

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

JÔNATAS LOUREIRO DE ALMEIDA JÚNIOR

**SISTEMA WIRELESS DE AQUISIÇÃO E SINALIZAÇÃO DE EVENTOS SONOROS
PARA DEFICIENTES AUDITIVOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

PATO BRANCO

2016

JÔNATAS LOUREIRO DE ALMEIDA JÚNIOR

**SISTEMA WIRELESS DE AQUISIÇÃO E SINALIZAÇÃO DE EVENTOS SONOROS
PARA DEFICIENTES AUDITIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação, do Departamento Acadêmico de Informática da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Luiz Bertotti
Coorientador: Prof. Dr. Dalcimar Casanova

PATO BRANCO

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

Às 10 horas e 30 minutos do dia 17 de novembro de 2016, na sala V106, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores Fabio Luiz Bertotti (orientador), Dalcimar Casanova (coorientador), Fernando José Avancini Schenatto e Marco Antonio de Castro Barbosa para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título **Sistema wireless de aquisição e sinalização de eventos sonoros para deficientes auditivos**, do aluno **Jônatas Loureiro de Almeida Júnior**, matrícula 01260782, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação o candidato foi arguido pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

Fabio Luiz Bertotti
Orientador (UTFPR)

Dalcimar Casanova
Coorientador(UTFPR)

Fernando José Avancini Schenatto
(UTFPR)

Marco Antonio de Castro Barbosa
(UTFPR)

Beatriz Terezinha Borsoi
Coordenador de TCC

Pablo Gauterio Cavalcanti
Coordenador do Curso de
Engenharia de Computação

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é fruto de uma sólida formação acadêmica, a qual não seria possível sem a competência e maestria do corpo docente de Engenharia da Computação. Refletindo sobre o curso percebo o quanto cada disciplina contribuiu em meu desenvolvimento profissional. Obrigado pelas aulas, explicações, paciência e amizade. Agradeço em especial a Profa. Dra. Beatriz Terezinha Borsoi pela dedicação, companheirismo e grande comprometimento.

Dizem que engenheiros resolvem problemas. Acredito que uma de nossas habilidades mais requisitadas é saber encontrar informações, aprender com elas rapidamente, e construir uma solução a partir disso. Devo meus avanços na Pesquisa e no autodidatismo ao Prof. Dr. Marco Antonio Barbosa, com o qual desenvolvi minhas primeiras pesquisas.

Ao meu orientador e co-orientador, agradeço imensamente pelas sugestões que me deram ao longo do ano. Sua paciência, compreensão e disponibilidade tornaram este trabalho melhor. Obrigado por me ajudarem a tornar o texto que se segue um material conciso, de fácil entendimento e relevância para a comunidade acadêmica.

Aos meus pais, vocês são o meu mundo. Não há livro nenhum que possa me ensinar tudo que aprendi com vocês. Vocês me ensinaram o que é dedicação, fibra moral e resiliência. Agradeço a vocês pela compreensão quando precisei estudar, pelas palavras de encorajamento quando titubeei e pelo amor incondicional.

RESUMO

LOUREIRO DE ALMEIDA, Jônatas. Sistema wireless de aquisição e sinalização de eventos sonoros para deficientes auditivos. 2016. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Este trabalho aborda o desenvolvimento do protótipo de um sistema de aquisição e sinalização de eventos com enfoque nas necessidades de deficientes auditivos no âmbito residencial. Os deficientes auditivos somam cerca de 5,3% de toda a população mundial (OMS, 2012). Algumas das tecnologias assistivas voltadas para essa classe de pessoas são os aparelhos auditivos, implantes cocleares e sistemas de sinalização. Este trabalho propôs um sinalizador *wireless* de eventos sonoros, que englobasse os principais sons emitidos em residências. O sistema foi composto por duas categorias de dispositivos: as estações sensoras, que monitoram constantemente o ambiente em busca de eventos sonoros cadastrados, e o dispositivo de alerta, carregável pelo usuário, que sinaliza o reconhecimento desses eventos através de uma interface gráfica e *vibracall*. Com isso, foi possível informar a chegada de visitas (monitorando a campainha e batidas na porta), alertar para perigos (ao detectar latidos de cachorro) e prevenir contratemplos. Os dispositivos foram desenvolvidos utilizando-se microcontroladores e módulos embarcados para captura e reconhecimento sonoro e comunicação sem fio. Componentes como displays e botões foram adicionados para facilitar a interação do usuário. Foram realizados testes para determinar o desempenho do sistema em duas áreas específicas: o alcance da sua comunicação sem fio em ambientes fechados e o desempenho do módulo reconhecedor de fala utilizado. Os resultados permitiram validar o conceito de um sistema de alertas para deficientes auditivos, no entanto mostraram que a comunicação *wireless* é comprometida rapidamente quando há muitos cômodos entre os dispositivos. O desempenho do módulo reconhecedor é aceitável, no entanto o mesmo possui limitações quanto ao número de eventos sonoros reconhecíveis simultaneamente. Trabalhos futuros devem focar na melhoria desses fatores.

Palavras-chave: Tecnologia assistiva. Sinalização de eventos sonoros. *Wireless*.

ABSTRACT

LOUREIRO DE ALMEIDA, Jônatas. Wireless system for acquisition and signaling of sound events to hearing impaired. 2016. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

This paper addresses the prototype development of an event acquisition and signaling system focusing on the needs of the hearing impaired on a household level. The hearing impaired add up to about 5.3% of the world's population (WHO, 2012). Some of the assistive technologies for this class of people are hearing aids, cochlear implants and signaling systems. This work proposes a wireless event sounder that includes the main sounds emitted in homes. The system was composed of two categories of devices: the sensor stations, which constantly monitor the environment for registered sound events, and the user-friendly alert device who signals those events recognition through a graphical interface and a vibracall. This made it possible to inform guest arrival (monitoring the bell and knockings on the door), warn of dangers and prevent setbacks. The devices were developed using microcontrollers and embedded modules for capture and sound recognition and wireless communication. Components such as displays and buttons were added to make user interaction easier. Tests were made to determine the performance of the system in two specific areas: the range of its wireless communication on indoor environments and the performance of the speech recognition module used. The results allowed to validate the concept of an alert system for the hearing impaired, but showed that wireless communication is compromised quickly when there are many rooms between devices. The performance of the recognizer module is acceptable, however it has limitations on the number of simultaneously recognizable sound events. Future work should focus on improving these factors.

Keywords: Assistive technology. Event signaling. Wireless.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do sistema auditivo humano.	15
Figura 2 – Processo de análise sonora por um reconhecedor de fala.	18
Figura 3 – Representação do dispositivo desenvolvido.	19
Figura 4 – Sistema wireless de reconhecimento de sons.	20
Figura 5 – Diagrama de blocos do sistema proposto	21
Figura 6 – Módulo de rádio frequência nRF24L01+	24
Figura 7 – Kit LaunchPad MSP432P401R.....	24
Figura 8 – Módulo de reconhecimento de fala VR3.	25
Figura 9 – Diagrama em blocos de uma estação sensora.....	26
Figura 10 – Máquina de estados da estação sensora.....	27
Figura 11 – <i>Display</i> LCD 16x2	28
Figura 12 – Mensagem para iniciar sequência de treino do Record 2.....	31
Figura 13 – Diagrama em blocos do dispositivo concentrador.....	32
Figura 14 – Kit Boosterpack Sharp 96x96	33
Figura 15 – Máquina de estados do módulo nRF24L01+	35
Figura 16 – Pipes de comunicação para multi-receptor de dados.....	36
Figura 17 – Pacote de dados	37
Figura 18 – Pacote de dados enviado pela estação 3.....	37
Figura 19 – Telas principais de uma estação sensora	38
Figura 20 – Estação sensora em funcionamento	39
Figura 21 – Telas da dispositivo concentrador.	39
Figura 22 – Visão frontal e traseira do dispositivo concentrador	40
Figura 23 – Locais de posicionamento do dispositivo concentrador	42
Figura 24 – Gráficos de intensidade sonora	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis auditivos e o grau de deficiência	11
Tabela 2 – Comparativo dos módulos de rádio frequência mais utilizados	22
Tabela 3 – Testes realizados para definir o escopo de sons.....	26
Tabela 4 – Principais instruções <i>display</i> LCD 16x2	29
Tabela 5 – Percentual de acertos sem obstáculos	41
Tabela 6 – Percentual de acertos com obstáculos.....	42
Tabela 7 – Número de divisórias X percentual e acertos.....	43
Tabela 8 – Percentual de acertos com o aumento da distância.....	43
Tabela 9 – Decrementos unitários de volume necessários	44

LISTA DE SIGLAS

WHO	World Health Organization
SDH	Secretaria de Direitos Humanos
U.S.C	United States Code
LED	Light Emitting Diode
SOC	System-on-chip
LCD	Liquid Crystal Display
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
SI	Speaker Independent
SD	Speaker Dependent
NIDCD	National Institute of Deafness and Other Communication Disorders
NIH	National Institute of Health
CDC	Centro para Controle de Doenças
FT	Fourier Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
MFCC	Mel Frequency Cepstral Coefficients
K-NN	K-Nearest Neighbor
HMM	Hidden Markov Models
RFID	Radio Frequency Identification
LPM	Low Power Mode
PCI	Placa de Circuito Impresso
FIFO	First In First Out
SMD	Surface Mounting Device
RF	Radio Frequência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
1.2 PROBLEMA	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 JUSTIFICATIVA	12
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 TECNOLOGIA ASSISTIVA	14
2.2 SISTEMA AUDITIVO E A DEFICIÊNCIA	15
2.3 ENGENHARIA DE REABILITAÇÃO	16
2.4 RECONHECIMENTO SONORO.....	17
2.5 TRABALHOS RELEVANTES	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 INTRODUÇÃO.....	21
3.2 MATERIAIS	22
3.3 MÉTODOS	25
3.3.1 Desenvolvimento das estações sensoras.....	25
3.3.2 Estrutura lógica do sistema.....	27
3.3.5 Desenvolvimento do dispositivo concentrador.....	31
4 RESULTADOS	38
4.1 AS ESTAÇÕES SENSORAS	38
4.2 O DISPOSITIVO CONCENTRADOR.....	39
4.3 TESTES DE DESEMPENHO	41
5 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE 1 – Esquema Elétrico da Estação Sensora.....	53
APÊNDICE 2 – Avaliação de Custo Módulos RF	54
APÊNDICE 3 – Avaliação de Custo LEDs e Display 16x2	56

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os aspectos conceituais que envolvem o problema, as justificativas e as considerações que defendem a escolha do tema. Também são apresentados os objetivos e uma visão geral da estrutura da monografia.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com pesquisas, cerca de 15% de toda população mundial possui algum tipo de deficiência (WHO, 2011). Essas pessoas enfrentam diariamente desafios em áreas como comunicação, transporte, acesso à informação e comodidade. Dificuldades que são inerentes de sua condição, mas que podem ser superadas com auxílio social e tecnológico. Atualmente existem soluções tecnológicas que visam auxiliar esse público a ter uma vida mais saudável, produtiva e independente (WHO, 2016). Exemplos disso são aplicações como próteses e órteses, óculos, aparelhos auditivos e cadeiras de rodas.

Segundo Dafydd e Raymond (1991), os deficientes auditivos são caracterizados por terem perda parcial ou total da audição, causada por má-formação ou lesão nas estruturas que compõem o sistema auditivo. As tecnologias assistivas existentes para essas pessoas vão desde aparelhos auditivos e implantes cocleares, até sinalizadores ou sistemas de alerta, telefones com teclado e *softwares* de conversão da língua falada na língua brasileira de sinais (NIDCD, 2014).

Na categoria de sinalizadores e sistemas de alerta existem aplicações voltadas para âmbito residencial e/ou para ambientes externos. Focando-se no setor residencial, é possível encontrar dispositivos capazes de sinalizar visualmente a ocorrência de eventos sonoros de interesse, como o toque de uma campainha ou telefone. Para pessoas com bebês em casa, existem *paggers* portáteis semelhantes a babás eletrônicas, os quais alertam visualmente o usuário de que a criança está chorando (NIDCD, 2014). No entanto, boa parte destas tecnologias é focada no reconhecimento de um evento específico (toque de celular, alarme de fumaça, incêndio ou choro de uma criança). Além disso, muitas soluções encontradas são relativamente grandes e/ou pesadas para serem mantidas com o usuário a todo momento.

O trabalho desenvolvido apresentou o projeto de um sistema residencial de alertas para deficientes auditivos, capaz de reconhecer eventos sonoros específicos e diferenciados. O sistema funciona com base em múltiplos dispositivos espalhados pela residência, os quais capturam e reconhecem sons relevantes ao usuário e enviam essa informação a um dispositivo carregável pelo usuário, que o notifica adequadamente.

1.2 PROBLEMA

De acordo com Organização Mundial da Saúde (OMS), 5,3% de toda a população mundial (360 milhões de pessoas) sofre com algum nível de perda auditiva (WHO, 2012). Deste número, 32 milhões são crianças, as quais terão uma exposição limitada a língua falada. Em muitos casos, isso leva à atrasos no processo de aprendizado, principalmente se não houver acompanhamento especializado (ANDERSON, 2011).

Somado a isso, considerando-se o público idoso, uma em cada três pessoas possui deficiência auditiva. Este número só tende a aumentar, devido ao crescimento da expectativa de vida (WHO, 2012). Por fim, ainda segundo a OMS, metade dos deficientes auditivos não possui condições financeiras suficientes para bancar um plano de saúde. Dessa forma, os tratamentos médicos, cirurgias e tecnologias capazes de curar e/ou diminuir os efeitos da deficiência, se tornam pouco acessíveis. Portanto, se faz por bem conhecer a respeito dos problemas de audição, sua abrangência e quais tecnologias e tratamentos médicos estão sendo desenvolvidos atualmente para auxiliar essas pessoas em seu cotidiano.

A deficiência auditiva pode se manifestar de várias formas (condutiva, sensorio-neural, mista e central) e em várias escalas de magnitude (leve, moderada, severa e profunda). Também é classificada quanto à totalidade do sistema auditivo que atinge (uni ou bilateral), podendo ser simétrica ou não com relação aos ouvidos (CDC, 2015). Além disso quesito magnitude, os critérios de limiares de perda de audição são:

Tabela 1 – Níveis auditivos e o grau de deficiência
Fonte: Davis & Silverman, 1970.

Categoria	Perda auditiva (em decibéis)
Audição normal	0 a 24
Deficiência auditiva leve	25 a 40
Deficiência auditiva moderada	41 a 70
Deficiência auditiva severa	71 a 90
Deficiência auditiva profunda	Acima de 90

Pessoas com diferentes graus de deficiência auditiva necessitam de dispositivos diferenciados (NIDCD, 2016). Em casos menos severos aparelhos auditivos e implantes cocleares conseguem compensar a deficiência. No entanto, algumas pessoas não conseguem levar uma vida normal mesmo com o uso dos dispositivos citados. Dessa forma, outras tecnologias assistivas que conseguem auxiliar essas pessoas consistem em dispositivos de alerta/sinalização, os quais informam dados relevantes sobre eventos de áudio que ocorrem nas proximidades do usuário. Esse tipo de tecnologia é o foco desse trabalho.

