dos dois motores, percebeu-se que o modelo B deles começa a vibrar primeiro, indicando que a sua zona morta fosse menor. Na medição com os dois motores em paralelo, a sensação percebida foi que o motor B vibrou de maneira mais suave em sua resposta a rampa, enquanto que o antigo não pareceu ter uma vibração diferente. Realizando a medida com o circuito I, a sensação sentida foi de menos níveis de sensibilidade e uma demora maior para começar a vibrar, mas com um arranque mais brusco e uma vibração com uma intensidade maior. Para o motor B, os níveis de vibração percebidos foram 4, possuindo um crescimento mais suave, apresentando mais dificuldade para diferenciá-los, enquanto que no motor antigo foram 3. Comparando então a sensação expressa pelos dedos, percebeu-se que a vibração é sentida de maneira mais nítida e com maior intensidade, mas sem nenhum incômodo.

4.5.2 Voluntário 2

A Tabela 4.4 apresenta os dados de níveis de intensidades percebidas pelo segundo voluntário. Realizando a medida com diferentes faixas de entrada, percebeu-se que o número de vibrações percebidas foi o foi diferente, indicando que uma possível perda de informação ao se aplicar o sinal em faixas menores de entrada. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade percebida pelo voluntário, percebeu-se que o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **5% do PWM**. Já no teste de frequência, o voluntário conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada seno até o valor de **50Hz**, não conseguindo sentir frequências maiores. Com relação

ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em 15ms.

Tabela 4.4: Níveis de intensidades percebidos pelo voluntário 2

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (nº) |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 0 - 100 | 5 |
| 0 - 25 | 2 |
| 25 - 50 | 2 |
| 50 - 100 | 2 |

Utilizando-se o motor de modelo A, a sensação descrita foi de que ele variava menos quando aplicado o sinal de 0V, variava de maneira mais suave e menos discretizada, comparado com o modelo B, e observou-se 4 intensidades diferentes. Mudando a montagem, colocando dois atuadores em paralelo, percebeu-se que a vibração sentida com os motores possui uma variação de intensidade mais sutil, sendo mais difícil de se perceber a ocorrência de mudança de níveis, e ao final da rampa, ambos variavam com intensidade menor do que a montagem anterior. Realizando então o teste com o circuito I, percebeu-se que ambos os modelos demoram mais para responder, representando uma zona morta maior, e quando começa a vibrar, possui uma subida brusca, com um grande arranque, acabando por vibrar com mais intensidade ao final da rampa. Fazendo a coleta de sensações com o dedo, o voluntário notou que a intensidade sentida é bem maior, conseguindo caracterizar melhor a vibração, mas expôs que no pulso era mais confortável para um período de tempo maior.

4.5.3 Voluntário 3

Os dados referentes a sensibilidade percebida pela terceira voluntária para amplitude está descrito na Tabela 4.3. Realizando a medida com diferentes faixas de entrada, percebeu-se que o número de vibrações percebidas foi o mesmo, mas quando foi aplicado na voluntária degraus com diferentes entradas, ela conseguiu diferenciar 4 intensidades, mostrando que o tempo de aplicação da rampa foi muito curto para que diferenciar as amplitudes de vibração sentidas. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade percebida pela voluntária, percebeu-se que o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **5% do PWM**. Aplicando-se diferentes níveis de frequência, a voluntária conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada até **25Hz**. Com relação ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em 15ms.

Tabela 4.5: Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 3

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (nº) |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 0 - 100 | 2 |
| 0 - 25 | 2 |
| 25 - 50 | 1 |
| 50 - 100 | 1 |

Utilizando o motor de modelo A, sentiu o impulso mais fraco, tendo uma intensidade menor. Mudando a montagem, colocando dois atuadores em paralelo, a sensação percebida não foi diferente. Realizando então o teste com o circuito I, o motor B começava a responder com uma demora maior e vibrando de maneira mais forte. A sensação percebida com o motor de modelo A não mudou. Fazendo a coleta de sensações com o dedo, a voluntária conseguiu sentir a vibração de maneira mais intensa e de maneira mais detalhada, sem expor nenhum incômodo.

