

# INTEGRAÇÃO DE ESTÍMULOS TÁTEIS NA PERCEPÇÃO DO SOM

Angelo Cesar Mendes da Silva<sup>1</sup>, Marcelo Costa Pinto e Santos<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Bacharelado em Sistemas de Informação – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG), Campus Juiz de Fora  
Caixa Postal 1283 – 36.080-001 – Juiz de Fora – MG – Brasil

angelo\_cms@yahoo.com.br, marcelo.santos@ifsudestemg.edu.br

**Abstract.** *This paper proposes to present methods of sound mapping in tactile stimuli. In order to evaluate the different methods, a portable device was constructed, consisting of a microphone coupled to a microcontroller that manipulates several vibrotactors. The microcontroller generates vibratory patterns perceptible to touch based on the captured sound. In order to control the device, an embedded software was developed in Python. The best way to translate the sound wave into tactile vibrations, the human being's ability to interpret the stimuli, and the computational cost to process the methods was studied. The definition of the most efficient method came through tests performed with volunteers.*

**Resumo.** *Este artigo propõe apresentar métodos de mapeamento do som em estímulos táteis. Para avaliar os diferentes métodos, construiu-se um dispositivo portátil, composto por um microfone acoplado a um microcontrolador que manipula diversos vibrotactores. O microcontrolador, com base no som captado, gera os padrões vibratórios perceptíveis ao tato. Para manipular o dispositivo desenvolveu-se um software embarcado em Python. Estudou-se a melhor forma de traduzir a onda sonora em vibrações táteis, a capacidade do ser humano interpretar os estímulos e o custo computacional para processamento dos métodos. A definição do método mais eficiente veio através de testes realizados com voluntários.*

## 1.Introdução

Sabe-se há muitos anos que a comunicação verbal é uma ação multissensorial que envolve principalmente a audição e a visão [SUN54, MCG76]. Em um experimento realizado na década de 70, pesquisadores enviaram mensagens simultâneas conflitantes por vídeo e áudio e descobriram que o estímulo visual pode inclusive suplantar o sonoro no processo de interpretação da fala. Indivíduos eram expostos simultaneamente ao som de um “ba” e a imagem de uma pessoa falando “da” e, perguntados sobre o que escutaram respondiam sem hesitação: “da”.

O método Tadoma [ALC32] possibilita comunicação para cegos-surdos tocando a face do falante, provando, em termos práticos, que o tato pode ser útil na comunicação. Surdos dançam [QUI06], percebendo a vibração que a música produz no solo com os pés ou a sentindo a reverberação das frequências mais baixas em suas próprias caixas torácicas.

Pretende-se determinar, nesse trabalho, a melhor forma de fazer o mapeamento do som em vibrações perceptíveis pelo tato humano, de forma a subsidiar o desenvolvimento de um dispositivo que faça esse mapeamento. Durante o processo foi desenvolvido, para fins de testes, um aparelho que pode ser considerado um protótipo inicial do dispositivo final desejado.

Espera-se que tal dispositivo seja útil para chamar a atenção do usuário para ruídos ambientais importantes como uma campainha, uma sirene de ambulância, um trovão ou a freada de um carro. Além disso, o dispositivo proposto será um importante acréscimo de informação aos leitores de lábio. Supõe-se que a qualidade da leitura labial será aumentada incluindo-se os estímulos táteis. A avaliação da provável melhoria da qualidade da leitura labial é deixada para trabalhos futuros.

O trabalho dá prosseguimento a pesquisas que concluíram ser viável a construção de um dispositivo específico, embora sem desenvolvê-lo [BAR08] [GOL12] [WYS12].

Além desta seção, o trabalho está dividido em mais 4 seções. Na seção 2 é apresentada uma revisão sistemática da bibliografia relacionada. Na seção 3, são apresentados os componentes usados para construção do hardware, quais foram os requisitos do software e a descrição do processo para avaliação da viabilidade do dispositivo. Também é mostrado o desenvolvimento do trabalho ao detalhar a construção do dispositivo (hardware + software), como foram implementados os métodos a serem

avaliados e como foi feita a avaliação do dispositivo. Na seção 4, apresenta-se os resultados obtidos e define-se o melhor método a ser usado. O trabalho é concluído na seção 5, em que também apresentam-se propostas para trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Foi feita uma revisão sistemática com o objetivo de realizar um levantamento de artigos publicados em bases de pesquisas científicas que descrevam trabalhos na área de processamento de sinais biológicos que possam trazer subsídios na discussão relacionada à utilização de estímulos táteis como método auxiliar as pessoas na percepção de sons do ambiente externo. É esperado que o resultado da busca atenda a questão que inicia este trabalho: *qual melhor método de fazer com que estímulos táteis sejam capazes de traduzir informações sonoras às pessoas.*

Questões de pesquisa que auxiliam no direcionamento do trabalho:

Q1: É possível que pessoas entendam estímulos táteis como informações?

Q2: Qual deve ser a quantificação dos parâmetros para definir os sinais de entrada?

Q3: Quais requisitos o dispositivo deve possuir?

A Tabela 1 apresenta os critérios para a realização da Revisão Sistemática a partir da questão de pesquisa apresentada.