1.3 OBJETIVOS

A seguir estão os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver o protótipo de um sistema de aquisição e reconhecimento de eventos com enfoque nas necessidades de deficientes auditivos, permitindo alertar o usuário sobre eventos sonoros relevantes que ocorram no perímetro residencial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir os eventos de som a serem capturados e reconhecidos;
- Definir um sistema de reconhecimento de voz adequado aos propósitos do projeto;
- Desenvolver pelo menos uma unidade sensora microcontrolada;
- Desenvolver um dispositivo de alertas microcontrolado.

1.4 JUSTIFICATIVA

O universo de deficientes auditivos corresponde a 5,1% da população brasileira (IBGE, 2010). Esse número representa cerca de 9,7 milhões de pessoas de diferentes idades e classes sociais. Cada uma dessas pessoas enfrenta dificuldades diárias para se comunicar e interagir com sistemas, serviços e tecnologias comumente utilizados.

As tecnologias assistivas, dispositivos que de alguma forma auxiliam pessoas com deficiência a executar ações no dia-a-dia, são elementos chave para a inclusão e melhoria da qualidade de vida destas pessoas. Segundo Radabaugh (2014), “para a maioria das pessoas, tecnologia torna as coisas fáceis. Para pessoas com deficiência, tecnologia torna as coisas possíveis”. O acesso a estes aparatos é pré-requisito para se atingir oportunidades iguais.

O universo de tecnologias assistivas possui uma grande gama de aplicações. Em residências, por exemplo, é considerável a quantidade de equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos que utilizam sinalização sonora para indicar informações importantes. Dessa forma, para que um deficiente auditivo possa estar ciente de todas essas informações, existem sistemas de alerta desenvolvidos para captar sons ambiente, reconhecê-los e informá-los ao usuário da maneira apropriada.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 1 são apresentados os aspectos conceituais que envolvem o problema, as justificativas e os objetivos a serem alcançados com a realização do trabalho. No Capítulo 2 são apresentados os conceitos relacionados a tecnologias assistivas, engenharia de reabilitação e reconhecimento de áudio. Também são discutidos os principais trabalhos desenvolvidos na área atualmente, focando-se nas tecnologias utilizadas e no escopo dos deficientes auditivos. O Capítulo 3 apresenta os materiais utilizados para realização do trabalho e a metodologia de desenvolvimento adotada. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com a realização do trabalho. Por fim, o Capítulo 5 apresenta a conclusão obtida com a realização do trabalho. São discutidas suas limitações e possíveis soluções a ser investigadas em trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A questão da deficiência foi tratada de formas diferentes pelas civilizações no decorrer da história. Muitas culturas atribuíam à deficiência, características divinas ou sobrenaturais. Enquanto alguns povos negligenciavam esta classe de pessoas, outros aceitavam suas particularidades e procuravam incluí-las na sociedade (MUNYI, 2012). Em seu livro “Epopéia ignorada”, Silva descreve várias referências históricas que mencionam pessoas com deficiência. O mesmo autor cita a Escola de Anatomia de Alexandria, que existiu no período de 300 a.C., a qual possuía passagens históricas de cegos do Egito e seu trabalho em atividades artesanais (SILVA, 1986).

Pessoas com deficiência tiveram que batalhar por séculos contra medos irracionais e estereótipos. Foi apenas com o final da Segunda Guerra Mundial, onde o número de pessoas deficientes aumentou consideravelmente devido a ferimentos de guerra, que essa luta veio à tona (SHASTRI, 2012). Com a evolução tecnológica, a intensificação da luta global pelos Direitos das Pessoas Deficientes e a popularização de políticas sociais para auxiliar pessoas com deficiência, se tornou necessária à introdução formal do termo tecnologia assistiva.

2.1 TECNOLOGIA ASSISTIVA

Em 1988 foi sancionado pelo governo dos Estados Unidos o primeiro *Technology-Related Assistance for Individuals with Disabilities Act*, ou *Tech Act*. Tratava-se de um programa de incentivos fiscais para aumentar a ajuda dos Estados aos cidadãos que necessitassem de alguma tecnologia assistiva. Segundo o qual, o termo “dispositivo de tecnologia assistiva significa qualquer item, peça de equipamento, ou sistema de produto, adquirido comercialmente, modificado ou customizado, que é usado para aumentar, manter ou melhorar as capacidades funcionais de indivíduos com deficiências.” (29 U.S.C. Sec 2202).

Itens considerados tecnologias assistivas são, por exemplo, brinquedos e roupas adaptadas, computadores e seus *softwares*, equipamentos de comunicação com aumento, chaves e acionadores especiais. Outro grande segmento engloba dispositivos para sentar e posicionar, adaptações para automóveis, próteses e órteses entre outros (SETEC et al., 2009). Na categoria dos deficientes auditivos existem diversas tecnologias assistivas no mercado atual. Dentre elas encontram-se implantes cocleares, aparelhos de ouvido para amplificação/melhoramento do som, sinalizadores visuais ou táteis e etc. Esses últimos tem um grande nicho de mercado na área residencial, que será explorado nesse trabalho.

2.2 SISTEMA AUDITIVO E A DEFICIÊNCIA

Segundo informações do National Institute of Health (NIH), o ato de se ouvir um som depende de uma série de eventos, os quais transformam ondas sonoras disponíveis no ar em pulsos elétricos. Uma vez capturado, esse sinal é transmitido pelo nervo auditivo para o cérebro (NIDCD, 2016). A Figura 1 apresenta os principais elementos do sistema auditivo.

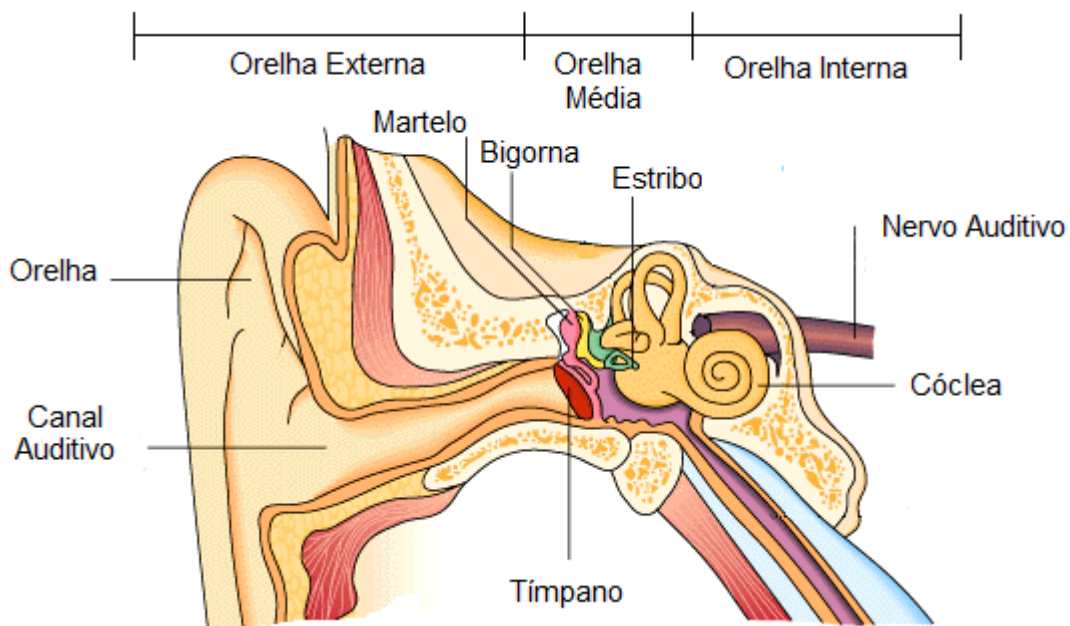


Figura 1 – Representação do sistema auditivo humano.

Fonte: Adaptado de Neto (2011).

Apesar de envolver estruturas complexas, o processo auditivo como um todo pode ser dividido nos seguintes passos (adaptado de NIDCD, 2016):

1. Ondas sonoras entram na orelha e viajam através de uma passagem chamada canal auditivo, que as leva ao tímpano.
2. O tímpano é uma fina membrana que vibra com a passagem das ondas sonoras. Essas vibrações são transmitidas fisicamente para três pequenos ossos (martelo, estribo e bigórnia).
3. Esses ossos vibram em sintonia com o sinal de entrada e transmitem a vibração para fluídos internos à cóclea, mecanismo na forma de concha. Uma estrutura elástica chamada membrana basilar sustenta toda a base da cóclea e é capaz de perceber os pequenos movimentos da mesma, devido as vibrações fluídicas.

4. Pequenos filamentos de cabelo sensíveis ao movimento, localizados entre a membrana basilar e a cóclea, são curvados e movimentados, o que os faz colidir entre si.
5. As colisões abrem pequenos poros em regiões microscópicas situadas na ponta destes filamentos, que liberam reagentes químicos e geram pulsos elétricos.
6. O nervo auditivo leva esses pulsos elétricos ao cérebro, que os interpreta como sons reconhecíveis.

A deficiência auditiva pode se manifestar em três formas diferentes: condutiva, sensorio-neural e central. A primeira ocorre quando há um dano ou má formação na orelha externa ou média orelha, que interfere com a passagem do som para as estruturas da orelha interna. Pode ser causada por excesso de cera de ouvido, infecções, furo no tímpano, acúmulo de líquidos, entre outros fatores (HEAR, 2016).

A deficiência sensorio-neural afeta diretamente a cóclea e/ou o nervo auditivo, o que os torna incapazes de enviar o sinal elétrico preciso ao cérebro. Ela pode ser causada por fatores genéticos ou pelo envelhecimento, além de acidentes e exposição à sons muito altos. Tecnologias como implantes cocleares e aparelhos auditivos podem reduzir seus efeitos, no entanto, esta deficiência é quase sempre permanente. Por fim, a deficiência central ocorre quando o cérebro não é capaz de converter a informação proveniente do nervo auditivo em sons reconhecíveis (HEAR, 2016).

2.3 ENGENHARIA DE REABILITAÇÃO

A engenharia de reabilitação é uma área do conhecimento que visa unir engenheiros, técnicos e profissionais da saúde em torno do projeto, desenvolvimento e suporte de tecnologias assistivas. As atividades da engenharia de reabilitação são: invenção, investigação e desenvolvimento, avaliação, produção e marketing, seleção de tecnologia, prestação de serviços, instruções de uso, manutenção e reparação de equipamento de reabilitação (CERTIC, 2010).

A engenharia de reabilitação nasceu em um contexto pós-guerra, onde pessoas ditas “normais” retornavam amputadas e com graves lesões físicas e mentais. Familiares e amigos, impulsionados pelo desejo de contornar os problemas inerentes a tais lesões, lutaram pelo desenvolvimento de tratamentos fisioterápicos e tecnologias assistivas. Apesar disso, a área só cresceu significativamente depois de algumas décadas, sendo criada em 1978 a primeira associação de engenharia de reabilitação (RESNA) nos Estados Unidos (LUNA, 2009).

Atualmente, existem inúmeros estudos e técnicas sendo desenvolvidos na área de reabilitação para as mais variadas doenças e deficiências. Um trabalho essencial a ser realizado após cirurgias de implantes cocleares em deficientes auditivos, por exemplo, é a reabilitação do paciente. O processo inicia na ativação dos eletrodos e realização do mapeamento das funções cerebrais, e se estende por diversas sessões onde o paciente deve aprender a ouvir novamente. Tal ação requer a identificação e reconhecimento dos estímulos auditivos e a pronúncia correta de comandos de fala, motivo pelo qual o processo é acompanhado por terapeutas e audiologistas (HC-FMUSP, 2005).

2.4 RECONHECIMENTO SONORO

A primeira máquina capaz de reconhecer fala em algum grau significativo foi um brinquedo comercial chamado Radio Rex, desenvolvido na década de 1920. O brinquedo consistia um boneco de cachorro, preso a uma base metálica móvel, que ficava no interior de uma caixa. A base móvel era presa à caixa através de um imã elétrico, e lutava contra a força de uma mola que lhe empurrava para fora. Entre o imã elétrico e a bateria que o alimentava havia uma ponte composta de dois filamentos metálicos. Os filamentos eram sensíveis a uma frequência de 500 Hz, e vibravam ao som da palavra “Rex”, desenergizando o imã e empurrando o cachorro para fora (GOLD E MORGAN, 2001).

Apesar de muito simples, este brinquedo incorporou um fundamento principal de reconhecedores de fala por muitos anos: guardar a representação de uma característica única do som que se quer reconhecer e implementar um mecanismo capaz de reconhecê-la em um áudio. A próxima aplicação comercial desenvolvida na área ocorreu 30 anos mais tarde e consistiu em um reconhecedor de dígitos, capaz de reconhecer a pronúncia dos números 0 a 9 (GOLD E MORGAN, 2001).

O processo de reconhecimento de sons é estruturado em várias etapas. A primeira delas consiste da captura do sinal de áudio. Esta etapa é responsável pela conversão de uma grandeza física, como a onda sonora, em um sinal discreto e digital. Esta conversão é realizada por um microfone, que transforma a onda sonora $p(t)$ em um sinal elétrico $X_c(t)$. Depois, um amostrador recupera os valores de tensão deste sinal a cada T_c intervalos de tempo. Por fim, este valor analógico é quantificado em valores digitais por um conversor analógico-digital, que são armazenados em memória (BECHETTI E RICOTTI, 1999). A Figura 2 estrutura o processo de análise de sinais de um reconhecedor de sons.

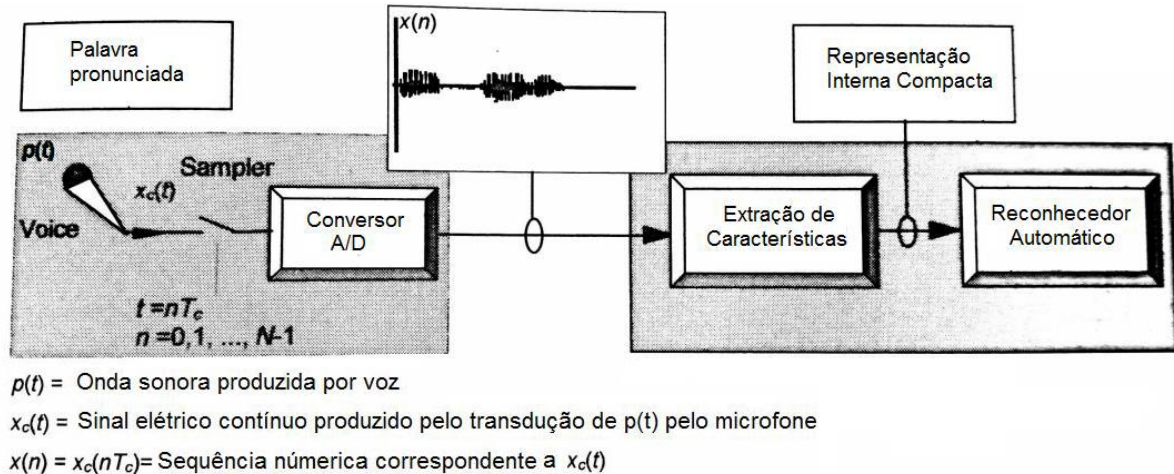


Figura 2 – Processo de análise sonora por um reconhecedor de fala.
Fonte: Adaptado de Bechetti e Ricotti (1999).