4.5.4 Voluntário 4

Os dados referentes a sensibilidade percebida pela quarta voluntária para amplitude está descrito na Tabela 4.6. Com a medida realizada por meio da captura realizada, percebe-se que o número de mudanças na intensidade da vibração percebidas dentro da faixa de 0 a 100% foi o mesmo de quando realizado o experimento com as faixas menores de entrada. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade percebida pela voluntária, percebeu-se que o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **10% do PWM**. Aplicando-se diferentes níveis de frequência, a voluntária conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada seno até **100Hz**. Com relação ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em 12ms.

Tabela 4.6: Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 4

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (n ^o) |
|-----------------------------|--|
| 0 - 100 | 3 |
| 0 - 25 | 2 |
| 25 - 50 | 2 |
| 50 - 100 | 2 |

Com relação ao motor de modelo A, a sensação percebida foi que ele vibrava com uma intensidade maior, começando a vibrar antes do motor anterior e possuiu uma subida mais acentuada, sendo registradas também 3 diferentes amplitudes de vibração. Realizando-se a medição com os dois motores em paralelo, a sensação percebida foi que o motor de modelo A vibrou de maneira mais suave em sua resposta a rampa, enquanto que o motor B pareceu ter uma vibração um pouco mais forte. Realizando então a medida com o circuito I, a sensação sentida foi de que o motor antigo demora mais para começar a vibrar e vibra com mais intensidade, enquanto que o modelo B não foi percebido de maneira muito diferente. Os níveis aparentes de níveis de amplitudes não foram diferentes para nenhum dos motores nessa topologia. Comparando então a sensação expressa pelos dedos, percebeu-se que a vibração é sentida de maneira bem melhor, sendo mais confortável para a voluntária, conseguindo perceber de maneira mais nítida as diferentes respostas dos motores e das montagens de circuito I e III.

4.5.5 Voluntário 5

A Tabela 4.7 apresenta os dados de níveis de intensidades percebidas pelo quinto voluntário. Realizando a medida com diferentes faixas de entrada, percebeu-se que o número de vibrações percebidas foram diferentes, onde enquanto no sinal de 0 a 100% foram sentidas 3 intensidades diferentes, enquanto esse valor é bem maior mostrando as diferentes faixas de maneira separadas, mostrando que o tempo de aplicação da primeira rampa foi curto para se sentir a variação de amplitude de forma mais nítida. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade percebida pelo voluntário, percebeu-se que o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **2% do PWM**. Já no teste de frequência, o voluntário conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada seno até o valor de **50Hz**, não conseguindo sentir frequências maiores. Com relação ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em 12ms.

Tabela 4.7: Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 5

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (nº) |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 0 - 100 | 3 |
| 0 - 25 | 3 |
| 25 - 50 | 1 |
| 50 - 100 | 4 |

Utilizando o motor de modelo A, a sensação descrita foi de que ele variava de maneira igual quando aplicado o sinal de 0V e a sensação vibratória era a mesma, notando apenas uma mudança no efeito sonoro provocado pelo mesmo. Mudando a montagem, colocando dois atuadores em paralelo, a vibração percebida pelos dois motores é mais suave e apresenta uma intensidade menor. Realizando o teste com o circuito I, a duração do impulso percebido foi maior, apesar do atraso maior e apresenta uma intensidade maior para os dois motores. Fazendo a coleta de sensações com o dedo, o voluntário notou que a intensidade sentida é bem maior, sendo bem intenso com o motor B, começando a sentir a vibração de maneira mais rápida os momentos de mudança de amplitude. Outro fenômeno notado foi de que a vibração sentida nos dedos era propagada até a base do punho.

4.5.6 Voluntário 6

Os dados referentes a sensibilidade percebida pela sexta voluntária para amplitude está descrito na Tabela 4.3. Realizando a medida com diferentes faixas de entrada, percebeu-se que o número de vibrações percebidas foi o mesmo, indicando que o tempo de aplicação de rampa de 0 a 100% foi suficiente para que ela conseguisse diferenciar os diferentes níveis de amplitude. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade percebida pela voluntária, percebeu-se que o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **5% do PWM**. Aplicando-se diferentes níveis de frequência, a voluntária conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada seno até **55.56Hz**. Com relação ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em 15ms.