**Tabela 1: Critérios para a Revisão Sistemática**

<b>Critério</b>	<b>Descrição</b>
Seleção de Fontes	Será fundamentada em bases de dados eletrônicas incluindo as conferências e artigos.
Palavras-chave	<i>“tactile communication”, “perception of sound”, “estímulos vibrotáteis”.</i>
Idioma dos Estudos	Português, Inglês.
Métodos de busca de fontes	As fontes serão acessadas via <i>web</i> . Acesso remoto por meio do IF ao conteúdo do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.
Listagem de fontes	ACM Digital Library ( <a href="http://portal.acm.org">http://portal.acm.org</a> ), IEEE Digital Library ( <a href="http://ieeexplore.ieee.org">http://ieeexplore.ieee.org</a> ), Science@Direct ( <a href="http://www.sciencedirect.com">http://www.sciencedirect.com</a> ), Scopus ( <a href="http://www.scopus.com">http://www.scopus.com</a> ).
Tipo dos Artigos	Teórico, Prova de conceito, Estudos experimentais.
Critérios de Inclusão e Exclusão de Artigos	Os artigos devem estar disponíveis na <i>web</i> ; Os artigos devem demonstrar testes feitos com os experimentos;

A seleção dos estudos preliminares fez-se através de uma busca por artigos que continham as palavras-chave definidas. Os artigos identificados foram selecionados através da leitura e verificação dos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos. Para definir a qualidade dos potenciais artigos, avaliou-se a fonte para extração do material, e a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão dos estudos. Os resultados foram tabulados e foram realizadas análises para auxiliar o entendimento da utilização de estímulos táteis como forma de transmitir informações. Para cada estudo selecionado após a execução do processo de seleção, foram extraídos os seguintes dados: título do artigo, autores, fonte, tipo de publicação científica e data da publicação.

Foi necessário restringir o escopo das buscas. Essa restrição varia de acordo com a *string* de busca utilizada e considera o periódico no qual a busca é realizada e o local onde as palavras-chaves serão procuradas (todo o texto ou *abstract*). A *string* de busca utilizada para a questão de pesquisa apresentada foi:

***tactile communication or perception of sound with vibrotactors or vibrotactile communication applied to deaf peoples.***

A *string* de busca foi aplicada em cada base de dados digital. A primeira pesquisa resultou em 69 artigos. O processo de inclusão e exclusão foi conduzido de forma a privilegiar somente os artigos que atendessem aos critérios previamente estabelecidos. O título e resumo dos artigos selecionados foram então analisados para verificar se eles de fato tratavam do tema do trabalho. Após análise do título e do resumo o número de artigos foi reduzido a 16 publicações, conforme a Tabela 2.

**Tabela 2. Artigos encontrados e selecionados após os critérios de inclusão e exclusão**

Lista de Fontes	Trabalhos encontrados conforme a <i>String</i> de Busca	Artigos selecionados após a aplicação dos critérios de inclusão e Exclusão
ACM Digital Library	15	2
IEEE Digital Library	27	12
Science@Direct	22	0
Scopus	5	2
Total	69	16

## 2.1. Artigos que atendem às questões da pesquisa:

### a) Q1: É possível que pessoas entendam estímulos táteis como informações?

Sabe-se que o uso de vibrações como principal meio de transferir informações é estudado desde antes do século XX [BAR09], já foram feitos testes em pessoas com deficiências auditivas e foi constatado que elas conseguem reconhecer informações recebidas através de estímulos táteis [GOL76].

O trabalho [BAR09] apresenta um gerador de sinais usado para representar sinais vocálicos em vibrotactores. Os vibrotactores são adaptados em pessoas com deficiências auditivas para que pudessem sentir os estímulos e, em sequência, reportar um *feedback* sobre os sinais recebidos. Os testes foram feitos com sistemas em tempo real. O protótipo foi composto de um microfone para captação da voz, um computador para processamento, um gerador de sinais para gerar a estímulos e os vibrotactores. A informação acústica é convertida em informação tátil.

Em [GOL76] é proposto um estudo para avaliar a eficácia e estímulos táteis para captação de sinais sonoros por crianças com deficiência auditiva. Elas foram submetidas a seis semanas de treinamentos com padrões vibratórios e deram seu *feedback*. Os sinais utilizados foram emitidos por um gerador de sinais com frequências fixas e sem interferências (ruídos), algo sem relação com os sinais do ambiente externo.

O artigo [WYS12] propõe o desenvolvimento de um protótipo para auxiliar a percepção de sons com frequências acima de 1 KHz. Foi desenvolvida uma superfície plana com vibrotactores acoplados que recebem sinais aleatórios emitidos por um gerador de frequências. Os voluntários que realizaram os testes colocaram a palma da mão sob a superfície e recebiam os estímulos.

Os artigos [BAR07][BAR09] propõem uma pesquisa para descobrir como o uso de estímulos vibrotáteis podem auxiliar a percepção da voz por pessoas com deficiência auditiva ou surdez. É feito treinamento com voluntários e relatada a eficiência do protótipo.

No artigo [GOL12] foi desenvolvida uma luva móvel para auxiliar a tradução de alfabeto em estímulos táteis. Esta luva contém vibrotactores e que cada movimento feito (referente à uma letra do alfabeto) e gera um estímulo tátil.

O artigo [BAR08] faz testes para analisar a sensibilidade tátil de pessoas com deficiências auditivas e visuais. Os testes resumem-se em descobrir se a pessoa consegue perceber a intensidade dos estímulos que variam de acordo com a intensidade da frequência e classificá-los em “muito grande”, “grande”, “pequena” e “muito pequena”.

## **b) Q2: Qual deve ser a quantificação dos parâmetros para definir os sinais de entrada?**

O artigo [GOL76] relata os limites de variação da frequência do som e propõe um estudo para avaliar a eficácia e estímulos táteis para captação de sinais sonoros por crianças com deficiência auditiva. Crianças foram submetidas a treinamentos com padrões vibratórios e deram seu *feedback*.