Com o sinal digital convertido, algoritmos podem ser aplicados para detectar características únicas ao mesmo, as quais são utilizadas pelo reconhecedor para classificar futuros eventos sonoros. A Transformada de Fourier (FT) é uma técnica conhecida que transforma um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. Ela possui uma implementação digital, chamada DFT (*Discrete Fourier Transform*), comumente utilizada para análise de sinais (HAQUE, 2012). Esta técnica gera o espectro de frequências do som capturado, que será a informação de entrada para etapa de extração de características. Além disso, uma técnica muito utilizada em conjunto com a DFT baseia-se no cálculo dos MFCCs (*Mel Frequency Cepstral Coefficients*). Ela provê uma representação mais compacta do espectro de frequências do sinal e leva em conta a percepção não linear de tons pelo ouvido humano (SUBRAMANIAN, 2004).

A extração de características, próxima etapa a ser executada, consiste em dois mecanismos: “o primeiro relacionado à extração de informações (padrões), que processa as características semelhantes e o segundo capaz de classificar as observações, dependendo das características extraídas previamente” (MELONI, 2009). Vários algoritmos de classificação são apresentados na literatura, dentre eles as Redes Neurais, os k vizinhos mais próximos ou K-NN (*K Nearest Neighbor*) e o modelo oculto de Markov ou HMM (*Hidden Markov Model*) são bem empregados para o reconhecimento de fala (GERHARD, 2003). Ao final desta etapa, um conjunto com as principais características do sinal de áudio é gerado e armazenado. É possível compará-lo com novos sinais de modo a se reconhecer outras ocorrências do sinal em estudo. A técnica de informar ao reconhecedor informações prévias do que se deseja reconhecer é conhecida como classificação supervisionada e capacita o mesmo a aprender sobre o problema proposto (MELONI, 2009).

2.5 TRABALHOS RELEVANTES

As tecnologias assistivas existentes para auxiliar deficientes auditivos a ter consciência de eventos de som que ocorrem ao seu redor não se restringem a aparelhos auditivos e implantes cocleares. Uma das tecnologias desenvolvidas consiste em aplicações para auxílio de conversas em grupo, como é o caso descrito por Kaneko et al. (2013), que através de pesquisas descobriu que pessoas com alto grau de surdez têm dificuldade para distinguir e compreender fontes de som simultâneas. E, portanto, para que possam compreender uma conversa, essas pessoas devem manter contato visual com a pessoa que está falando e usar leitura labial a fim de completar as lacunas de contexto geradas.

O problema disso é que em conversas em grupo o contato visual se torna cansativo, visto que pode se levar um tempo até a identificação espacial de outra fonte de fala, o que muitas vezes gera perda de informações para a pessoa deficiente. Na tentativa de solucionar isso, foi criada uma pulseira equipada com um display e sensores de áudio, que encontra a fonte de som mais relevante (próxima/ intensa) e informa sua posição ao usuário, iluminando LEDs na direção da mesma, como mostra a Figura 3.

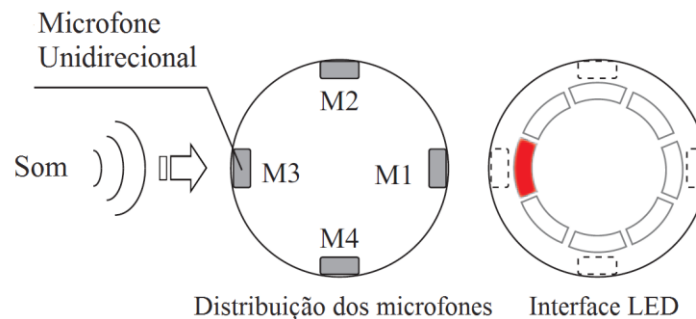


Figura 3 – Representação do dispositivo desenvolvido.

Fonte: Adaptado de Kaneko et al. (2013, p. 3569).

Outra aplicação desenvolvida por Qi e Que (2013) foi um sistema *wireless* de reconhecimento de fala e sinalização de eventos sonoros para deficientes auditivos, o qual utilizou unidades sensoras que capturavam sons e os reconheciam através de um módulo do tipo *System-on-Chip* (SOC). Essas unidades sensoras se comunicavam com um dispositivo central, que recebia essas informações e as repassava ao usuário através de um display. Outras funcionalidades inclusas no sistema desenvolvido eram a sinalização de eventos de áudio específicos como campainhas.

Existem, também, aplicações que não estão diretamente relacionadas a deficientes auditivos, mas que podem ser facilmente adaptadas. Uma delas é um sistema para reconhecimento de invasões domiciliares, descrito por Dibazar et al. (2011), que utiliza sensores sísmicos, vibratórios e microfones. Uma abordagem de projeto poderia utilizar o sistema de reconhecimento citado, devido ao seu alto grau de confiabilidade no reconhecimento de eventos. Outra aplicação que pode ser utilizada é um sistema de reconhecimento de áudio que leva em conta a possibilidade de diversos eventos de áudio simultâneos. A mesma pode ser utilizada para auxiliar na diferenciação de eventos relevantes para o usuário, no caso destes ocorrerem ao mesmo tempo (WANG et al., 2014).

Além disso, o setor de reconhecimento de fala tem sido fonte de inúmeras pesquisas, sendo possível encontrar aplicações embarcadas de reconhecimento de fala (SUTTON et al. 2014), estudos e comparação de algoritmos de reconhecimento (SHAUKAT et al., 2014), modelagens híbridas (SEHILI et al., 2012) e até mesmo projetos de SoCs completos com módulos de aquisição e reconhecimento de áudio (GENG et al., 2012).

Por fim, seguindo o enfoque desse trabalho, Yoo e Yook (2008) apresentam um sistema de reconhecimento de eventos de som relevantes em ambientes residenciais com 98,9% de acurácia para rejeição de ruído e 92,8% de acurácia para reconhecimento de múltiplos sons simultâneos. Outro diferencial dessa aplicação é a mobilidade que a mesma permite ao usuário, tendo em vista que o dispositivo que informa os dados é *wearable*, ou seja, pode ser usado junto ao corpo como um acessório, conforme ilustra a Figura 4.

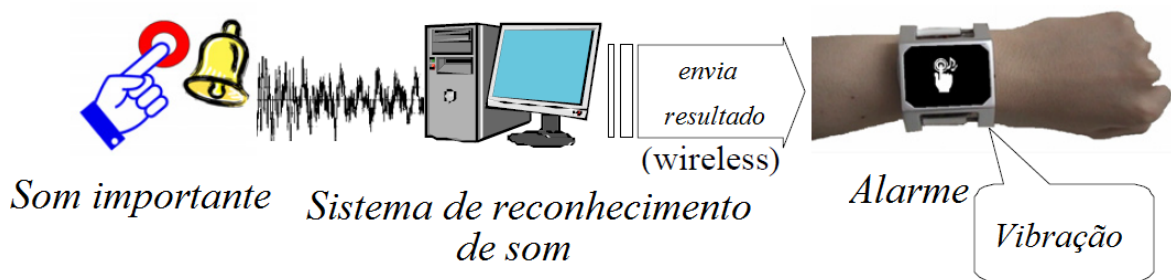


Figura 4 – Sistema wireless de reconhecimento de sons.
Fonte: Adaptado de Yoo e Yook (2008, p. 1)

A figura acima apresenta em alto nível as etapas de funcionamento do sistema. Um evento sonoro é detectado, essa informação é analisada por um computador que determina se o mesmo corresponde a um evento relevante, em caso afirmativo o resultado é enviado para um dispositivo na forma de pulseira utilizando comunicação sem fio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Conforme comentado ao longo do texto, esse trabalho propõe um sistema sem fio de sinalização de eventos sonoros relevantes para pessoas com deficiência auditiva. O sistema desenvolvido consiste em um conjunto de dispositivos com funções específicas. Estes dispositivos são responsáveis por adquirir, processar, reconhecer e informar ao usuário sobre a ocorrência de eventos sonoros. Neste Capítulo são apresentados os dispositivos físicos utilizados, bem como a metodologia de projeto adotada. A Figura 5 ilustra a solução desenvolvida. Foram projetados dois dispositivos principais: as estações sensoras e o dispositivo concentrador. Uma mesma estação sensora pode reconhecer mais de um tipo de evento sonoro.

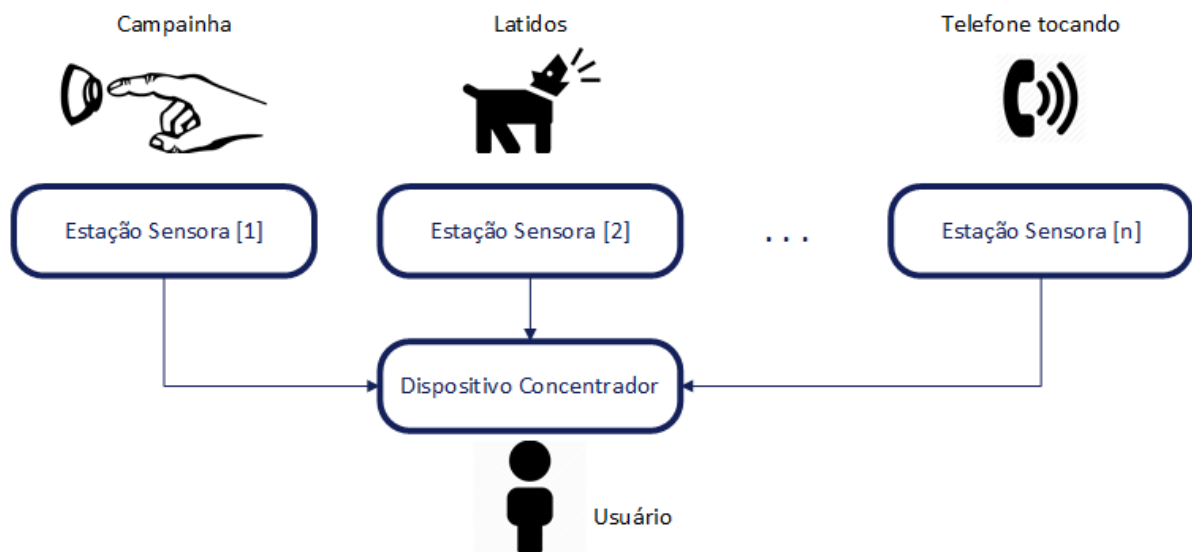


Figura 5 – Diagrama de blocos do sistema proposto

As estações sensoras são responsáveis pela aquisição e reconhecimento dos sons e, portanto, devem ser dispostas em locais estratégicos da residência, próximas das fontes de som que se deseja monitorar. Para que sejam reconhecidos, os eventos sonoros devem ser cadastrados previamente. Dessa forma, é disponibilizada uma interface homem-máquina que possibilita ao usuário realizar tal ação. Quando um evento é detectado, a estação sensora vinculada a ele envia essa informação para o dispositivo concentrador. O usuário, que carrega esse dispositivo consigo, é avisado por ele assim que um evento cadastrado ocorre.

3.2 MATERIAIS

Esta seção apresenta os principais materiais utilizados para concepção do sistema, explicando resumidamente a sua utilização e justificando a escolha realizada. Os dispositivos desenvolvidos possuem microcontroladores como suas unidades de processamento central e utilizam de módulos de rádio frequência para enviar/receber pacotes de dados sem a necessidade de comunicação cabeada. Diagramas de blocos contendo os componentes e sua interligação são apresentados mais adiante

3.2.1 Módulo de Rádio Frequência

Segundo a Anatel (2008), o módulo de rádio frequência (RF) é um dispositivo transceptor que recebe e envia sinais de radiofrequências. O mercado atual possui várias alternativas para módulos RF, no entanto, cada um é mais apropriado para uma determinada aplicação. Por esta razão, foi realizada uma pesquisa e elencaram-se as características principais dos módulos RF mais utilizados, conforme mostra a Tabela 2. Mais detalhes referentes à pesquisa podem ser visualizados no Apêndice 2 deste trabalho.

Tabela 2 – Comparativo dos módulos de rádio frequência mais utilizados

Nome	Fabricante	Banda de Operação	Potência	Sensibilidade	Taxa de bits	Alcance	Preço Médio (US\$)
nRF24L01+	Nordic	2.4 GHz	18 dBm	-94 dBm	250 kbps – 2 Mbps	50 m	8,71
xBee PRO 900	SparkFun	900 MHz	17 dBm	-100 dBm	156 kbps	3 Km	64,95
xBee 1mW	SparkFun	2.4 GHz	0 dBm	-92 dBm	250 kbps	100 m	29,65
SPBT2632C1A	ST	2.4 GHz	10 dBm	-90 dBm	560 kbps	60 m	30,16
HC-06	Vários	2.4 GHz	6 dBm	-80 dBm	2-3 Mbps	10 m	5,73
RFM92	Hope	868-915 MHz	20 dBm	-136 dBm	300 kbps	2 Km	14,35
RFM96	Hope	433 MHz	20 dBm	-148 dBm	300 kbps	2 Km	16,87

Para escolher corretamente qual módulo RF utilizar é necessário entender qual a contribuição de cada característica em seu desempenho. A banda de operação indica a faixa de valores de frequência das ondas eletromagnéticas emitidas e recebidas pelo módulo. A normatização para alocação de bandas de operação é feita pela *International Telecommunication Union* (ITU, 2015). As principais bandas para livre utilização homologadas no Brasil são: 433MHz, 900MHz e 2.4 GHz, as quais são usadas principalmente em localização terrestre via satélite, radioamadorismo, telecomunicação e telefonia (ANATEL, 2015). Apesar de serem consideradas livres, existem limitações de uso, como por exemplo a potência de transmissão (ANATEL, 2008).

A velocidade de transmissão de dados nada mais é do que a taxa com a qual os dados podem ser enviados ou recebidos pelo módulo RF. Além disso, o alcance representa a distância máxima permitida na qual é possível se estabelecer uma comunicação aceitável. É importante ressaltar que o alcance informado pelos fabricantes é geralmente obtido em condições ideais, ou seja, ambiente aberto e sem interferências.

A potência de um módulo RF é a quantidade de energia existente em um sinal modulado pelo mesmo. Para fins de simplificação, os atributos potência são geralmente expressos em decibel-miliwatt (dBm). O decibel é uma unidade logarítmica que representa a relação de potência do sistema por alguma referência, nesse caso 1 miliwatt. Como a escala não é linear, duas medidas comuns são apresentadas: um aumento de 3 dBm dobra a potência e um aumento 10 dBm multiplica a potência por um fator de 10 (B&B ELETRONICS, 2009).

A sensibilidade indica quão fraco um sinal de entrada pode ser para que ainda possa ser reconhecido com sucesso. Ela também é usualmente medida em dBm e, portanto, segue a mesma lógica logarítmica. Sendo assim, quanto maior o valor absoluto, melhor a sensibilidade de recepção do módulo (B&B ELETRONICS, 2009).