Tabela 4.8: Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 6

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (n ^o) |
|-----------------------------|--|
| 0 - 100 | 4 |
| 0 - 25 | 1 |
| 25 - 50 | 2 |
| 50 - 100 | 3 |

Com relação ao motor de modelo A, foi percebida um maior número de amplitudes de vibração em comparação com o atuador anterior, sendo reconhecidas 5. Também, segundo a voluntária, o motor tem uma característica menos grosseira e mais suave, vibrando com menos intensidade e tendo um crescimento de maneira menos brusca. Comparando a zona morta dos dois motores, percebeu-se que o modelo B começa a vibrar primeiro, indicando que a sua zona morta fosse menor. Realizando a medição com os dois motores em paralelo, a sensação percebida foi que o motor B vibrou de maneira mais suave em sua resposta a rampa, enquanto que o antigo não pareceu ter uma vibração diferente. Realizando então a medida com o circuito I, a sensação foi de menos níveis de sensibilidade e uma demora maior para começar a vibrar, mas com um arranque mais brusco e uma vibração com uma intensidade maior. Para o motor B, os níveis de vibração percebidos foram 4, possuindo um crescimento mais suave, apresentando mais dificuldade para diferenciá-los, enquanto que no motor antigo foram 3. Comparando então a sensação expressa pelos dedos, percebeu que a vibração é sentida de maneira mais nítida e com maior intensidade, mas sem nenhum incômodo.

4.5.7 Voluntário 7

A Tabela 4.4 apresenta os dados de níveis de intensidades percebidas pelo sétimo voluntário. Observa-se que o número de intensidades percebidas foram o mesmo considerando os sinais em faixas maiores e menores, indicando que o tempo de aplicação da rampa foi suficiente para identificação das diferentes amplitudes. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade percebida pelo voluntário, percebeu-se que o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **5% do PWM**. Já no teste de frequência, o voluntário conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada seno até o valor de **25Hz**, não conseguindo sentir frequências maiores. Com relação ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em 22ms.

Tabela 4.9: Níveis de intensidades percebidos pelo voluntário 7

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (n ^o) |
|-----------------------------|--|
| 0 - 100 | 5 |
| 0 - 25 | 3 |
| 25 - 50 | 2 |
| 50 - 100 | 4 |

Utilizando o motor de modelo A, a sensação descrita foi de que ele demorava mais para começar

a vibrar quando aplicada a rampa, vibra com uma intensidade menor do que o mais B, e quando aplicado o impulso, a sensação descrita pelo voluntário era de que vibrava tudo em volta. Mudando a montagem, colocando dois atuadores em paralelo, a sensação percebida era de que ambos os modelos vibraram com uma intensidade menor. Realizando então o teste com o circuito I, a intensidade sentida foi bem mais forte com os dois atuadores e apresentou uma demora bem maior para começar a vibrar. Fazendo a coleta de sensações com o dedo, o voluntário sentiu a vibração nos dedos mais intensa e mais detalhada, sentindo melhor esta vibração comparada a aplicada ao braço.

4.5.8 Voluntário 8

Os dados referentes a sensibilidade percebida pela oitava voluntária para amplitude está descrito na Tabela 4.10. Na medida realizada com diferentes faixas de entrada, percebe-se que a amplitude de vibração sentida pela pessoa foi a mesma, tendo como base o valor de 3 níveis. No teste com relação ao limite mínimo de intensidade percebida pela voluntária, percebeu-se que o valor mínimo percebido foi aplicando-se uma entrada de **20% do PWM**. Aplicando-se diferentes níveis de frequência, a voluntária conseguiu perceber uma variação de frequência da entrada seno até **20Hz**. Com relação ao tamanho do impulso aplicado em relação ao tempo, o menor impulso sentido foi em 15ms.

Tabela 4.10: Níveis de intensidades percebidos pela voluntária 8

| Faixa de entrada (% do PWM) | Níveis de intensidade percebidas (n ^o) |
|-----------------------------|--|
| 0 - 100 | 3 |
| 0 - 25 | 1 |
| 25 - 50 | 1 |
| 50 - 100 | 3 |

Fazendo a coleta de dados com o motor A, a sensação descrita foi de que o motor vibra com uma intensidade maior, demora mais para começar a sentir algum impulso quando aplicada a rampa, possui uma crescente mais ingreme e apresenta um ruído maior quando comparado ao motor B. Mudando-se a montagem, colocando dois atuadores em paralelo, a sensação foi que os motores vibraram de maneira mais suave, com intensidade menor e uma demora maior na resposta da rampa. Realizando então o teste com o circuito I, a demora de resposta a rampa foi maior, começando a vibrar de maneira menos intensa, tendo uma crescente bem acentuada e passando a vibrar de maneira mais forte do que a montagem anteriormente feita. Fazendo a coleta de sensações com o dedo, o voluntário sentiu a vibração nos dedos mais intensa e mais detalhada, como se fosse o dobro da sensação, mas sentiu mais confortável com aplicação da vibração no pulso.