O artigo [LIM06] descreve o limite da intensidade dos sons usados e também quais especificações dos vibrotactores.

## **c) Q3: Quais requisitos o dispositivo deve possuir?**

Os artigos [BAR09], [GOL76] e [WYS12] desenvolveram protótipos que possuem computadores como central de processamento, e realizaram testes com estímulos táteis. Tiveram bons resultados e concluíram que é possível desenvolver um dispositivo para realizar a integração de estímulos táteis na percepção de som.

Mais recentemente [GIG09] desenvolveu um dispositivo capaz de produzir suaves jatos de ar, perceptíveis pela pele. O dispositivo é utilizado para reproduzir os jatos de ar produzidos pela boca humana durante a fala. Quando os jatos são direcionados para a pele do ouvinte, a interpretação da fala é melhorada [AUE98]. Descobriu-se que dispositivos capazes de produzir vibrações são importantes para a determinação da entonação em uma frase (o orador faz uma afirmação ou uma pergunta?). A característica do discurso nem sempre perceptível apenas por estímulos visuais (leitura de lábios).

Foram feitos testes em pessoas com deficiências auditivas [GOL76] e foi constatado que elas conseguem reconhecer informações recebidas através de estímulos táteis. Alguns protótipos foram desenvolvidos para testes em [LIM06] e [WYS12], porém não são portáteis [BAR11][BAR09], necessitam de um computador para realizar o processamento dos sinais [WYS12] ou limitam-se a sinais gerados por softwares emissores de frequências [BAR11][LIM06][WYS12]. A sensibilidade tátil, de pessoas com deficiências auditivas e visuais, foi avaliada e mostrou-se capaz de diferenciar a intensidade de estímulos aplicados sobre a pele [BAR08]. Os estudos citados provam que a compreensão do som já é um fenômeno multissensorial por natureza, e que o tato pode auxiliar na compreensão da linguagem oral e na percepção de sons do ambiente.

## **3. Materiais e métodos**

### **3.1. Montagem do Hardware**

O dispositivo possui a função de obter, discretizar, processar e mapear em um padrão vibratório o sinal analógico captado pelo microfone, acionando os vibrotactores coerentemente através de uma porta serial com modulação pela largura do pulso (PWM). Como o objetivo final é projetar um dispositivo que processe o som em tempo real, a velocidade de processamento do microcontrolador é importante.

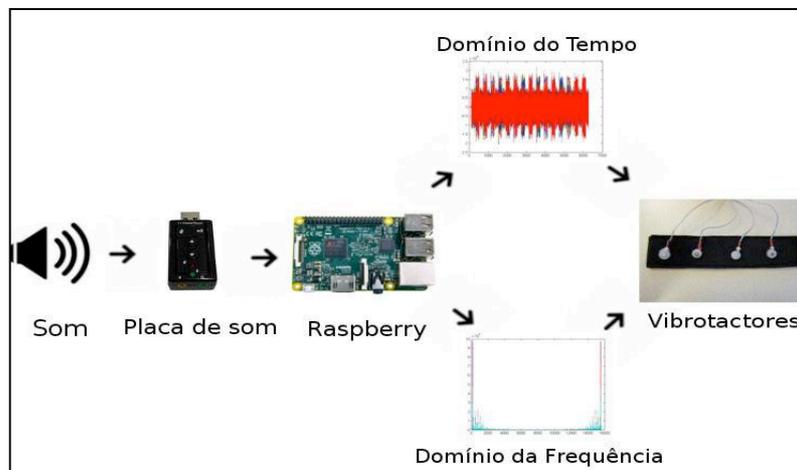
Microcontrolador é um pequeno computador em um único circuito integrado que contém um núcleo de processamento, memória e periféricos programáveis de entrada e saída. Inicialmente, com intuito de desenvolver um dispositivo com baixo custo financeiro, optou-se pelo Arduino UNO, um microcontrolador que entre suas características, possui uma linguagem de programação própria (baseada em C/C++), 32 KB de memória flash e 16 MHz de velocidade de clock [ARD16].

Sabe-se que o espectro sonoro audível por um ser humano varia entre 20 Hz e 20 KHz. Sabe-se pelo teorema de Nyquist [OLI09] que a frequência de amostragem de um sinal deve ser no mínimo duas vezes a frequência de interesse quando o sinal está livre de ruídos, portanto, para cobrir o espectro audível, necessitou-se de uma taxa de amostragem de aproximadamente 44 KHz. Segundo [ARD16], a taxa máxima de leitura de informações analógicas do Arduino UNO é de 10KHz, portanto, conclui-se que o poder de processamento do Arduino UNO não é suficiente para a aplicação em questão.

Com isso, optou-se pelo Raspberry Pi 2, um microcontrolador com hardware superior ao Arduino, com clock de 900MHz, 1GB memória RAM e a possibilidade de programar sobre um sistema operacional [RPI16]. O Raspberry não possui suporte para entrada de áudio. Desta forma, foi necessário adicionar uma placa para entrada de áudio USB [ARD16] e um microfone [MIC02] com plug P2 para captar sons com frequências entre 20 Hz e 20 KHz.

Como forma de transmitir estímulos táteis à pele das pessoas foram utilizados vibrotactores [VIB16]. Os vibrotactores transformam um sinal de saída da porta PWM em vibração. Os componentes utilizados no projeto são transdutores cilíndricos para estimulação da pele com 5 mm de altura por 10 mm de diâmetro.

A Figura 1 ilustra a montagem do dispositivo.