O sistema proposto é focado em ambientes fechados e, portanto, demanda um módulo RF apropriado. Como estudos sugerem, a qualidade do sinal depende muito de fatores ambientais, como móveis, espessura da parede, quantidade de andares e etc (DIGI, 2012). O sinal emitido sofre perdas cada vez que se depara com um desses obstáculos. Desta forma, o módulo RF deve possuir sensibilidade suficiente para captar sinais fracos (LAIRD, 2012).

A frequência de operação influencia no alcance e na capacidade do sinal de superar obstáculos. Quanto maior a frequência, menor será o alcance e maiores serão as perdas sofridas pelo sinal. Por exemplo, um sinal a 2.4 GHz possui 8.5 dB de perda adicional comparado com o mesmo sinal a 900 MHz. No entanto, menores frequências requerem antenas maiores para manter o mesmo ganho no sinal (B&B ELECTRONICS, 2009).

Os módulos de RF que mais se adequam ao sistema proposto são o RFM92 e o RFM96, devido à sua alta potência e grande sensibilidade. No entanto, analisando-se a complexidade envolvida na implementação de *drivers* para o microcontrolador escolhido, conclui-se que tal atividade pode gerar alto dispêndio de tempo e risco de comprometer o cronograma do projeto. Dessa forma, uma terceira opção é o módulo nRF24L01+, que apresenta sensibilidade menor, porém é mais barato e possui extensa documentação online. O sistema de localização para ambientes fechados, desenvolvido por Xiaojun (2015), utiliza este módulo em seu funcionamento. Tal estudo sugere que o módulo possui desempenho e alcance aceitáveis considerando o escopo residencial. A Figura 6 apresenta o módulo escolhido.

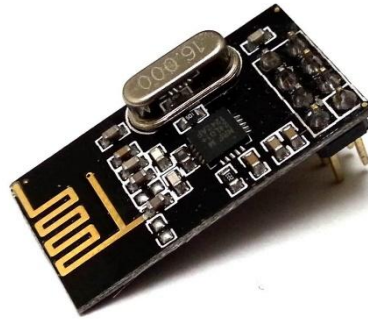


Figura 6 – Módulo de rádio frequência nRF24L01+
Fonte: DealExtreme (2016).

3.2.2 Microcontrolador

O microcontrolador a ser utilizado será o MSP432P401R da *Texas Instruments*. O qual conta com processador ARM 32-Bits Cortex M4, com unidade de ponto flutuante, frequência de operação de até 48 MHz e vasta quantidade de memória *flash* de programa (256 KB). São disponibilizados 4 temporizadores de 16-Bit, cada um com 5 canais e 2 timers 32-Bits, com capacidade de geração de interrupção. Este microcontrolador possui suporte para comunicação UART, SPI e I²C, conversor analógico-digital de 14 Bits e vários modos de economia de energia. Além disso, seu kit de desenvolvimento *Launchpad* fornece 48 portas de entrada/saída de propósito geral, conforme mostra a Figura 7 (TEXAS INSTRUMENTS, 2015).

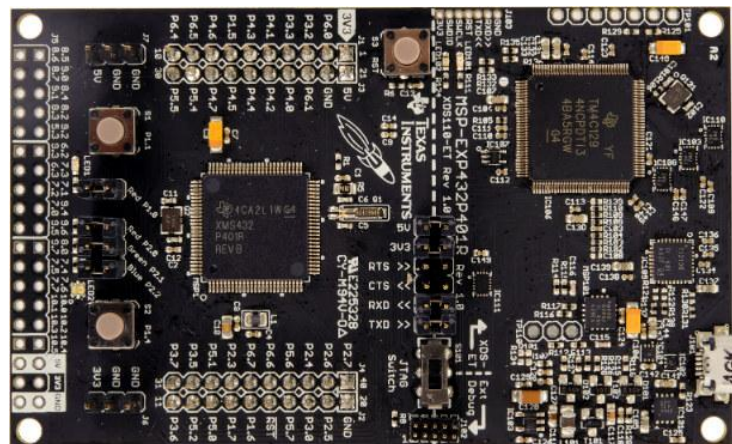


Figura 7 – Kit LaunchPad MSP432P401R.
Fonte: Texas Instruments (2015).

3.2.3 Módulo de Reconhecimento de Sons

O módulo de reconhecimento de fala utilizado é um sistema computacional embarcado que faz uso de algoritmos para reconhecer sons previamente cadastrados.

Assim como o módulo RF, ele também possui algumas opções no mercado. Os módulos mais utilizados atualmente são o EasyVR 3.0, VR3 e HM2007. As características principais desses módulos são a quantidade de comandos de voz aceitos (20 a 80 comandos), o tempo máximo permitido de cada comando e se os mesmos são *Speaker Independent*, ou seja, se podem ser reconhecidos quando falados por outros usuários, além do que os cadastrou.

Este trabalho utiliza o módulo VR3, fabricado pela Elehouse, o qual permite até 80 comandos de voz *Speaker Dependent*, ou seja, comandos que só são reconhecidos quando falados pela mesma pessoa que os cadastrou. O VR3 é operado através de portas I/O utilizando comunicação UART e pode ser alimentado com 5V (CHEN, 2014). A Figura 8 apresenta o módulo descrito, que será detalhado na seção 4.3.

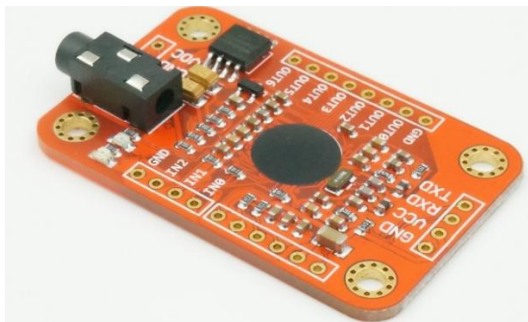


Figura 8 – Módulo de reconhecimento de fala VR3.
Fonte: Elehouse (2014).

3.3 MÉTODOS

Esta seção visa apresentar o projeto e modelagem do sistema desenvolvido, bem como seu escopo e particularidades. O desenvolvimento desse projeto pode ser dividido superficialmente em três etapas: a criação das estações sensoras, projeto e confecção de um dispositivo concentrador e o estabelecimento da comunicação *wireless* entre ambos. Os procedimentos específicos de cada etapa podem ser conferidos a seguir.

3.3.1 Desenvolvimento das estações sensoras

Nessa etapa são definidos quais os eventos de som que fazem parte do escopo do projeto. Na sequência, é realizada a aquisição e processamento dessas informações utilizando um módulo reconhecedor de fala, e por fim um microcontrolador faz o processamento lógico de criação, armazenamento e envio de pacotes de dados que indicam a ocorrência de um evento de som. A Figura 9 apresenta os componentes principais de uma estação sensora.

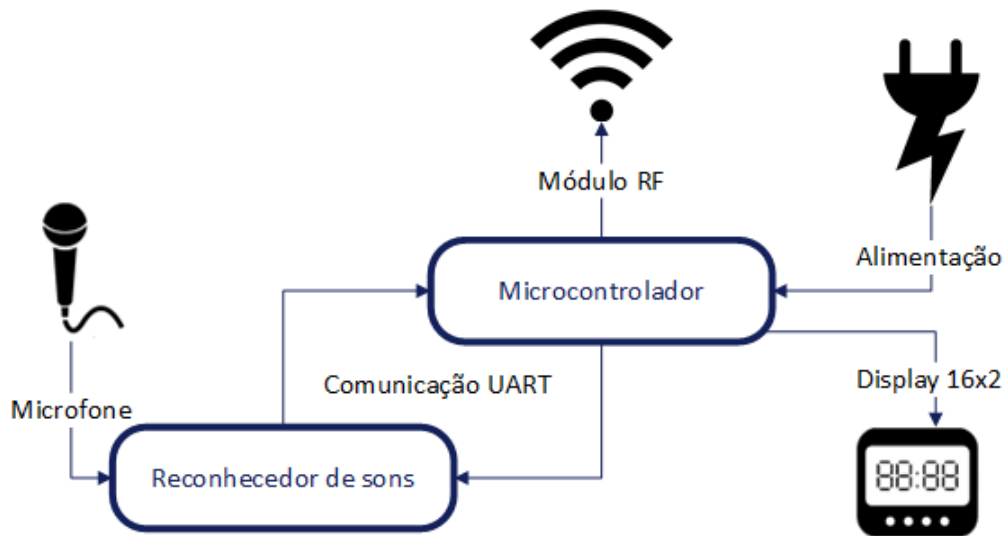


Figura 9 – Diagrama em blocos de uma estação sensora

A captura do áudio é realizada pelo microfone e transmitida ao módulo reconhecedor de sons que é operado através de um microcontrolador, utilizando interface de comunicação UART. O microfone utilizado é o EM9745P-382, fabricado pela Horn. Esse microfone é omnidirecional, ou seja, consegue captar sons vindos de qualquer direção. A distância recomendada do emissor até o módulo VR3, para reconhecimento satisfatório dos eventos sonoros é de 60 cm. Isso permite uma área de cobertura de 1,2 metros de diâmetro.

Para a definição de quais eventos sonoros fariam parte do escopo deste projeto, foi realizada uma bateria de testes iniciais utilizando-se o módulo VR3. O objetivo era definir a acurácia do módulo para o reconhecimento dos sons de diversas categoria relevantes a deficientes auditivos. Para cada categoria de sons, 3 áudios foram selecionados. O teste foi composto por 5 rodadas, cada uma com 10 tentativas de reconhecimento para cada áudio. Por fim, foi calculado o percentual de acertos total para cada categoria, não se utilizando de parâmetros como a validação cruzada. O teste baseou-se no cadastro e reconhecimento de três arquivos de sons diferentes para cada categoria da Tabela 3.

Tabela 3 – Testes realizados para definir o escopo de sons

Categoria	Tentativa 1	Tentativa 2	Tentativa 3	Tentativa 4	Tentativa 5	Total Percentual
Batidas na porta	83,34%	86,67%	80%	86,67%	83,34%	84%
Latidos	80%	63,34%	80%	80%	76,67%	76%
Alarmes (incêndio, carro, fumaça)	83,34%	93,34%	90%	100%	90%	91,34%
Timer de micro-ondas	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Vidro quebrando	50%	40%	43,34%	43,34%	40%	43,34%
Campainha	83,34%	93,34%	86,67%	86,67%	80%	86%

Analisando-se os resultados obtidos foi possível notar que o módulo tem uma resposta aceitável para as seguintes categorias: batidas na porta, latidos caninos, alarmes gerais e campainhas. Sons que obedecem a um formato padrão de repetições, como alarmes e campainhas são facilmente reconhecidos. As categorias de *timer* de micro-ondas e vidros quebrando tiveram desempenho menor devido à natureza abrupta de seus sons. No caso dos vidros, apenas dois dos três arquivos de áudio foram cadastrados com sucesso. Além disso, o módulo não foi capaz de reconhecer os arquivos referentes a *timer*, o qual se resume basicamente um bipe forte. Dessa forma, o escopo de eventos sonoros pensado inicialmente foi reduzido, excluindo-se as duas categorias com baixo desempenho.

3.3.2 Estrutura lógica do sistema

O *software* embarcado que determina o funcionamento do sistema é baseado em uma máquina de estados principal, através da qual rotinas são disparadas de acordo com as interações do usuário. A Figura 10 a seguir apresenta a máquina de estados das estações sensoras.

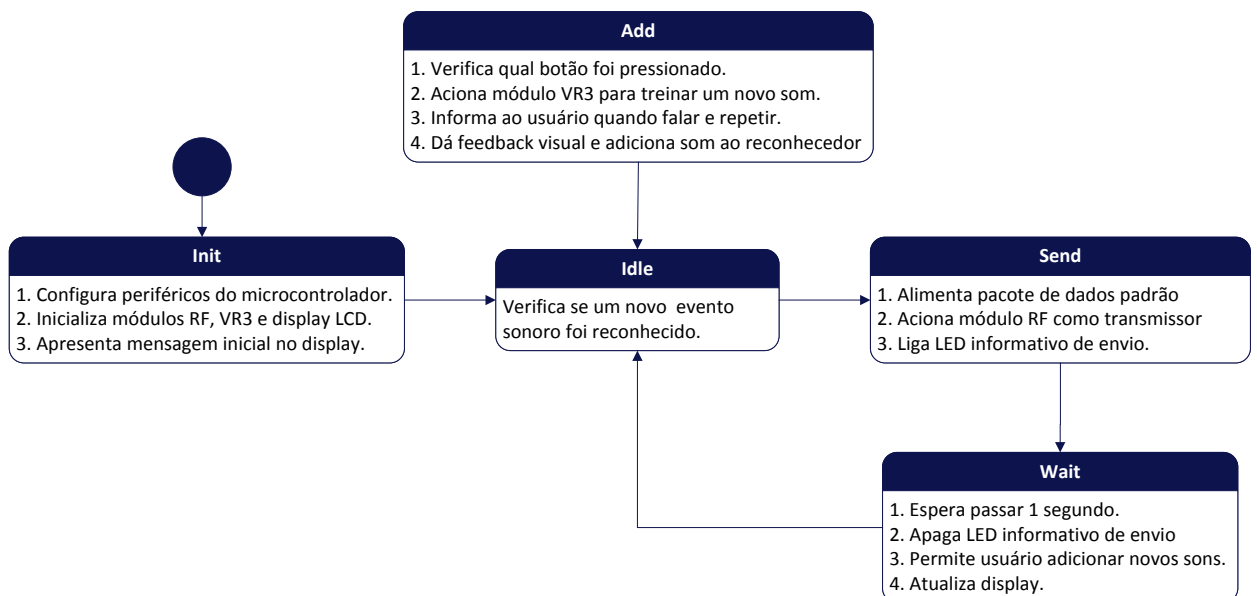


Figura 10 – Máquina de estados da estação sensora

A máquina de estados inicia no estado Init e, uma vez que configurou e garantiu o correto funcionamento dos módulos externos (RF, VR3 e display LCD), a máquina de estados avança para o estado Idle. Este estado será executado pela maior parte do tempo e compreende a constante verificação de um buffer, através do qual o módulo VR3 informa à aplicação o reconhecimento de um novo evento sonoro.

Quando houver um reconhecimento sonoro, a máquina de estados avança para o estado Send, no qual um pacote de dados a ser definido mais adiante é atualizado com a informação de qual evento foi reconhecido. O módulo de rádio-frequência é acionado e transmite essa informação para o dispositivo concentrador. Um LED informativo de envio é aceso por 1 segundo e a máquina retorna ao estado Idle.

Devido a uma restrição de *hardware* do módulo VR3, os eventos sonoros devem ser gravados pelo usuário em uma primeira utilização do sistema. Dessa forma, a qualquer momento o usuário pode adicionar um novo evento sonoro através de botões, direcionando a máquina para o estado Add. Ao pressionar um botão, o *display* de LCD é atualizado e informa ao usuário quando deve começar a falar. O módulo VR3 é acionado e inicia sua rotina de gravação de sons.

Como o *streaming* de áudio recebido pelo módulo está susceptível a ruídos, algumas vezes seu algoritmo reconhecedor falha na criação do modelo lógico que representará o som gravado. Dessa forma, foi criado um mecanismo de repetição, que permite ao usuário realizar diversas tentativas de gravação de evento sonoro por um intervalo de tempo de 8 segundos. Se o reconhecedor obtiver sucesso em alguma delas, ou se esse tempo se esgotar, o usuário é notificado textualmente através do *display* de LCD.