4.5.9 Análise dos dados dos voluntários

Por meio dos dados e informações fornecidas por cada um dos voluntários, tornou-se possível a realização de uma análise mais detalhada, estabelecendo parâmetros sobre a aplicação da metodologia de medida e sobre a sensibilidade vibrotátil. Notou-se o efeito de variáveis ao qual afetam o seu resultado, mas que não necessariamente são os objetos de estudo. Como, as pessoas quando aplicadas a um sinal por um período mais curto conseguem sentir, de modo geral, um número menor de níveis de amplitude, levando a consideração da influência do período de duração sobre a sensação tátil. Observou-se também que o método utilizado para a coleta dos dados táteis precisavam de ajustes para se adequar melhor ao estudo em questão. Por muitos momentos, quando pedido para as pessoas que comparassem o impulso sentido entre as duas últimas coletas, houveram esquecimentos e dúvidas, pois a memória da intensidade ou frequência aplicada já não era tão clara para que fosse possível fazer a distinção. Neste caso, vê-se que a captura de dados utilizando métodos comparativos, aplicando por exemplo os dois sinais a serem diferenciados com um motor em cada pulso da pessoa, utilizando uma metodologia com perguntas com duas opções definidas de respostas, é possível que a curva de entendimento seja mais eficiente, onde o voluntário consegue distinguir de maneira mais rápida a sua função ali, e reduzindo a curva de aprendizagem da pesquisa ao máximo.

Tabela 4.11: Médias e estatísticas dos dados obtidos dos voluntários

| Variável | Média | Mediana | Desvio padrão |
|-----------------------------------|-------|---------|---------------|
| Níveis de intensidade (0 - 100%) | 3,75 | 3,5 | 1,165 |
| Níveis de intensidade (0 - 25%) | 2,25 | 2,0 | 1,035 |
| Níveis de intensidade (25 - 50%) | 1,88 | 2,0 | 0,991 |
| Níveis de intensidade (50 - 100%) | 2,50 | 2,50 | 1,195 |
| Frequência mínima da senoide (Hz) | 47,63 | 50 | 25,82 |
| Amplitude mínima (% PWM) | 2,78 | 1,95 | 2,200 |
| Período mínimo de degrau (ms) | 12,25 | 11,50 | 5,071 |

A análise feita por meio dos dados fornecidos pelos voluntários pode ser encontrado na tabela. Por meio dos dados pegos, realizou-se uma estatística geral, determinando quais foram os resultados gerais obtidos, especificando em seguida para as características de sexo e idade dos participantes das pesquisas. Na Tabela 4.11 pode-se ver os dados referentes às estatísticas obtidas trabalhando-se com os dados obtidos com os participantes da pesquisa. Com os dados obtidos, percebe-se que em média as pessoas conseguem distinguir, através do experimento mostrado, em um valor mais próximo de 4 intensidades diferentes, entretanto, como mostra inclusive o desvio padrão, realizando-se uma distribuição gaussiana, cerca de 67% das pessoas sentiriam dentro de uma faixa de 2,58 e 4,91 níveis de amplitudes de vibração diferentes. Por meio dos valores apresentados, é possível se estabelecer uma função de pertinência, como visto na Figura 4.34, de maneira a representar os valores obtidos por meio das amostras, apresentando valores de maneira não binária, conseguindo apresentar de maneira coerente possíveis valores intermediários. Como durante a coleta de dados com os voluntários não teve uma coleta do ponto de troca dos níveis,

realizou-se a estimação dos pontos por meio dos dados presentes na tabela, considerando 4 níveis de intensidades diferentes.