**Figura 1: Esquema com protótipo desenvolvido**

Escolheu-se a parte interna do antebraço para receber os vibrotactores. Apesar da sensibilidade do antebraço não estar entre as maiores quando comparada com outras partes do corpo, optou-se por construir um protótipo para ser adaptado nessa região. Considerou-se que instalar um dispositivo vibrotátil na mão, no rosto ou nos pés, regiões de maior sensibilidade, traria inconvenientes práticos à utilização do dispositivo.

Quanto maior a capacidade de resolução espacial maior deve ser a distância entre os pontos que emitirão estímulos à pele [SIL12]. A Figura 2 mostra a menor separação entre dois estímulos para que sejam distinguíveis pelo tato, segundo [BEA02]. Com base nessas informações definiu-se a utilização de 4 vibrotactores, alocados com distância de 5 cm entre eles já que a resolução mínima do antebraço é de 4 cm [BEA02]. Definiu-se 250 Hz como sua frequência de vibração, pois é frequência de maior sensibilidade dos mecanorreceptores da pele [OLI09].



**Figura 2. Discriminação seletiva entre dois pontos na superfície corporal [BEA02]**

### 3.2. Arquitetura lógica do sistema

O Raspbian é o sistema operacional utilizado, ele é livre, baseado em Debian e otimizado para o hardware do Raspberry Pi. Ele possui uma lista de programas e utilitários para auxiliar no desenvolvimento de aplicações. Além disso, o Raspbian dispõe mais de 35.000 pacotes, software pré-compilado empacotado de fácil instalação no Raspberry Pi [RAS16].

Na construção do software utilizou-se a linguagem Python na versão 2.7, uma linguagem de propósito geral de alto nível, multiparadigma, ou seja, suporta o paradigma orientado a objetos, imperativo, funcional e procedural. Possui tipagem dinâmica, código altamente legível e exige poucas linhas de código se comparado ao mesmo programa em outras linguagens [PYT16]. Python possui um grande número de bibliotecas que facilitaram o desenvolvimento deste projeto, tais como: Rpi.GPIO (para acionar os vibrotactores com PWM) e numpy (para trabalhar com números e arrays).

Desenvolveram-se duas versões de software, uma voltada ao que será o dispositivo final com capacidade de capturar o som do ambiente externo com auxílio do microfone e outra capaz de manipular arquivos de sons pré-gravados, em formato “wav”. A segunda versão foi utilizada para testar o dispositivo e os métodos de conversão do sinal analógico em estímulo tátil. A única diferença estrutural entre elas é a origem do sinal de entrada.

Com o sinal de entrada obtido, o Raspberry realiza o processo de discretização transformando o sinal analógico em digital o que resulta em um array unidimensional contendo as intensidades do som no domínio do tempo.

Para acionamento dos vibrotactores, foi necessário gerenciar as portas a que eles ficariam conectados, para isso adotou-se a biblioteca Rpi.GPIO que possui diversos métodos para manipulação de portas e utilização do PWM.

Desenvolveram-se três métodos para converter o som em estímulo tátil, dois trabalhando com o som no domínio do tempo e um no domínio da frequência. Nomeou-se os métodos de: “IGUAL”, “CRESCENTE” e “FREQUÊNCIA”. A seguir é feita uma descrição de cada um:

Para todos os métodos, descobre-se a maior amplitude de toda a amostra. Esse valor corresponderá à vibração de maior intensidade.

**IGUAL:** Para cada bloco de 0,2 s descobre-se a maior amplitude do bloco e acionam-se os vibrotactores proporcionalmente a esse valor. Todos os quatro vibrotactores vibram sempre com a mesma intensidade (daí o nome “IGUAL”).

**CRESCENTE:** Similar ao método IGUAL, mas acionando os vibrotactores progressivamente como na Tabela 3.

**Tabela 3: Organização dos vibrotactores no método CRESCENTE**

	Percentual do máximo no bloco de 0,2 s em relação a máxima de toda a Amostra			
Vibrotactores	0% a 25%	25% a 50%	50% a 75%	75% a 100%
1	Proporcional ao som	100%	100%	100%
2	0	Proporcional ao som excedente de 25%	100%	100%
3	0	0	Proporcional ao som excedente de 50%	100%
4	0	0	0	Proporcional ao som excedente de 75%

**FREQUÊNCIA:** utilizou-se vibrotactores diferentes para diferentes faixas de frequência. Descobre-se a maior frequência de toda a amostra e dividiu-se o espectro compreendido entre zero e o máximo descoberto em 4 partes. Cada vibrotactor vibra proporcionalmente à maior amplitude em cada faixa de frequência. Supondo que a maior frequência de uma amostra seja 5 KHz, os vibradores serão acionados como na Tabela 4.

**Tabela 4: Acionamento dos vibrotactores supondo maior frequência da amostra igual a 5.000 Hz**

Vibrotactor	Vibra proporcionalmente à maior amplitude encontrada na faixa de:
1	0 Hz a 1.250 Hz

2	1.251 Hz a 2,500 Hz
3	2,501 Hz a 3,750 Hz
4	3,751 Hz a 5.000 Hz

O algoritmo de todo o software implementado, em alto nível, é:

enquanto existir entrada, para cada bloco de 0,2 s de som:

discretiza o sinal analógico;

se método IGUAL:

calcula a maior amplitude do bloco;

calcula a intensidade da vibração;

aciona todos os vibrotactores com a mesma intensidade;

senão se método CRESCENTE:

calcula a maior amplitude do bloco;

calcula a intensidade da vibração;

aciona os vibrotactores de acordo com a intensidade;

senão:

aplica a DFFT no sinal;

calcula a maior amplitude do bloco;

divide espectro entre 0 e maior amplitude, em 4 faixas;

calcula maiores amplitudes de cada faixa de frequência;