3.3.3 *Display* LCD 16x2

O *display* de LCD utilizado neste trabalho é o modelo JHD 162A, o qual possui 2 linhas com 16 caracteres para apresentar informação textual. Na Figura 11 a seguir é possível visualizar a interface na qual são exibidos os caracteres, além dos seus 16 pinos de IO, utilizados para alimentá-lo e possibilitar sua comunicação com um dispositivo operador.

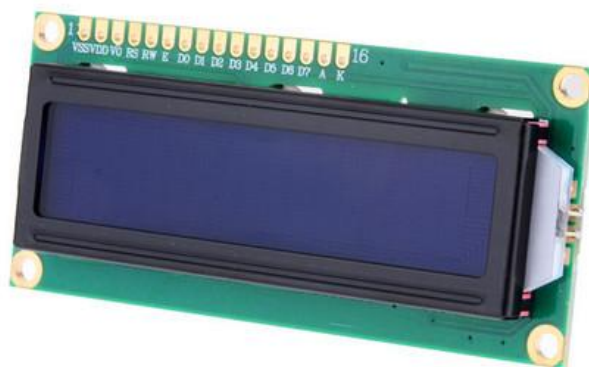


Figura 11 – *Display* LCD 16x2
Fonte: Thomsen, 2011

Os pinos VSS e VDD fornecem a alimentação e são conectados a +5V e GND, respectivamente. O pino Vo é conectado a um potenciômetro externo e é utilizado para regular o contraste. O *display* possui ainda 3 pinos de controle, um deles é o Chip Select, utilizado para habilitar ou desabilitar operações sobre o módulo. Outro é o R/W, utilizado para informar se será efetuada uma operação de leitura ou de escrita (1 – leitura | 0 – escrita). E o último é o RS, utilizado para informar se a operação de leitura/escrita será feita sobre um dado ou uma instrução (1 – dado | 0 – instrução).

Além disso, são disponibilizados 8 pinos que funcionam como barramento de dados e transmitem ao circuito interno do *display* 8 bits de dados a serem convertidos em caracteres. Por fim, alguns *displays* possuem um LED de *backlight*, usado para possibilitar leitura em ambientes escuros. Os pinos A e K correspondem ao anodo e catodo deste LED, respectivamente.

Os módulos LCD são projetados para conectar-se com grande parte dos microcontroladores disponíveis no mercado, bastando-se apenas enviar instruções válidas pelo barramento de dados e respeitar suas temporizações de leitura e escrita. A Tabela 4 a seguir apresenta algumas instruções utilizadas para se comunicar com o *display*. É mostrado também o comportamento de cada bit do barramento de dados, a finalidade da operação e a temporização necessária para o módulo processá-la.

Tabela 4 – Principais instruções *display* LCD 16x2

Instrução	RS	RW	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Descrição	Tempo
Limpa <i>display</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Limpa todo o <i>display</i> e retorna cursor para a primeira posição da primeira linha	1.6mS
Controle do <i>display</i>	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Liga (D=1) ou desliga (D=0) o <i>display</i> Liga (C=1) ou desliga (C=0) o cursor Cursor piscante (B =1) se C =1	40uS
Escreve dado na memória	0	1	Dado a ser gravado no LCD								Grava obyte presente nos pinos de dados no local apontado pelo contador de endereços	40uS
Lê dado da memória	1	1	Dado a ser lido do módulo								Lê o byte apontado pelo contador de endereços	40uS

Barbacena e Fleury (1996) desenvolveram um manual em Português que explica o funcionamento geral de um módulo de *display* e como operá-lo. Este manual foi muito útil para a implementação do *driver* do *display* 16x2. Maiores informações a respeito de modelos de *displays* LCD, especificações técnicas, instruções aceitas e como utilizá-las adequadamente, podem ser encontradas no manual acima citado.

A escolha de se utilizar um *display* de LCD passou por um estudo de viabilidade, pois incrementaria o custo final do produto. Uma outra forma de comunicação com o usuário comumente utilizada, se baseia no uso de LEDs para indicar a ocorrência ou não de determinado

evento. Dessa forma, as duas alternativas foram comparadas entre si do ponto de vista financeiro, quanto a sua dificuldade de implementação e sua influência em usabilidade e satisfação de usuário.

O módulo de *display* utilizado nas estações sensoras custa em média U\$ 2.40 contra cerca de U\$ 0.15 dólares de cada LED de 3mm (ver Apêndice 3). Do ponto de vista financeiro, não há dúvidas quanto ao benefício de se utilizar a segunda opção. No entanto, o uso do *display* LCD impacta diretamente na qualidade da interação que o usuário terá com o sistema, já que possibilita maiores detalhes nas informações repassadas. Além disso, considerando o uso de LEDs, é provável que o usuário fosse necessitar manual para entender o que estava sendo indicado a cada instante. Por fim, acredita-se que um sistema cujo propósito é melhorar a qualidade de vida do usuário, deve ser projetado para tal em todos os aspectos de seu desenvolvimento, dessa forma optou-se pelo uso do módulo de *display* LCD apresentado anteriormente.

3.3.4 Módulo VR3

O módulo VR3 foi desenvolvido com o intuito de ser um *shield* (complemento) para uma aplicação mais complexa. Dessa forma, o mesmo apresenta um protocolo de comunicação proprietário, que contém comandos básicos para controlar as placas VR3 (CHEN, 2014). Todos os comandos interpretados por ele são enviados através da interface serial e correspondem a valores hexadecimais. Além disso, o módulo responde com constantes pré-definidas que indicam se a operação desejada foi realizada com sucesso ou qual problema foi encontrado. A seguir é apresentado o formato padrão de mensagem deste protocolo.

| Início (0xAA) | Tamanho da mensagem | Comando | Mensagem | Fim (0x0A) |

A Listagem 1 apresenta um trecho do arquivo de constantes escrito em linguagem C, utilizado para programar o módulo. Com essas informações é possível controlar o módulo VR3 e executar diversas operações. Entre elas pode-se: treinar um novo evento sonoro, setar ou não uma assinatura textual para o mesmo, carregá-lo no banco de dados do algoritmo de reconhecimento, além de setar configurações básicas de funcionamento e realizar verificações de integridade no módulo e sons cadastrados.

```
#define FRAME_HEAD          (0xAA) //Início de mensagem
#define FRAME_END          (0x0A) //Fim de mensagem
```

```

#define FRAME_CMD_CHECK_SYSTEM      (0x00) //Verifica as configs do sistema
#define FRAME_CMD_CHECK_BSR        (0x01) //Verifica se existem sons no reconhecedor
#define FRAME_CMD_CHECK_TRAIN      (0x02) //Verifica se o som foi treinado c. sucesso
#define FRAME_CMD_CHECK_SIG        (0x03) //Verifica a assinatura de um evento sonoro

#define FRAME_CMD_RESET_DEFAULT    (0x10) //Configuração padrão
#define FRAME_CMD_SET_BR           (0x11) //veloc. de comunic. módulo <-> aplicação
#define FRAME_CMD_SET_IOM         (0x12) //Modo de IO (Pulse| Toogle| Clear| Set)
#define FRAME_CMD_SET_PW          (0x13) //Largura de pulso IO
#define FRAME_CMD_RESET_IO        (0x14) //Pino de reset modulo->aplicação
#define FRAME_CMD_SET_AL          (0x15) //Carregamento automatico de sons

#define FRAME_CMD_TRAIN            (0x20) //Comando para treinar
#define FRAME_CMD_SIG_TRAIN        (0x21) //Comando para treinar com assinatura
#define FRAME_CMD_SET_SIG          (0x22) //Comando para setar assinatura

#define FRAME_CMD_LOAD             (0x30) //Comando para carregar N sons
#define FRAME_CMD_CLEAR            (0x31) //Comando para limpar o reconhecedor

#define FRAME_CMD_VR               (0x0D) //Informação de evento sonoro reconhecido
#define FRAME_CMD_ERROR            (0xFF) //Informação de erro

```

Listagem 1 – Arquivo de constantes VR3.

Fonte: Elechouse, 2014.

Como um exemplo, apresenta-se na Figura 12, a mensagem enviada ao módulo para iniciar uma rotina de treino de um novo evento sonoro.

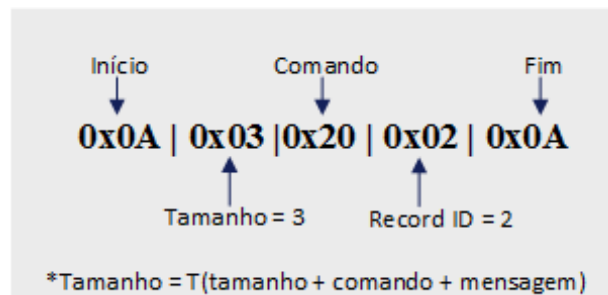


Figura 12 – Mensagem para iniciar sequência de treino do Record 2

O módulo VR3 é conectado fisicamente ao microcontrolador através dos pinos de GND, VCC, RX e TX, sendo TX e RX os pinos responsáveis pelo envio e recebimento de informações por parte do módulo, respectivamente.

3.3.5 Desenvolvimento do dispositivo concentrador

O próximo passo foi definir o dispositivo que informa ao usuário os dados coletados pelas estações sensoras. O dispositivo concentrador é um *gadget* carregável pelo usuário e, portanto, deve ser leve e pequeno. Sua função é avisar o usuário do acontecimento de um evento de som cadastrado e indicar a natureza do evento. A Figura 13 apresenta a solução proposta.

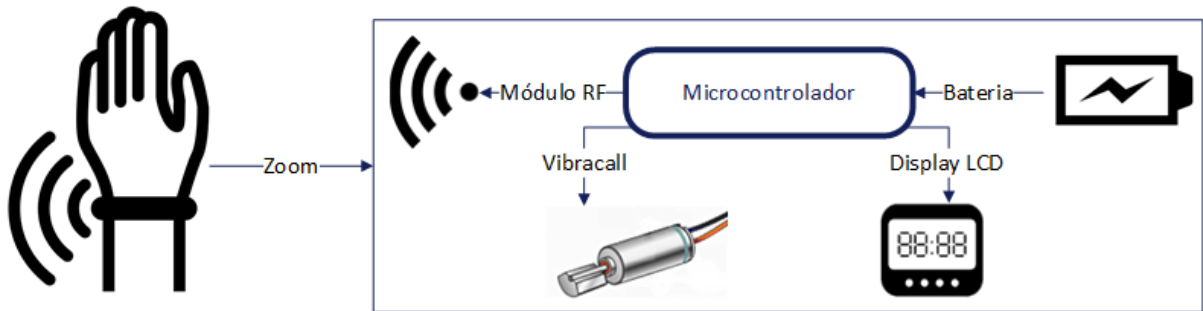


Figura 13 – Diagrama em blocos do dispositivo concentrador

Quando uma informação é recebida rotinas do sistema fazem sua inserção em uma fila de controle e a sua apresentação no display LCD, bem como a ativação temporária do *vibracall* para chamar a atenção do usuário. A fila de controle é um mecanismo lógico utilizado para tratar os casos onde dois ou mais eventos de som ocorrem simultaneamente.

3.3.6 Consumo de energia

Uma das principais dificuldades no projeto de *wereables* está em encontrar formas de prover energia o suficiente para os dispositivos funcionarem por uma quantidade razoável de tempo, sem necessitar de uma bateria maior (SCHUMACHER, 2014). Assim, esforços foram feitos para diminuir o consumo de energia dos dispositivos. A escolha do módulo de rádio-frequência e do *display* utilizados é um fator impactante no consumo de energia do dispositivo concentrador. Felizmente o módulo nRF24L01+ foi desenvolvido especificamente para aplicações de baixo consumo energético, consumindo cerca de 26uA em modo StandBy-I e 900nA em modo PowerDown (NORDIC, 2008). A máquina de estados implementada permitiu manter o módulo RF em modo StandBy-I pela maior parte do tempo.

Outro fator levado em consideração neste projeto foi o consumo energético do microcontrolador. Segundo o fabricante, o Kit Launchpad MSP432 consome 80uA/MHz enquanto ativo. Como o sistema implementado roda a uma frequência de 12MHz, ele tem um consumo de 960uA. Porém, uma alternativa que o fabricante disponibiliza para reduzir o gasto energético é o uso de modos LPM (*Low Power Modes*). Ao todo são 5 modos LPM, cada qual com suas vantagens e restrições de periféricos. O *display* LCD utilizado nas estações sensoras consome 1.5mA (VISHAY, 2002). Portanto, optou-se por utilizar o *display* Sharp 96x96, desenvolvido para aplicações de baixo consumo energético. Seu consumo depende da quantidade de vezes que a tela é atualizada, em outras palavras, se a taxa de atualização da tela for de 1Hz, o *display* terá um consumo de 4uA.

A máquina de estados do dispositivo concentrador funciona mantendo o microcontrolador em modo LPM3 pela maior parte do tempo, voltando a modo ativo apenas ao receber novos dados de uma estação sensora. O modo LPM3 reduz o consumo da CPU para 750nA/MHz, totalizando um consumo de 9uA, se a CPU for mantida sempre neste modo. O uso destas funcionalidades no módulo RF e no microcontrolador tem sua significância no controle de gasto energético. Contudo, o maior consumo é decorrente do uso de um *display* LCD e do *vibracall*. O motor DC *vibracall* consome 105mA (PRECISION, 2016) quando acionado. Dessa forma, a única saída é reduzir ao máximo o tempo em que ele permanece ativo. A aplicação desenvolvida liga o *vibracall* por períodos de 400ms, toda vez que um novo som é reconhecido.

3.3.7 Kit BoosterPack Sharp 96x96

O *display* Sharp 96x96 pode ser encontrado à venda avulso ou acoplado em pequenas PCIs, que tornam mais fácil o acesso aos seus terminais. A Texas Instruments possui uma PCI com este *display* e um módulo *touch* capacitivo, desenvolvida para ser utilizada como um *shield* para seus kits de desenvolvimento. O kit BoosterPack Sharp96x96 é um *shield* que pode ser acoplado ao microcontrolador MSP432. Optou-se por utilizar esse kit devido a sua fácil integração ao microcontrolador. A Figura 14 mostra o kit Boosterpack em questão, onde é possível visualizar o *display* Sharp conectado a uma placa de circuito impresso (PCI) através de um cabo flat, sua interface padrão de saída. A PCI conta com regiões sensíveis ao toque demarcadas de um 1 a 4. Na parte traseira (não visível) do kit, encontram-se os conectores para encaixe no Kit Launchpad sendo utilizado.



Figura 14 – Kit Boosterpack Sharp 96x96
Fonte: Texas Instruments, 2016.