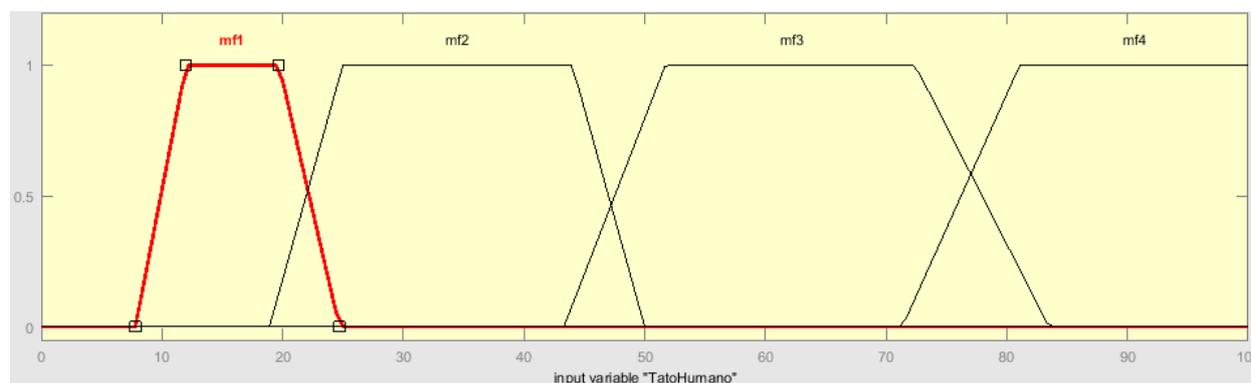


Figura 4.34: Modelo de Pertinência da Intensidade de Vibração Sentida pelas Pessoas

Com relação aos parâmetros limites, sendo estes frequência da senoide, amplitude e período do degrau mínimos, é possível observar-se as condições mínimas para o trabalho com o *hardware* com foco no usuário. Em vista a se obter um produto que consiga atender de maneira mais abrangente um público heterogêneo, os valores a serem considerados devem ser os de pior caso. Para o caso de se adotar o pior caso obtido pelas amostras obtidas, os parâmetros a serem considerados é a frequência mínima da senoide de 20Hz, amplitude mínima de 7,8% e período mínimo de 15ms. Fazendo-se uma distribuição por meio de uma função gaussiana, considerando uma probabilidade de 99,73%, valor referente a $\bar{X} + 3\sigma$, valores de piores casos a serem considerados seriam referentes amplitude mínima de 7,23%, período mínimo do degrau de 19ms e frequência máxima da senoide de 32,39Hz. Dos valores de pior caso descritos, as três variáveis conseguem fornecer valores que se encaixam melhor no experimento, pois o modelo gaussiano acaba não sendo muito preciso, devido ao baixo valor de amostras e a grande heterogeneidade presente entre as pessoas que participaram.

Com relação ao modelo de motor antigo e dos outros modelos de mensagem, percebe-se que suas características específicas podem ser identificadas pelas pessoas. Na maioria dos relatos coletados, o motor de modelo mais antigo foi sentido com uma vibração de intensidade menor, com uma zona morta maior e com um nível de subida mais suave. Já com relação a configuração de dois motores em paralelo, percebeu-se que a maioria dos voluntários sentiu uma queda na intensidade, mas com relação aos outros parâmetros não há um consenso. Isso pode ser uma consequência da forma como foi aplicado este teste, ao qual exigia do participante lembrar da sensação anterior, não tendo uma referência para poder servir de critério de comparação. Com relação ao circuito com circuito I, os voluntários perceberam um atraso maior para começar a subir, indicando uma zona morta maior, e uma vibração maior, já que a construção do circuito permite uma corrente I_c maior. Fazendo-se uma última análise mais subjetiva com a aplicação de impulsos de vibração no dedo, esperava-se que a sensação sentida fosse mais forte e mais nítida, mas o que se notou também foi o incomodo de alguns participantes em receber o estímulo. Sendo uma área com uma grande densidade de inervações neurais, a sensibilidade faz com que a aplicação de estímulos táteis

faz com que haja em muitos casos uma sensação de repulsa, podendo ser percebida como cócegas ou mesmo dor, tornando a experiência desagradável.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho apresentou a caracterização das respostas de vibração dos atuadores vibrotáteis, tanto a mensurada pelo acelerômetro, como a percebida pela pele do braço humana. Através das diferentes topologias de circuito e de entradas aplicadas através do PWM, foi possível estabelecer o comportamento adquirido tanto pela amplitude, quanto pela frequência da oscilação.

A mudança do microcontrolador não representou uma alteração no desempenho, sendo considerada para o momento uma mudança positiva, já que possibilita uma diminuição de custos no projeto, mantendo ainda assim uma interface agradável para sua programação, podendo utilizar o ESP-IDF, da EspressIF, tendo como linguagens de programação C, C++ ou até Python, através do micropython, ou utilizando-se a IDE do Arduíno.