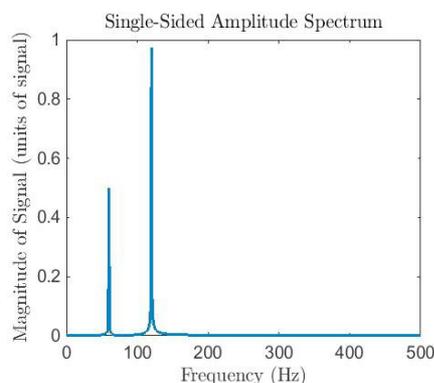
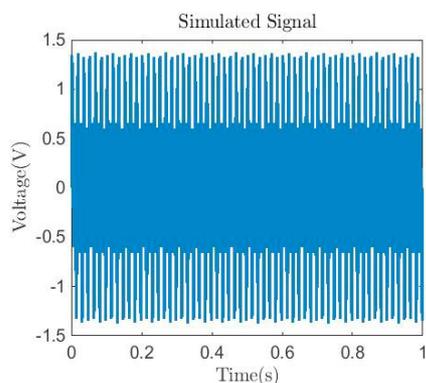
aciona os vibrotactores de acordo com as maiores amplitudes;

### 3.3. Processando o sinal

Para avaliar o melhor método de conversão do sinal analógico em vibração tátil, analisou-se a intensidade do som no domínio do tempo e no domínio da frequência. A intensidade no tempo corresponde ao valor capturado pelo microfone em decibéis (dB). Para obter a intensidade no domínio da frequência, utilizou-se a DFFT (Discret Fast Fourier Transform). As Figuras 3 e 4 ilustram representações gráficas para os sinais trabalhados.

O cálculo da DFFT dá-se a partir de um sinal discretizado no domínio do tempo e gera um conjunto de valores representando esse sinal no domínio da frequência, ou seja, apresenta a amplitude de cada região de frequência, permitindo que sejam analisadas as frequências componentes do sinal. As regiões de frequência calculadas pela DFFT são definidas pela razão entre taxa de amostragem e número de elementos da amostra. O resultado da DFFT é um conjunto de valores com mesmo número de elementos dos utilizados no cálculo, e cada um desses valores do resultado representa uma média das amplitudes das frequências contidas em cada intervalo [HAY99].

A taxa de amostragem utilizada no sistema é 44100 Hz, com 8820 amostras por bloco de 0,2 s, portanto cada região de frequência do resultado do cálculo da DFFT é de aproximadamente de 5 Hz.



**Figura 3: Som no domínio do tempo [GRA16] Figura 4: Som no domínio da frequência [GRA16]**

### 3.4. Avaliação do Dispositivo

A fim de avaliar o dispositivo e os diferentes métodos de mapeamento do som em vibrações, foram gerados padrões vibratórios referentes aos seguintes sons: alarme, buzina, choro de criança, telefone e trovão e apresentados a pessoas com a intenção de avaliar a acurácia da determinação do som original, a partir das vibrações, por um conjunto de indivíduos. Os testes seguiram o roteiro abaixo:

1. Explica-se objetivos do trabalho;
2. O voluntário assina termo de consentimento esclarecido e informa dados pessoais (nome, idade, sexo e se surdo/ouvinte);
3. Para cada um dos métodos testados:
  - 3.1. Escolhe aleatoriamente um dos métodos ainda não utilizados;
  - 3.2. Treinamento:
    - 3.2.1. Uma vez para cada som: Exibiu-se identificação numérica e literal na tela, reproduziu-se o som e acionaram-se os vibrotactores simultaneamente;
    - 3.2.2. Três vezes para cada som: Exibiu-se identificação numérica e literal na tela e acionaram-se os vibrotactores simultaneamente;
    - 3.2.3. Para cada possível combinação de dois sons: Exibiu-se identificação numérica e literal na tela e acionaram-se os vibrotactores simultaneamente, sendo um som por vez;
  - 4.3. Teste:
    - 3.3.1. Repetiu-se por 15 vezes:
      - sorteio de um dos sons;
      - aciona vibrotactores conforme som e método;
      - aguarda usuário escolher som percebido pelas vibrações;
    - 3.3.2. Gravaram-se os seguintes dados em arquivo XML: data/hora, nome, idade, sexo, surdez, padrão exibido (“vibrado”), padrão identificado (“escolhido”);

Essa metodologia foi aplicada a 50 voluntários, sendo 5 surdos, (primeiro teste). A seguir foram selecionados 10 entre esses 50 que repetiram a metodologia por mais 4 vezes (segundo teste) em dias diferentes, nos permitindo avaliar quanto do aprendizado é retido em um período superior a 24 horas. Dessa forma conseguiu-se uma projeção de como seria o processo de aprendizado de reconhecimento dos padrões vibratórios com o uso contínuo do dispositivo.

Foi avaliado também o custo computacional para execução de cada um dos métodos testados.



Figura 5: Testes com os participantes.

### 4. Resultados

É esperado como resultado deste trabalho, a definição do melhor método de conversão de som em estímulo tátil. Para definir o melhor, analisou-se os dados coletados durante os testes executados. Para auxiliar a análise dos resultados obtidos utilizou-se o software estatístico Minitab 17 [RYA04].