3.3.8 Comunicação *Wireless*

Como foi comentado anteriormente, o módulo de rádio-frequência utilizado neste projeto é o nRF24L01+. Este módulo possui um chip receptor/transmissor de dados, que opera na faixa de 2.4 GHz e possui um protocolo de rede embarcado (Enhanced ShockBusrt), apropriado para aplicações *wireless* com baixo consumo de energia (NORDIC, 2008). É possível configurá-lo para transmitir dados em diferentes taxas (250kbps, 1Mbps e 2Mbps) e com diferentes potências de saída para o sinal modulado (0, -6, -12 ou -18dBm). Tais parâmetros afetam diretamente o alcance e a sensibilidade do módulo e devem ser modificados de acordo com a aplicação. O módulo pode ser alimentado com valores de tensão na faixa de 1.9V a 3.6V e aceita sinais de entrada de 5V.

A operação do módulo nRF24L01+ é feita através de interface SPI de comunicação e se baseia em operações de leitura/escrita em registradores do módulo. Uma estrutura de fila FIFO (*First In First Out*), que funciona como buffer, garante um fluxo adequado de dados entre o microcontrolador do rádio e o sistema que o opera. O Quadro 1 apresenta os pinos disponíveis e sua respectiva funcionalidade.

Quadro 1 – Relação de pinos do módulo nRF24L01+

Pino	Função
GND	Ground
VCC	Tensão de alimentação – 1.9V a 3.6V
CE	Chip Enable. Responsável pela ativação dos modos TX e RX
CSN	SPI Chip Select. Permite a comunicação do módulo RF com o dispositivo controlador.
SCK	SPI Clock. Sinal digital de sincronia que deve ser fornecido ao módulo RF.
SIMO	Slave In Master Out. Entrada de dados do dispositivo controlador
SOMI	Slave Out Master In. Saída de dados para o dispositivo controlador

O módulo nRF24L01+ possui uma máquina de estados que controla a transição entre os seus modos de operação. É possível configurá-lo para operar nos modos: Power Down, StandBy-I e II, RX e TX. O Modo Power Down leva o módulo a um estado de mínimo consumo de energia e aguarda por uma nova transição. Os modos StandBy-I e StandBy-II garantem baixo consumo de energia, desligando o módulo e checando, de tempo em tempo, se novas instruções foram recebidas. Os modos RX e TX realizam de fato as operações de transmissão e recepção de dados e recepção. A Figura 15 apresenta a parte principal da máquina de estados. Sua versão completa, com todos as transições e valores setados em registradores para acionar cada uma delas podem ser encontrados em (NORDIC, 2008).

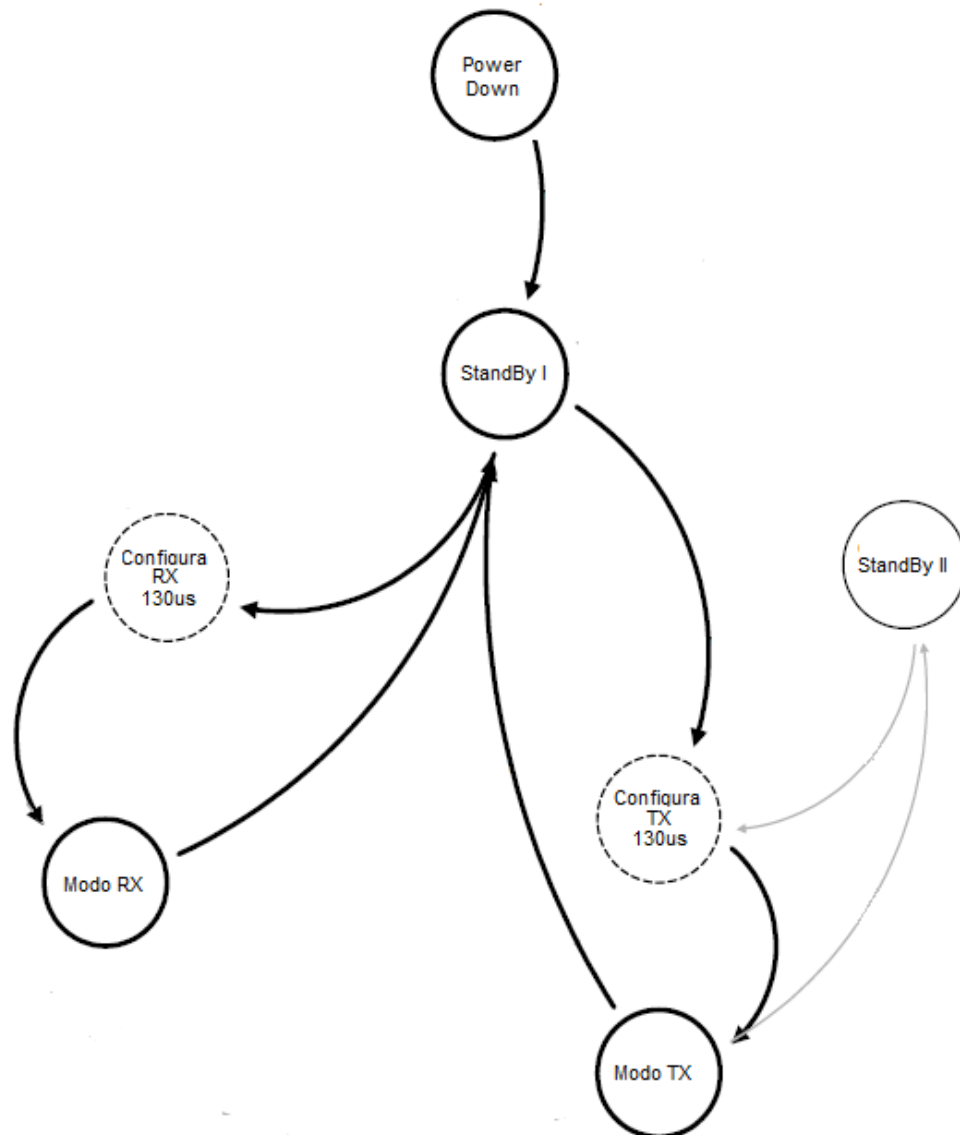


Figura 15 – Máquina de estados do módulo nRF24L01+
Fonte: Adaptado de Nordic (2008).

Uma característica deste módulo que foi muito utilizada no projeto é sua capacidade de atuar como multi-receptor, ou seja, receber informações de mais de um módulo emissor. Isso é possível através dos chamados *pipes* de comunicação, que são canais de informação lógicos, com endereços exclusivos. Isso dá ao dispositivo receptor a alternativa de realizar uma varredura em seu canal físico de comunicação e identificar qual foi o seu dispositivo emissor. Infelizmente, essa tecnologia apresenta um limite de seis *pipes* para um mesmo receptor. Porém, como o escopo do trabalho envolve ambientes residenciais, que são relativamente pequenos, esse valor será o suficiente para montar a rede de comunicação. A Figura 16 mostra um dispositivo receptor PRX conectado a vários dispositivos emissores PTXn em um mesmo canal físico, através de *pipes* de comunicação.

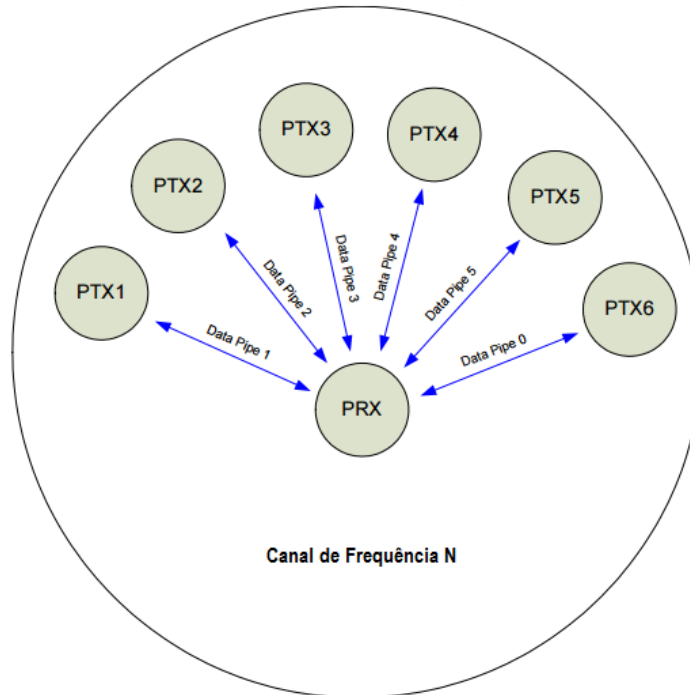


Figura 16 – Pipes de comunicação para multi-receptor de dados
Fonte: Adaptado de Nordic (2008).

Após implementado o *driver* para operar o módulo RF, foi necessário definir a estrutura da rede de comunicação que melhor se adaptasse ao escopo do projeto. O dispositivo concentrador deve receber a informação de que um evento sonoro foi reconhecido, independente de qual estação sensora o reconheceu. Dessa forma, ele deve ser capaz de receber dados de todas as estações sensoras, sendo assim o dispositivo multi-receptor da rede.

O módulo RF utilizado possui algumas funcionalidades interessantes voltadas a economia de energia e uso de multi-receptores, no entanto, os dados transmitidos de emissor para receptor são entregues sem nenhum tipo de encapsulamento. Em outras palavras, se uma estação sensora qualquer enviar o dado para o concentrador, ele não receberá informações extras como, por exemplo, o ID desta estação ou um *timestamp*. Dessa forma, o próximo passo foi definir um pacote de dados apropriado aos propósitos deste trabalho.

O pacote foi estruturado de modo a conter o ID da estação sensora que o enviou e quais eventos sonoros foram reconhecidos naquele instante. Este pacote possui 2 bytes, sendo dividido em um *nibble* com os bits mais significativos representando estação sensora, e 12 *flags* que correspondem a eventos sonoros reconhecíveis. Com 4 bits de dados para informar o ID de uma estação sensora, tem-se 2^4 possíveis IDs, sendo assim, o sistema como um todo possui suporte para até 16 estações sensoras. A Figura 17 mostra a solução proposta.

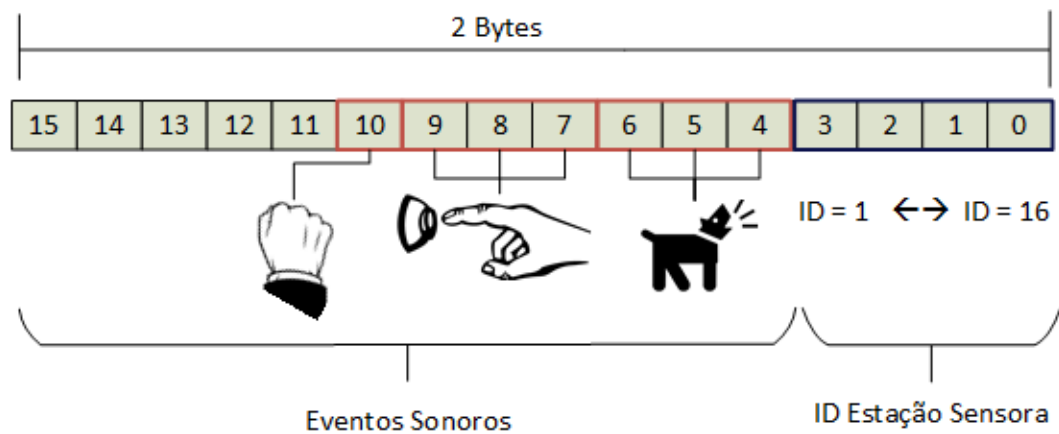


Figura 17 – Pacote de dados

O módulo VR3 permite carregar apenas 7 sons em seu reconhecedor simultaneamente. Dessa forma foram utilizados 7 dos 12 slots disponíveis no pacote. Ao se reconhecer um dado som, a estação sensora verifica a qual categoria ele pertence e aciona sua flag no pacote de dados a ser enviado, setando seu valor de 0 para 1. Como exemplo, a Figura 19 apresenta um pacote de dados vindo da estação sensora 3, na qual foi reconhecido um toque de campainha.

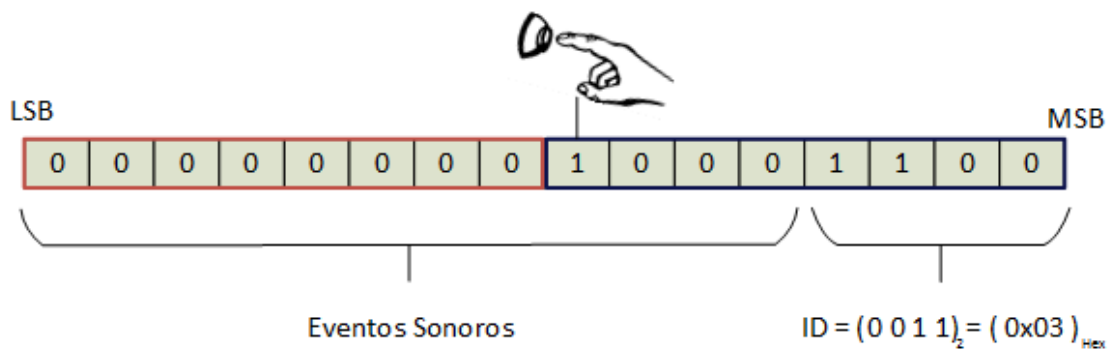


Figura 18 – Pacote de dados enviado pela estação 3

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta o sistema desenvolvido, resumindo brevemente os passos seguidos para o desenvolvimento de cada módulo. São discutidos os resultados do sistema quando testada sua acurácia no reconhecimento de eventos sonoros e o alcance de sua comunicação sem fio.

4.1 AS ESTAÇÕES SENSORAS

O projeto das estações sensoras começou estabelecendo-se comunicação sem fio entre dois microcontroladores. Em um segundo momento, foi necessário implementar o *driver* para o módulo VR3. Para tornar o sistema final atrativo e facilmente utilizável por usuários comuns, foram adicionados botões para inserção de dados e o *display* LCD 16x2, o qual conduziria as operações com o sistema. Chegou-se a criar um layout para PCI utilizando o *software* EAGLE, porém devido a restrições de tempo não foi confeccionada a placa. O esquemático elaborado pode ser visto no Apêndice 1. As Figuras 19 e 20 apresentam a sequência principal de telas de uma estação sensora em funcionamento e seu circuito completo em protoboard, respectivamente.