O resultado obtido realizando-se a medida de transmissão de dados através do Bluetooth BLE se mostrou como uma limitação do experimento realizado, não podendo se concluir como uma limitação do meio em si. Percebeu-se mais tarde que havia uma limitação na comunicação pelo código utilizado no microcontrolador, não conseguindo ter uma taxa maior do que 100Hz. Pela parte do aplicativo *mobile* utilizado, não há como tirar conclusões se há alguma limitação em sua transmissão dos dados, pois como sendo ele uma ferramenta proprietária, o seu *debug* acaba por ser limitante.

A realização da captura dos sinais de vibração e a análise realizada foi fundamental para se caracterizar o sistema presente no trabalho feito anteriormente, descobrindo as qualidades e limitações do circuito presente, sendo possível enumerar as questões a serem melhoradas no circuito e elaborar assim um planejamento das modificações a serem aplicadas. Realizado o projeto inicial, colocá-lo em simulação para ver a resposta obtida com o software foi fundamental para descobrir os erros do mapeamento anterior, podendo assim realizar ajustes, além de fornecer uma visão mais interna sobre como o motor funciona. Percebe-se através deste que o circuito I possui um comportamento que não acaba por funcionar em grande parte como um sinal binário, não contribuindo com a modelagem de software realizada, sendo mais proveitosa a topologia utilizando o circuito II. Entretanto, considerando-se a possibilidade de expansão do dispositivo para várias partes do corpo, a utilização dos dois circuitos em conjunto pode se mostrar interessante, localizando o circuito I em regiões táteis menos sensíveis, permitindo emitir vibrações de maior intensidade, e utilizando

o circuito II em regiões mais sensíveis, possibilitando uma variedade maior de amplitudes a serem transmitidas.

Os testes com os voluntários, apesar de contar com um grupo de pessoas heterogêneo e com pequena quantidade de pessoas, trouxeram resultados ricos, que puderam trazer uma clareza maior sobre a resposta humana a vibrações. A partir das respostas obtidas, foi possível traçar um nível de vibração percebida nos pulsos, dando diretrizes de como mapear os sinais do software para a variável de entrada do sistema para a saída desejada. Os resultados também mostraram questões referentes a metodologia de realização da testagem de vibração na pele, sendo preferível uma análise comparativa, onde o voluntário pode comparar sinais de vibração simultaneamente. Com relação as novas topologias de circuito aplicadas, a característica percebida tanto pela sensação dos voluntários como pela medição do acelerômetro, mostra-se que o comportamento utilizando-se o transistor como amplificador é bastante distinto, onde este

O projeto apresentado conseguiu apresentar as características e limites presentes tanto no dispositivo vibrotátil como na percepção humana da vibração através do braço, possibilitando um mapeamento da música em vibração, em que as diferentes características sonoras, como timbre, altura e volume, possam ser sentidas por meio de diferentes sensações na pele.

5.1 Perspectivas Futuras

O projeto apresentado segue-se com a necessidade de realizar-se a integração do *software mobile* com o *firmware*, através do canal de comunicação escolhido, de forma a elaborar o mapeamento desejado entre o sinal processado da música e a sensação desejada para o tato do usuário. Dessa forma, através análise do sistema integrado, é possível medir as performances adquiridas, melhorias a serem aplicadas e expansão do dispositivo, podendo ser aplicável para outras regiões da pele humana. Os testes apresentados com os voluntários necessitam também de uma abrangência maior, englobando principalmente o público alvo, que são as pessoas com deficiência auditiva, e envolvendo outras partes do corpo, de forma a registrar o efeito sentido em diferentes locais de aplicação da vibração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MICRODRIVES, P. Ab-004 : Understanding erm vibration motor characteristics. 2015. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/content/ab-004-understanding-erm-vibration-motor-characteristics/>>.
- [2] KLAUTAU, T. *Dispositivo de Conversão de Sinais Sonoros para Sinais Táteis Voltados a Usuários Deficientes Auditivos*. 2019. Monografia (Bacharel em Ciência da Computação), UnB (Universidade de Brasília), Brasília, Brasil.
- [3] SILVA, N. M. d. et al. Educação musical de surdos: características, barreiras e práticas exitosas. *Educação e Pesquisa*, scielo, v. 46, 00 2020. ISSN 1517-9702. Acesso em 14/05/2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-97022020000100538&nrm=iso>.
- [4] HAGUIARA-CERVellini, N. *A musicalidade do surdo: representação e estigma*. [S.l.]: Plexus, 2003. 35 p.
- [5] VILLELA, L. M.; ITURREGUI-GALLARDO, G. Audio Description And Diversity Awareness: Flutua Music Video. *Trabalhos em Linguística Aplicada*, scielo, v. 59, p. 1513 – 1530, 08 2020. ISSN 0103-1813. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-18132020000201513&nrm=iso>.
- [6] WEBER, A. I. et al. Spatial and temporal codes mediate the tactile perception of natural textures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Academy of Sciences, v. 110, n. 42, p. 17107–17112, 2013. ISSN 0027-8424. Disponível em: <<https://www.pnas.org/content/110/42/17107>>.
- [7] YOUSEF, H.; BOUKALLEL, M.; ALTHOEFER, K. Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics—a review. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 167, p. 171 – 187, 06 2011.
- [8] PAPETTI, S.; SAITIS, C. Musical haptics: Introduction. In: *Musical Haptics*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 1–7. ISBN 978-3-319-58316-7.
- [9] FONTANA, F. et al. Perception of vibrotactile cues in musical performance. In: *Musical Haptics*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 49–72. ISBN 978-3-319-58316-7.