#### 4.1. Associações corretas entre som e estímulo tátil (primeiro teste)

O primeiro teste resultou no percentual de associações corretas entre sons e estímulo tátil com cada método feito por todos os participantes. Pode-se concluir de acordo com os resultados exibidos na Figura 6, que o método IGUAL apresenta resultados inferiores aos demais. Os métodos CRESCENTE e FREQUÊNCIA apresentaram resultados parecidos. Recorreu-se a análises estatísticas para determinar se existe ou não diferença relevante entre os resultados obtidos.

Analisou-se as associações corretas dos surdos em relação aos ouvintes. Os surdos apresentaram um número de associações corretas inferior em 33%, 15% e 36%, nos métodos IGUAL, CRESCENTE e FREQUÊNCIA respectivamente. Acredita-se que a capacidade de conhecer os sons foi relevante no resultado dos ouvintes.

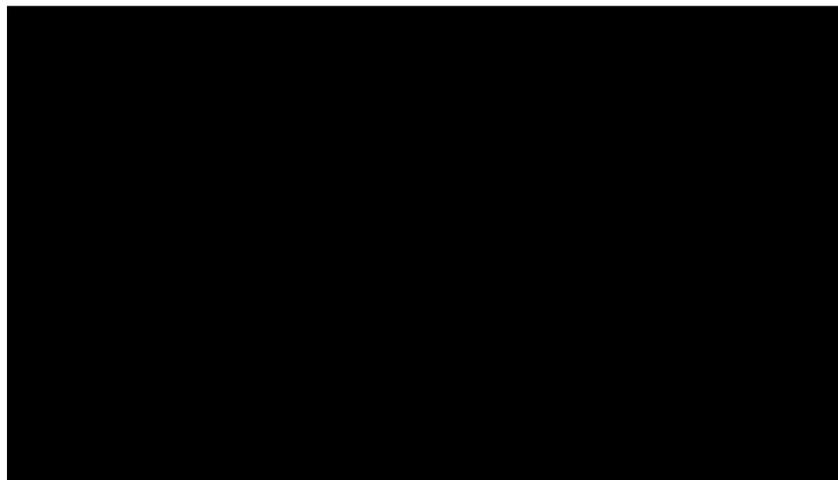


Figura 6:

Percentual de acertos em cada método

Para conseguir determinar a existência de alguma diferença entre eles utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA), um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos e determinar a existência de diferenças entre eles. As análises ANOVA exigem dados de populações aproximadamente normalmente distribuídas com variâncias iguais entre fatores [EST08].

Determinou-se a normalidade utilizando o teste de Shapiro-Wilk [EST08] com significância de 5%, com p-values 0,1, 0,1, e 0,064 para os métodos IGUAL, CRESCENTE E FREQUÊNCIA respectivamente.

Através do teste de Levene [EST08] com nível de significância em 5%, determinou-se a homogeneidade das variâncias. Resultou-se em um p-value igual a 0,422, portanto os dados são homocedásticos.

Como os dados são normais e homocedásticos, pode-se utilizar um teste paramétrico ANOVA. Definiu-se o nível de significância em 5%, e tomou-se por hipótese zero (H0) como sendo todas as médias iguais e hipótese um (H1) como médias diferentes. Com p-value igual a 0,010, há indícios de rejeição de H0, logo, existe alguma média diferente.

Com a existência de diferenças entre as médias, aplicou-se o teste de Tukey [EST08] para comparar a média de cada tratamento (método) e concluir como cada um está agrupado. A Figura 7 demonstra como ficou o agrupamento dos tratamentos após o teste.

#### Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

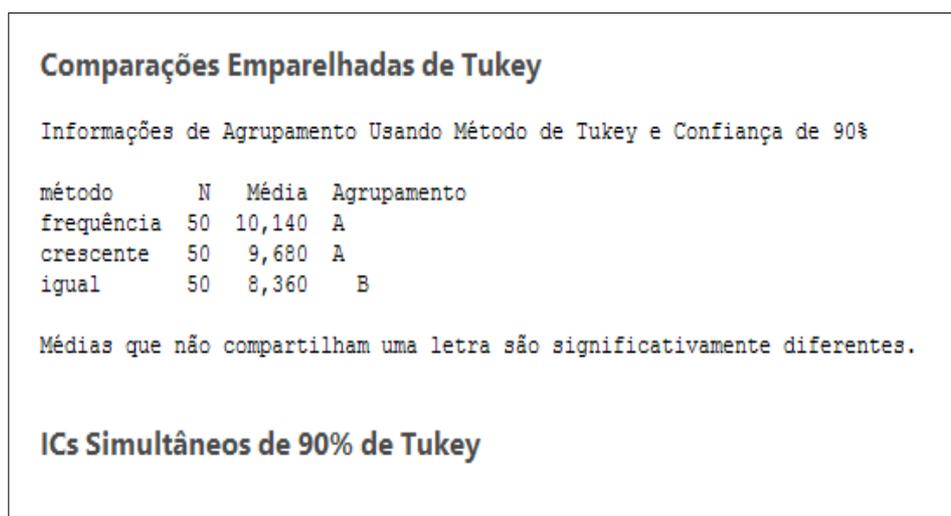
método	N	Média	Agrupamento
frequência	50	10,140	A
cresciente	50	9,680	A B
igual	50	8,360	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

#### ICs Simultâneos de 95% de Tukey

**Figura 7: Teste Tukey com grau de confiança em 95%.**

Conclui-se que os três métodos estão agrupados em dois grupos. O grupo A contém os métodos FREQUÊNCIA e CRESCENTE, o grupo B contém os métodos IGUAL e CRESCENTE. Com isso, não pode-se afirmar a superioridade de um método aos outros. Optou-se por reduzir o grau de confiança para 90% e realizar o teste novamente. A Figura 8 exibe o novo resultado do agrupamento.