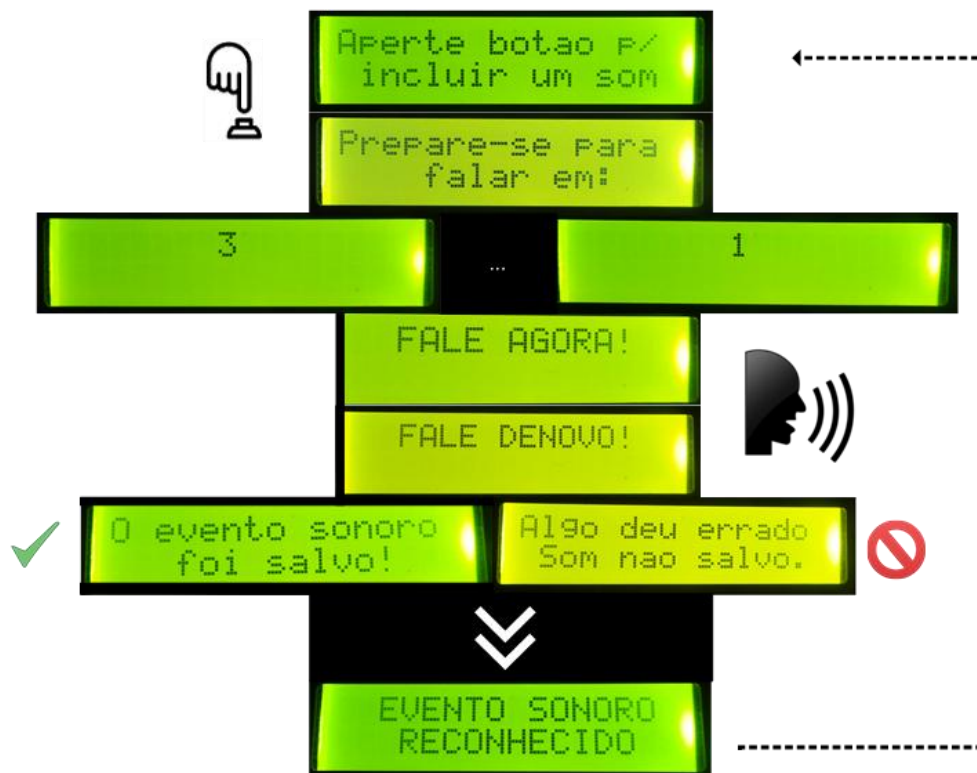


Figura 19 – Telas principais de uma estação sensora

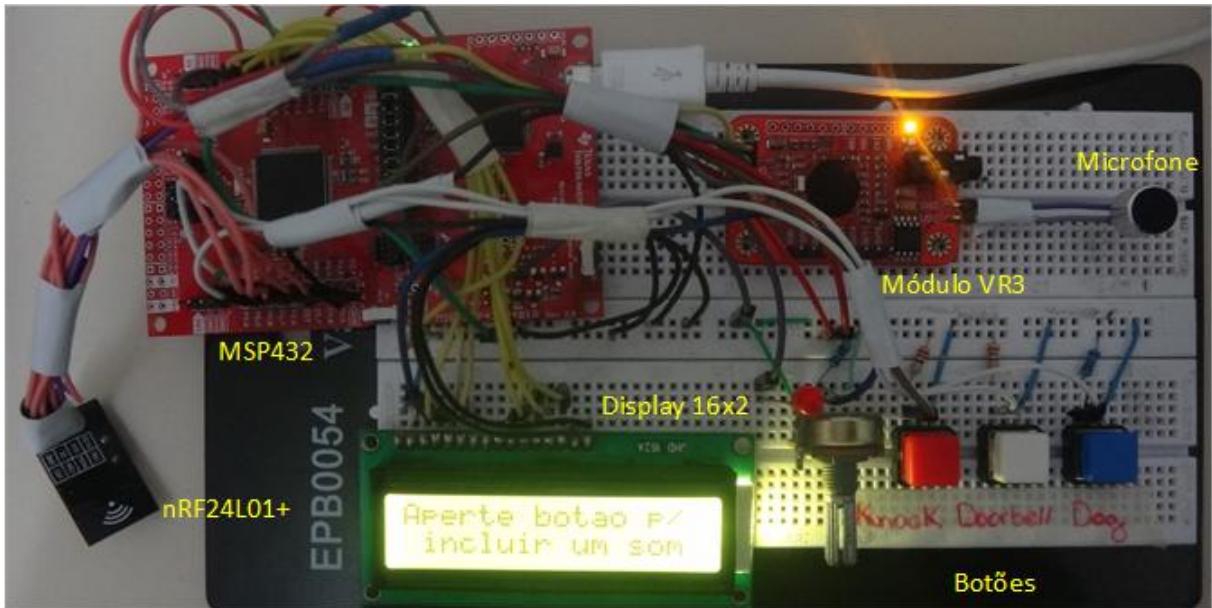


Figura 20 – Estação sensora em funcionamento

4.2 O DISPOSITIVO CONCENTRADOR

Uma vez que se solucionou este impecilho, foi necessário desenvolver rotinas capazes de ler o pacote de dados recebido pelo módulo RF e convertê-lo em informação útil ao dispositivo concentrador. Com essas informações, implementaram-se algumas telas de notificação e a lógica de operação do dispositivo concentrador, de modo a otimizar seu consumo de energia. A Figura 21 apresenta as telas mostradas ao usuário.

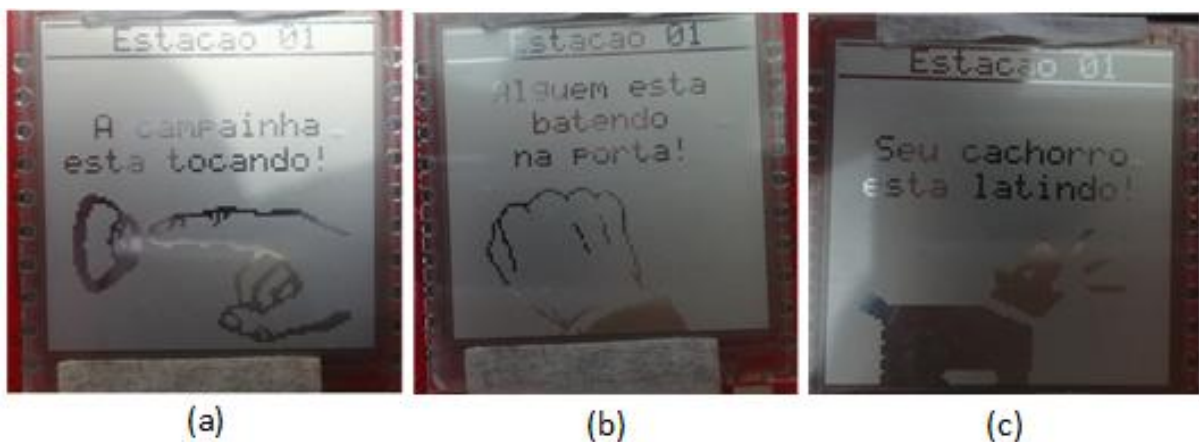


Figura 21 – Telas da dispositivo concentrador.

A tela apresentada na Figura 21(a) corresponde a resposta do dispositivo quando uma estação sensora reconhece uma campanha tocando. A tela apresentada na Figura 21(b) é a resposta ao som de uma batida na porta. Por fim, a tela na Figura 21(c) é apresentada ao usuário quando um cachorro está latindo próximo de uma estação sensora. Além disso, olhando-se para o canto superior das imagens é possível saber qual estação sensora detectou o evento

O dispositivo concentrador foi projetado para ser usado junto ao corpo, idealmente na forma de uma pulseira. Desejava-se projetar uma PCI final, contendo apenas o microcontrolador, *display*, módulo RF e suporte para bateria. No entanto, o microcontrolador MSP432 possui encapsulamento SMD, o que adicionaria desafios à confecção da placa por métodos tradicionais, como a prototipação de uma PCI e soldagem deste componente. Esse fator, somado a restrições de tempo, inviabilizou a produção de uma PCI para este dispositivo. A Figura 22 apresenta o dispositivo concentrador. Na Figura 22(a) é possível reconhecer o módulo de *display* Sharp 96x96 conectado ao kit Launchpad. A parte traseira do dispositivo é mostrada na Figura 22(b) conta com o módulo RF, motor *vibracall* e bateria.

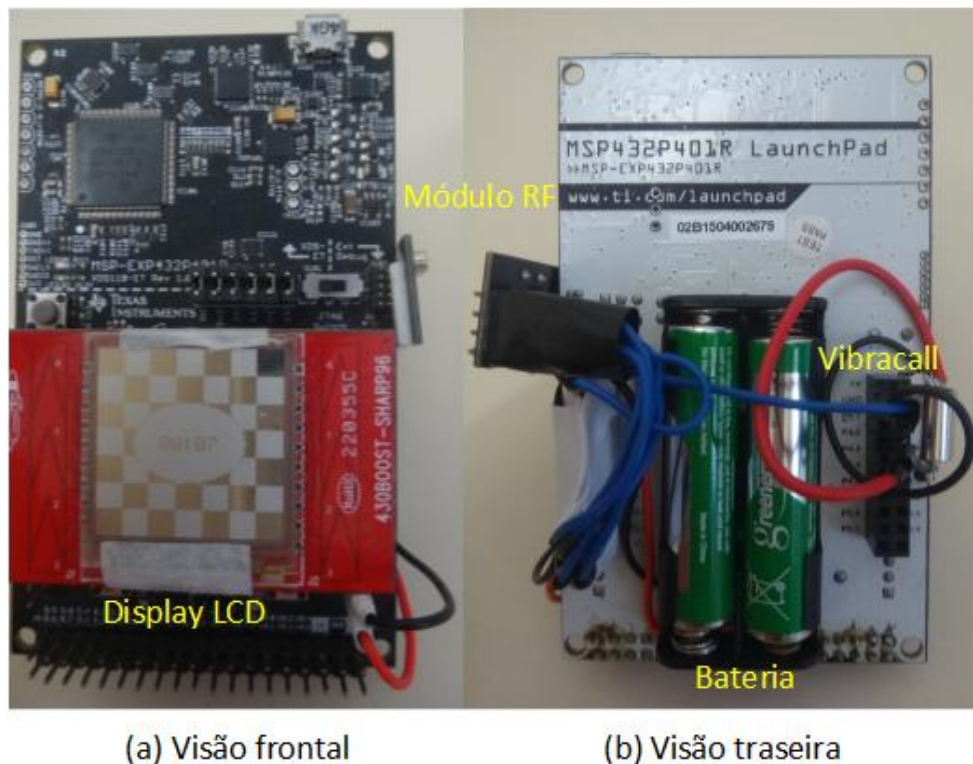


Figura 22 – Visão frontal e traseira do dispositivo concentrador

4.3 TESTES DE DESEMPENHO

O desempenho do sistema projetado foi avaliado através de 5 testes distintos. O primeiro deles se preocupou em mensurar o alcance da rede sem fio entre estações sensoras e dispositivo concentrador. Inicialmente, foi gravado um evento sonoro qualquer na estação sensora. Para garantir repetibilidade, o mesmo foi gravado com um celular e reproduzido a 20cm da estação sensora durante todo o experimento. Isso impede que as medidas capturadas sejam contaminadas com variações não relevantes para o teste.

Foram definidas algumas distâncias fixas (2, 4, 6, 8 e 10 metros de distância) entre os dispositivos. A estação sensora foi fixada em um local, separada por uma distância de 2 metros do dispositivo concentrador. Cada rodada era composta de três séries de 50 tentativas de reconhecimento, aumentando-se a distância entre os dispositivos de 2 em 2 metros. Uma média dos valores foi calculada e utilizada para definir o percentual de acertos. A Tabela 5 apresenta os resultados.

Tabela 5 – Percentual de acertos sem obstáculos

Distância	Série 1	Série 2	Série 3	Média de acertos	Percentual (%)
2 metros	50	50	50	50	100%
4 metros	50	49	50	49,67	99%
6 metros	50	50	50	50	100%
8 metros	50	50	46	48,67	97%
10 metros	50	48	50	49,34	99%

Como é possível perceber na Tabela 5, o módulo teve um bom desempenho para todas as distâncias consideradas. No entanto, esse teste foi realizado considerando um corredor, ou seja, ambiente sem divisórias e obstáculos. O dispositivo concentrador foi posicionado em locais específicos da residência como mostra a Figura 23. Para cada um deles três séries de 50 tentativas de reconhecimento foram realizadas. Dessa forma, um segundo teste focou-se em entender o impacto de obstáculos como paredes, portas e móveis na atenuação do sinal de RF. Os resultados coletados são apresentados na Tabela 7.

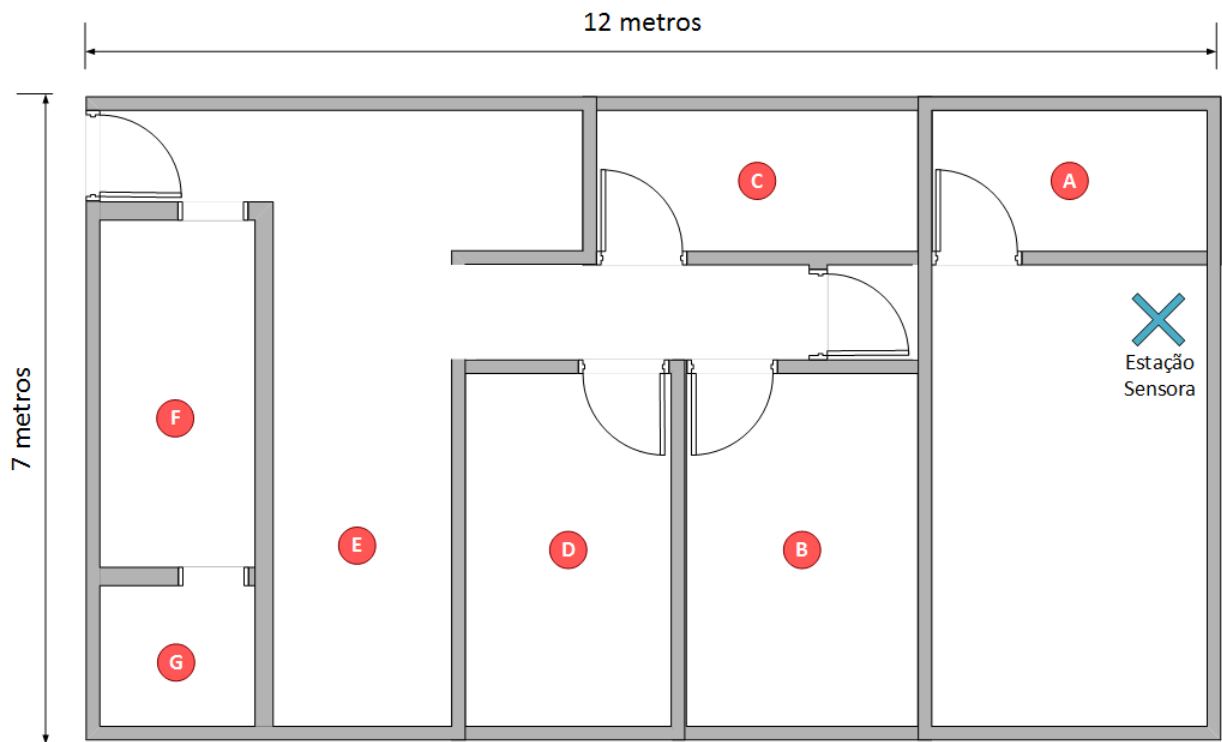


Figura 23 – Locais de posicionamento do dispositivo concentrador

Tabela 6 – Percentual de acertos com obstáculos

Local	Série 1	Série 2	Série 3	Média de acertos	Percentual (%)
A	50	50	49	49,67	99%
B	46	48	49	47,67	95%
C	50	47	46	47,67	95%
D	44	39	42	41,67	83%
E	26	35	29	30	60%
F	30	22	23	25	50%
G	7	11	6	8	16%

Com este experimento, percebeu-se que o número de divisórias entre os dispositivos tem grande influência na transmissão de pacotes. Os pontos A, B e C possuem apenas uma parede os separando da estação sensora. Conforme a Tabela 6 mostrou, seus resultados ficaram na média dos 95% de acertos. Fechando-se as portas, o sinal da estação percorre duas divisórias para alcançar o ponto D, reduzindo seu desempenho para 83% de acertos. O ponto E, localizado a três divisórias de distância da estação, teve valores ainda menores. Por fim, os pontos F e G, com quatro divisórias de distância, foram os piores. A Tabela 7 relaciona o número de divisórias com o percentual de acertos, facilitando a análise dos dados. Uma observação importante é feita com relação a composição das divisórias. Esta residência possui paredes de material, podendo se ter resultados diferentes para casas de madeira.