- [10] O'MODHRAIN, S.; GILLESPIE, R. B. Once more, with feeling: Revisiting the role of touch in performer-instrument interaction. In: *Musical Haptics*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 11–27. ISBN 978-3-319-58316-7.
- [11] HÁPTICO. In. DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7Graus, 2020. Acesso em 14/05/2021. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/haptico/>>.
- [12] TAN, H.; PENTLAND, A. Tactual displays for sensory substitution and wearable computers. In: *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 105–es.
- [13] PENHA, M. R. et al. Precisão, sensibilidade e confiança na percepção háptica de peso na presença ou ausência de movimento e visão. *Estudos de Psicologia (Natal)*, scielo, v. 19, p. 268 – 277, 12 2014. ISSN 1413-294X. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-294X2014000400004&nrm=iso>.
- [14] SINGIRESU, R. *Vibrações mecânicas*. 4^a. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [15] MICRODRIVES, P. Ab-025 : Using SPICE to model DC motors. 2015. Acesso em 01/05/2021. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/content/ab-025-using-spice-to-model-dc-motors/>>.
- [16] JONES, L. A.; SARTER, N. B. Tactile displays: Guidance for their design and application. *Human Factors*, v. 50, n. 1, p. 90–111, 2008. PMID: 18354974. Disponível em: <<https://doi.org/10.1518/001872008X250638>>.
- [17] GELDARD, F. A. Adventures in tactile literacy. *American Psychologist*, v. 12, p. 115–124, 1957.
- [18] LUH, P. B. Editorial. *IEEE Transactions on Haptics*, v. 3, n. 2, p. 77–77, 2010.
- [19] MERCHEL, S.; ALTINSOY, M. E. Auditory-tactile experience of music. In: *Musical Haptics*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 123–148. ISBN 978-3-319-58316-7.
- [20] KARAM, M.; RUSSO, F. A.; FELS, D. I. Designing the model human cochlea: An ambient crossmodal audio-tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, v. 2, n. 3, p. 160–169, 2009.
- [21] MIRZAEI, M.; KAN, P.; KAUFMANN, H. EarVR: Using ear haptics in virtual reality for deaf and hard-of-hearing people. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 26, n. 5, p. 2084–2093, 2020.
- [22] INSTRUMENTS, T. *8-Bit Parallel-Out Serial Shift Registers datasheet - sn74ls164.pdf*. 1988. Acesso em 20/05/2021. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ls164.pdf>>.
- [23] FARNELL. *2N2222 Low Power Bipolar Transistors*. 2006. Acesso em 30/04/2021. Disponível em: <<http://www.farnell.com/datasheets/296640.pdf>>.