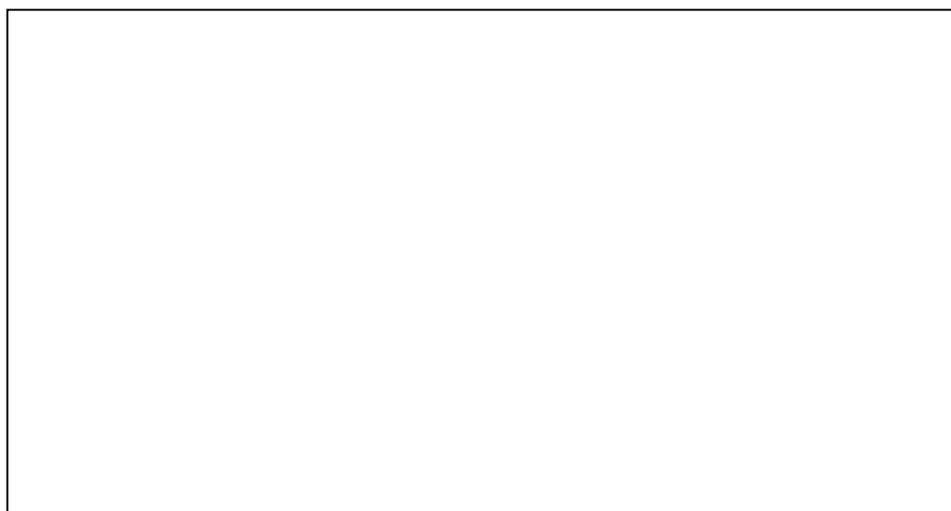
**Figura**

**8: Teste Tukey com confiança em 90%.**

O novo resultado mostra que os métodos CRESCENTE e FREQUÊNCIA estão em um mesmo grupo, ou seja, não apresentaram resultados estatisticamente relevantes. O método IGUAL encontra-se esperado em um grupo B e é inferior aos demais, portanto, o método IGUAL foi descartado nos testes seguintes.

#### **4.2. Análise do Teste de Retenção de Aprendizagem (segundo teste)**

Neste teste avaliou-se o quanto de aprendizagem era retida após os participantes receberem treinamento durante vários dias consecutivos. A Figura 9 exibe em forma de gráfico a evolução dos participantes



, em cada método, no decorrer dos dias de treinamento.

### Figura 9: Retenção de Aprendizado

Conclui-se que com mais treinamento os participantes conseguem associar uma vibração a seu som com maior facilidade utilizando método “CRESCENTE”.

#### 4.3. Custo computacional (terceiro teste)

Como pode-se observar na Tabela 4, o método FREQUÊNCIA gasta em média 2,5 vezes mais tempo na execução do que o método CRESCENTE.

**Tabela 4: Custo computacional, em segundos dos métodos de mapeamento do som em vibração. Médias em 5 experimentos**

	Média	Desvio Padrão
CRESCENTE	0,0022	0,0002
FREQUÊNCIA	0,0056	0,0001

### 5. Conclusões e trabalhos futuros

Entre os métodos estudados e de acordo com os resultados analisados acredita-se que o método CRESCENTE é o mais eficiente para conversão de sons em estímulos táteis. Apesar de o método FREQUÊNCIA ter apresentado média de acertos de reconhecimento de sons superior (primeiro teste), a diferença não foi estatisticamente relevante e com o método CRESCENTE. Os surdos tiveram o número de associações corretas mais próximos dos ouvintes no método CRESCENTE (primeiro teste). Os voluntários do projeto apresentaram maior capacidade de retenção do aprendizado com várias sessões de treinamento e teste em momentos diferentes (segundo teste). O custo computacional inferior ao método FREQUÊNCIA também é importante na escolha do melhor método, visto que há impacto na aplicabilidade de um dispositivo que capta sons em tempo real em que pode ser necessário adicionar outros recursos, como filtros, para conseguir captar o som que possui a informação pretendida, quanto menor o tempo de processamento menor será a perda de informações do ambiente (terceiro teste).

É necessário a adaptação e teste do sistema para a tradução em estímulos táteis de forma contínua, com o som captado de um microfone e não recebido de arquivos gravados. O sistema testado precisa de um limite superior para a amplitude. Atualmente esse limite é descoberto do arquivo gravado. Para sons captados do ambiente em tempo real, essa informação não estará disponível, portanto, deve-se definir um limite fixo que seja bom para a maioria das situações ou fazer o cálculo em função do input, alterando o limite em função do que foi captado no passado.

Utilizou-se vibrotactores que na essência são motores que giram pequenas massas excêntricas. Esse tipo de aparelho, devido a inércia, leva um tempo considerável para alterar seus padrões vibratórios. Possivelmente um vibrotactor construído especialmente para a finalidade, que consiga alterar o padrão vibratório em um espaço de tempo menor, seja mais eficiente. Avaliações desses equipamentos são interessantes.

### 6. Referências

- [ADP16] Adaptador usb. Disponível em: [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-707304721-usb-stereo-sound-adapter-\\_JM#redirectedFromSimilar](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-707304721-usb-stereo-sound-adapter-_JM#redirectedFromSimilar). Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [ALC32] Alcorn S. (1932). “The Tadoma method,” *Volta Rev.* 34, 195–198.
- [ARD16] Arduino Uno. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [AUE98] Auer, E. T., Jr., Bernstein, L. E., & Coulter, D. C. (1998). Temporal and spatio-temporal vibrotactile displays for voice fundamental frequency: an initial evaluation of a new vibro-tactile speech perception aid with normal-hearing and hearing-impaired individuals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104, 2477–2489
- [BAR08] Barbacena, I. L., Lima, A. C. O., A. Barros, T., Freire R. C. S. and Pereira, J. R., "Comparative Analysis of Tactile Sensitivity between Blind, Deaf and Unimpaired People," *Medical Measurements and Applications*, 2008. MeMeA 2008. IEEE International Workshop on, Ottawa, ON, 2008, pp. 19-24.

- [BAR09] Barbacena, I. L., Freire, R. C. S., Barros, A. T. and Costa, S. C., "A low cost signal generator for real time vibrotactile stimulations for hearing impaired people," GCC Conference & Exhibition, 2009 5th IEEE, Kuwait City, 2009, pp. 1-5.
- [BAR11] Barbacena, I. L., Sá, A. V. S., Freire, R. C. S., Neto, B. G. A. and Brandt, R. R., "A signal generator for real time vibrotactile stimulations," ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference 2011, Vitoria, 2011, pp. 1-5.
- [BEA02] Bear, M. F., Connors, B. W., Paradiso, M. A. Neurociências – Desvendando o Sistema Nervoso, 2a ed. Porto Alegre: Artmed, 2002. 878 p.
- [EST08] Triola, Mario F. Introdução à Estatística, 10a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 696 p.
- [GIG09] Gick, Bryan, Derrick, Donald. Aero-tactile integration in speech perception; Nature 462; 502-504; 2009; doi:10.1038/nature08572
- [GOL12] Gollner, U., Bieling, T., and Joost, G., Mobile Lorm Glove: introducing a communication device for deaf-blind people. In Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '12), Stephen N. Spencer (Ed.). ACM, New York, NY, USA, 2012, pp. 127-130.
- [GOL76] Goldstein, M., Stark, R., Yeni-Komshian G. and Grant, D.. "Tactile stimulation as an aid for the deaf in production and reception of speech: Preliminary studies," Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '76., 1976, pp. 598-601.
- [GRA16] Gráficos com sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência. Disponível em: <http://engineertomorrow.com/fast-fourier-transform-fft-with-corrected-amplitude-using-matlab/>. Acessado em 02 de janeiro de 2016.
- [HAY99] HAYKIN, Simon; VEEN, Barry Van. Sinais e sistemas. São Paulo: Bookman, 1999.
- [LIM06] Lim, S. c., Kim, S. c., Kyung, K. u. and Kwon, D. s., "Quantitative Analysis of Vibrotactile Threshold and the Effect of Vibration Frequency Difference on Tactile Perception," 2006 SICE-ICASE International Joint Conference, Busan, 2006, pp. 1927-1932.
- [McG76] McGurk, H.; MacDonald, J.; "Hearing lips and seeing voices," Nature, vol. 264, pp. 746-748, 1976.
- [MIC01] Microfone 1. Disponível em: <http://www.filipeflop.com/pd-b473d-sensor-de-som-ky-038-microfone.html>. Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [MIC02] Microfone 2. Disponível em: [http://www.americanas.com.br/produto/8138517/em21-microfone-c-fio-lapela-em-2-1-yoga?DCSext.recom=RR\\_item\\_page.rr1-ClickCP&condition=NEW&nm\\_origem=rec\\_item\\_page.rr1-ClickCP&nm\\_ranking\\_rec=4](http://www.americanas.com.br/produto/8138517/em21-microfone-c-fio-lapela-em-2-1-yoga?DCSext.recom=RR_item_page.rr1-ClickCP&condition=NEW&nm_origem=rec_item_page.rr1-ClickCP&nm_ranking_rec=4). Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [OLI09] Oliveira, Cretan Pires de, Pustilnick, Rafael. Sistema Vibrotátil para Auxiliar Deficientes Auditivos no Aprendizado da Vocalização. Novembro de 2009. 48 p. Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Positivo.
- [PYT16] Python. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [QUI06] Quixaba, Maria Nilza Oliveira. "O desenvolvimento sociocultural por meio da dança, da musicalidade e da teatralidade: uma experiência de arte inclusão com alunos surdos." Inclusão Rev Educ Esp 2.3 (2006): 41-5.
- [RAS16] Raspbian. Disponível em: <https://www.raspbian.org/> Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [RYA04] Ryan, Thomas A., Joiner, Brian L., Ryan, Barbara F., Encyclopedia of Statistical Sciences - Minitab, John Wiley & Sons, 2004
- [RPI16] Raspberry PI 2. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>. Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [SIL12] Silvia M. Nishida, Apostila do Curso de Fisiologia. Departamento de Fisiologia, IB Unesp-Botucatu, 2012. Disponível em: <http://www.ibb.unesp.br/Home/Departamentos/Fisiologia/Neuro/06.somestesia.pdf>. Acessado em 16 de dezembro de 2016.

- [SUN54] Sunby, W. H.; Pollack, I.; Visual Contribution to Speech Intelligibility in Noise,” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 26, pp. 212–215, 1954.
- [VIB16] Vibrotactor. Disponível em:  
<https://www.aliexpress.com/snapshot/7404509307.html?orderId=73385822932620&productId=2046658451>. Acessado em 15 de dezembro de 2016.
- [WYS12] Wyse, L., Nanayakkara, S., Seekings, P., Ong, S. H., & Taylor, E. Perception of vibrotactile stimuli above 1kHz by the hearing impaired. New Interfaces in Musical Expression (NIME 2012), Oslo, Norway.