- [24] ESPRESSIF. Espressif achieves the 100-million target for IoT chip shipments. 2018. Acesso em 17/05/2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/news/Espressif_Achieves_the_Hundredmillion_Target_for_IoT_Chip_Shipments>.
- [25] ESPRESSIF. *ESP32 WROOM 32SE Datasheet*. [S.l.], nov 2020. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32se_datasheet_en.pdf>.
- [26] INVENSENSE. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification*. 2013. Acesso em 17/05/2021. Disponível em: <<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>.
- [27] SRISKANTHAN, N.; LIM, T. S. I²C bus analyser. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, v. 47, n. 4, p. 867–872, 2001.
- [28] KOLBAN, N. *Kolban's Book on ESP32*. sep 2018. Disponível em: <<https://leanpub.com/kolban-ESP32>>.
- [29] MATHWORKS, I. T. *System Identification Toolbox*. Natick, Massachusetts, United State, 2019. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/ident/index.html>>.
- [30] RAZAVI, B. *Fundamentos de Microeletrônica*. LTC, 2017. ISBN 9788521617327. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=t69BYgEACAAJ>>.
- [31] ELECTRONICS, J. M. . *C0834B011F Datasheet*.
- [32] VERRILLO, R.; CHAMBERLAIN, S. The effect of neural density and contactor surround on vibrotactile sensation magnitude. *Perception & Psychophysics*, v. 11, p. 117–120, 01 1972.
- [33] ALPHA&OMEGA, S. *AO6408 N-Channel MOSFET*. sep 2010. Acesso em 30/04/2021. Disponível em: <https://alltransistors.com/adv/pdfview.php?doc=ao6408.pdf&dire=_aosemi>.
- [34] LLC, S. C. I. *TIP120, TIP121, TIP122(NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)*. nov 2014. Acesso em 18/05/2021. Disponível em: <<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP120-D.PDF>>.

ANEXOS

Listing 1: Subcircuito de Definição do Componente TIP122.

Fonte: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP122.LIB>

```
* fetched on 2017/4/7 from http://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP122.LIB
.SUBCKT tip122 1 2 3
*****
*      Model Generated by MODPEX      *
* Copyright(c) Symmetry Design Systems*
*      All Rights Reserved            *
*      UNPUBLISHED LICENSED SOFTWARE  *
*      Contains Proprietary Information *
*      Which is The Property of        *
*      SYMMETRY OR ITS LICENSORS       *
*      Modeling services provided by   *
*      Interface Technologies www.i-t.com *
*****
* Model generated on Dec 19, 2003
* Model format: PSpice
* Darlington macro model
* External node designations
* Node 1 -> Collect
* Node 2 -> Base
* Node 3 -> Emitter
Q1 1 2 4 qmodel
Q2 1 4 3 q1model 2.7545
D1 3 1 dmodel
R1 2 4 10000
R2 4 3 1000
* Default values used in dmodel
* EG=1.11 TT=0 BV=infinite
.MODEL dmodel d
+IS=1e-12 RS=10 N=1 XTI=3
+CJO=0 VJ=0.75 M=0.33 FC=0.5
.MODEL qmodel npn
+IS=1.15528e-13 BF=387.828 NF=0.937439 VAF=30
+IKF=0.270029 ISE=5.36359e-11 NE=1.54544 BR=0.1
+NR=1.5 VAR=134.979 IKR=0.109764 ISC=1.00329e-13
+NC=1.97549 RB=4.9473 IRB=0.200762 RBM=4.9473
+RE=0.0964614 RC=0.482307 XTB=0.580269 XTI=2.92642 EG=1.05
+CJE=2.08206e-10 VJE=0.945586 MJE=0.23 TF=1e-09
+XTF=1 VTF=10 ITF=0.01 CJC=1.67927e-10
+VJC=0.754327 MJC=0.289398 XCJC=0.9 FC=0.5
```

```
+TR=1e-07 PTF=0 KF=0 AF=1
.MODEL q1model npn
+IS=1.15528e-13 BF=387.828 NF=0.937439 VAF=30
+IKF=0.270029 ISE=5.36359e-11 NE=1.54544 BR=0.1
+NR=1.5 VAR=134.979 IKR=0.109764 ISC=1.00329e-13
+NC=1.97549 RB=4.9473 IRB=0.200762 RBM=4.9473
+RE=0.0964614 RC=0.482307 XTB=0.580269 XTI=2.92642 EG=1.05
+CJE=2.08206e-10 VJE=0.945586 MJE=0.23 TF=1e-09
+XTF=1 VTF=10 ITF=0.01 CJC=0
+VJC=0.754327 MJC=0.289398 XCJC=0.9 FC=0.5
+TR=1e-07 PTF=0 KF=0 AF=1
.ENDS
```