Tabela 7 – Número de divisórias X percentual e acertos

Número de divisórias	Percentual (%)
1	96,34%
2	83%
3	60%
4	33%

Comparando-se os resultados obtidos para os pontos F e G nota-se uma grande diminuição na taxa de acertos para o último. Acredita-se também que características físicas e eletrônicas de alguns eletrodomésticos contribuíram para a deterioração do sinal.

O terceiro teste focou-se em descobrir a qualidade do conjunto módulo VR3 e microfone no reconhecimento de sons. Para tanto, estabeleceram-se distâncias fixas entre a fonte de som e a estação sensora, variando de 15 em 15 centímetros e cobrindo uma distância total de 2,2 metros. O teste consistiu no reconhecimento de três eventos sonoros de cada categoria de áudios propostos. Para cada evento sonoro 50 tentativas de reconhecimento foram realizadas. Com exceção da categoria de batidas na porta, os eventos sonoros das demais foram reproduzidos utilizando aparelho celular. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Percentual de acertos com o aumento da distância

Distância (em centímetros)	Latidos de cachorro					Campainha					Batidas na porta				
	Som 1	Som 2	Som 3	Média	%	Som 1	Som 2	Som 3	Média	%	Som 1	Som 2	Som 3	Média	%
15	50	50	50	50	100	50	50	50	50	100	50	49	50	50	99
30	50	50	50	50	100	50	50	49	50	99	50	44	50	48	96
45	50	50	50	50	100	50	50	50	50	100	50	44	49	48	95
60	48	50	50	49	99	50	50	50	50	100	50	32	50	44	88
75	50	49	50	50	99	50	50	47	49	98	44	6	22	24	48
90	48	50	50	49	99	50	50	47	49	98	26	0	0	9	17
105	45	50	50	48	97	50	50	48	49	99	0	0	0	0	0
120	50	48	50	49	99	50	50	50	50	100	1	0	0	0	1
135	48	46	50	48	96	50	50	50	50	100	0	0	0	0	0
150	49	50	50	50	99	50	50	50	50	100	0	0	0	0	0
175	50	48	50	49	99	50	50	50	50	100	0	0	0	0	0
190	50	50	50	50	100	50	50	50	50	100	0	0	0	0	0
205	50	49	50	50	99	50	50	50	50	100	0	0	0	0	0
220	47	50	50	49	98	50	50	50	50	100	0	0	0	0	0

Durante a realização dos testes, percebeu-se grande dificuldade por parte do módulo VR3 em reconhecer eventos de batidas na porta reproduzidos através do celular. Testes pontuais foram feitos com 6 arquivos de áudio diferentes, em todos os casos não se conseguia reconhecer os eventos sonoros mesmo à distâncias pequenas (até 30cm). Uma teoria levantada faz alusão ao curto intervalo de tempo que existe entre batidas e a unicidade do tom de cada toque.

Os resultados apresentados na Tabela 8 para esta categoria foram extraídos com o operador realizando as batidas em madeira. Tal fato pode ter causado parte das grandes variações vistas quando se compara o número de acertos para duas distâncias próximas. No entanto, fica claro que esta categoria apresentou baixo desempenho para distâncias acima de 60cm. Dessa forma, uma recomendação de uso para garantir boa precisão no reconhecimento da batidas na porta é posicionar a estação sensora o mais próximo possível dela.

Além disso, como para as duas outras categorias testadas os resultados foram bons mesmo a grandes distâncias, uma nova variável de teste foi adicionada. No teste 4, o operador posicionou-se a 2,2 metros da estação sensora e diminuiu gradativamente o volume do aparelho de celular antes de realizar uma bateria de 10 tentativas de reconhecimento. O volume foi diminuído unitariamente até que o reconhecedor apresentasse uma taxa de acertos igual a 0%. A tabela 9 a seguir apresenta, para cada som testado, quantas vezes foi necessário decrementar o volume até que esse resultado ocorresse.

Tabela 9 – Decrementos unitários de volume necessários

Categoria	Som	Número de decrementos
Latido de cachorro	Som 1	2
	Som 2	4
	Som 3	5
Campainha	Som 1	7
	Som 2	8
	Som 3	7

Para quantificar estas informações em um formato aceito pela comunidade acadêmica, foi utilizado um aplicativo disponível para Android chamado Decibelímetro. Este aplicativo utiliza os microfones do aparelho para mensurar o volume sonoro em dB (decibéis) de um *streaming* de áudio. Devido a isso, o desempenho do aplicativo está vinculada a cada aparelho de celular. Em outras palavras, se o mesmo som for testado com dois aparelhos diferentes, é provável que os valores de dB informados sejam diferentes. Não é uma tecnologia exata, mas permitiu entender melhor o quanto o volume interfere no reconhecimento sonoro pelo módulo VR3.

A Figura 24 apresenta dois gráficos para cada evento sonoro testado. O primeiro deles corresponde aos níveis em dB coletados ao se reproduzir o arquivo de áudio diversas vezes no volume máximo do aparelho celular. O segundo traz a mesma informação após se reduzir X vezes o volume do aparelho, onde X é o dado da terceira coluna da Tabela 9.

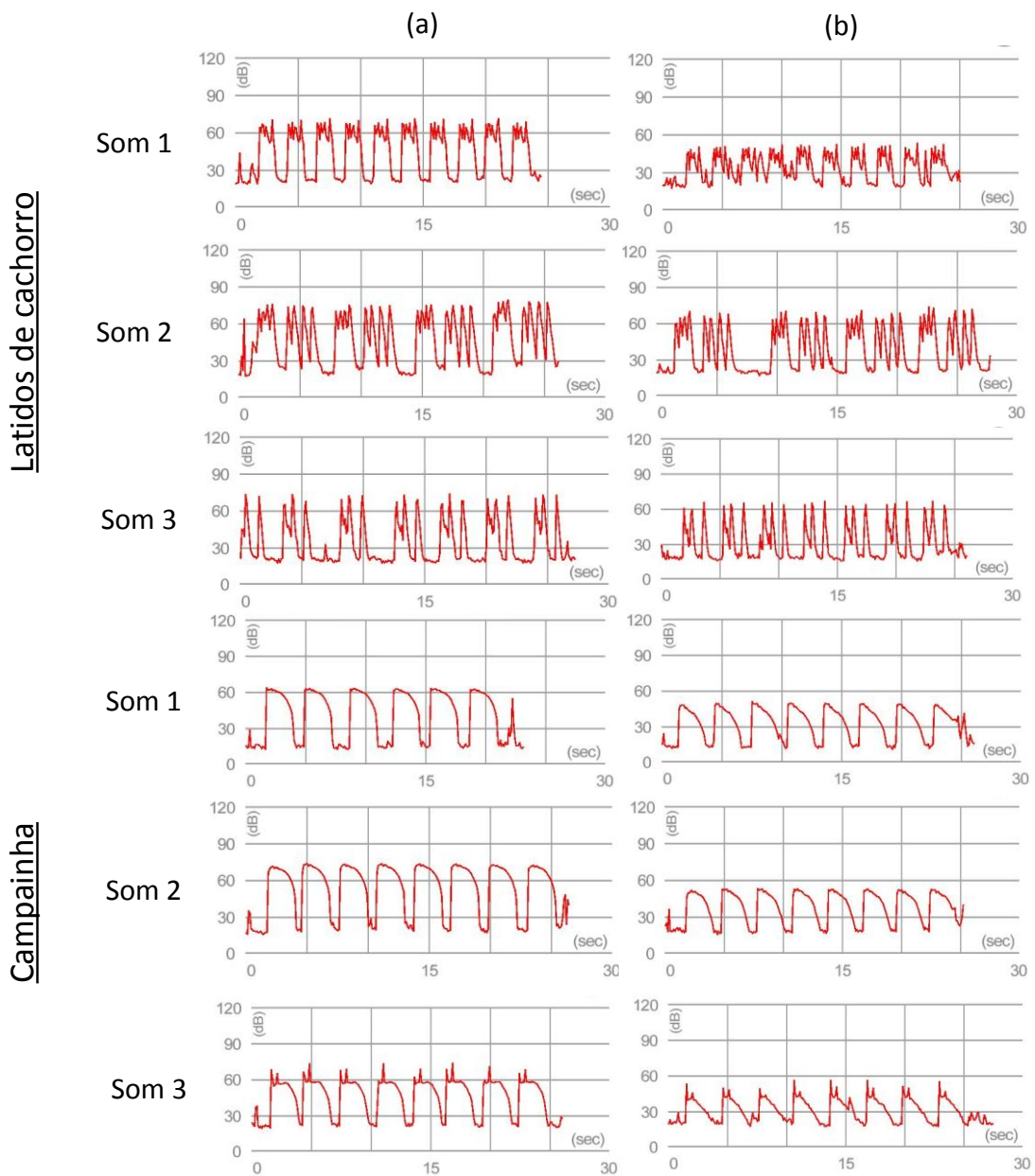


Figura 24 – Gráficos de intensidade sonora

Analisando-se cuidadosamente os gráficos apresentados é possível perceber que os áudios de latidos de cachorro sofrem uma queda de 18dB em média. O módulo VR3 aparenta ser mais sensível a variação no volume dos eventos de campainha, pois para estes basta uma queda média de 13dB na intensidade sonora, e o módulo deixa de os reconhecer.

Além disso, a atenuação de volume não segue a mesma linearidade para todos os eventos sonoros, inclusive para os que pertencem a uma mesma categoria. Um exemplo disso pode ser visto nos sons 1 e 3 da categoria de latidos de cachorro. O primeiro deles sofre uma atenuação de 20dB com apenas duas operações de decremento no aparelho celular. Já para o som 3 são necessárias 5 operações para gerar uma queda de 10 dB.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a integração de conhecimentos de *hardware* e *software* adquiridos durante a graduação, para o desenvolvimento de uma solução tecnológica voltada a deficientes auditivos. A solução implementada é composta por duas categorias de dispositivos que se comunicam utilizando rádio-frequência. A primeira delas contém estações sensoras capazes de reconhecer eventos sonoros específicos. A segunda é composta por um dispositivo concentrador a ser mantido sempre com o usuário, o qual lhe avisa da ocorrência dos eventos reconhecidos em tempo real.

O sistema desenvolvido possui algumas limitações quanto ao escopo de eventos sonoros reconhecíveis e alcance para ambientes fechados. Este último com potencial para impedir o correto atendimento ao deficiente auditivo, visto que dependendo do local da residência que o mesmo se encontrar, pode não ser notificado dos eventos previstos. No entanto, algumas alternativas podem ser implementadas em trabalhos futuros, de modo a corrigir e/ou amenizar o efeito negativo deste problema.

Uma destas alternativa, mais imediata, se baseia na criação de um protocolo de comunicação através do qual ao se reconhecer um evento, a estação permaneça enviando o pacote de dados até receber uma notificação de que o mesmo foi entregue. Outra solução prevê a implementação de uma rede de sensores capazes de enviar e receber informações entre si e com o dispositivo concentrador. Dessa forma, metodologias de roteamento podem ser estabelecidas de modo que, ao se reconhecer um evento sonoro, essa informação trafegue na rede até encontrar o dispositivo concentrador. Estas duas implementações não requerem mudanças de *hardware*, podendo ser implementadas sobre a arquitetura atual de *software*.

Outra alternativa para o problema do alcance em ambientes residenciais seria implementar comunicações RF utilizando outro módulo de maior potência e/ou sensibilidade. O candidato ideal segundo o levantamento feito neste trabalho seria o módulo RFM96. Um risco existente nesta abordagem é não se conseguir um desempenho significativamente melhor, que torne o sistema imune a perda de pacotes. Dessa forma, um trabalho futuro poderia realizar estudos mais aprofundados sobre o módulo RFM96, procurando avaliar sua utilização em ambientes fechados. Uma parte fundamental do estudo seria a quantificação dos valores de atenuação gerados por móveis, portas, paredes e o próprio corpo humano no sinal RF.

Quanto ao escopo de eventos, são apresentadas três alternativas para o aumento de categorias de eventos sonoros reconhecíveis pelo sistema. A primeira e de menor complexidade para implementação consiste na utilização de sensores para auxiliar e/ou substituir a ação do

módulo VR3 para determinados eventos sonoros. Um dos grupos beneficiados poderia ser o de batidas na porta, cuja taxa de reconhecimentos deixou a desejar. A ideia é que sensores piezoelétricos - dispositivos sensíveis a variações de pressão, força e aceleração – sejam acoplados as portas de acesso a residência e tenham seus valores de tensão continuamente lidos pela estação sensora. Quando alguém bater na porta, a vibração mecânica gerada percorrerá toda a extensão da porta e será sentida pelo sensor. Uma lógica de programação pode alinhar o recebimento de vários valores simultâneos de tensão específicos, à ocorrência de um evento de batida na porta.

Uma segunda solução para reconhecimento de sons se encontra na utilização da biblioteca MinHMM, de reconhecimento de fala, desenvolvida pela Texas Instruments. Esta biblioteca permitiria eliminar o módulo VR3 e reduzir o custo do produto final. A vantagem desta opção é que já é fornecida uma versão Demo de código para o microcontrolador MSP432, o que facilita a implementação. No entanto, um fator de risco apresentado refere-se ao desempenho do algoritmo reconhecedor interno à biblioteca. Além disso, diferentemente do módulo VR3, para esta biblioteca seria necessário implementar o circuito de captura de áudio com microfone e amplificador. Ela também possui certa limitação no número de áudios que podem ser armazenados simultaneamente. Os parâmetros são ajustáveis e, por isso, esse valor pode mudar, mas em geral cada áudio ocupa 4Kbytes de espaço na memória Flash. Com 256Kbytes de memória, podem ser armazenados até 64 sons.

Por fim, outra alternativa para aumentar o escopo de sons reconhecidos pelo sistema consiste no desenvolvimento de um reconhecedor embarcado próprio. Conhecendo-se os detalhes do algoritmo de reconhecimento é possível criar soluções específicas, capazes de reconhecer outras categorias de áudio não exploradas neste trabalho. Além disso, o módulo VR3 seria eliminado, reduzindo o custo do produto. Essa solução permite otimizar os recursos de *software* e *hardware* para tornar as estações mais robustas e genéricas. Contudo, é a que apresenta maior complexidade de implementação.

Além disso, o módulo de reconhecimento sonoro VR3.0 salva os modelos lógicos de eventos sonoros em memória volátil, ou seja, quando desenergizado perde as informações gravadas pelo usuário. Sendo assim, uma preocupação futura seria adicionar um mecanismo de proteção contra quedas de energia, de modo a evitar a perda dos eventos sonoros cadastrados.

Foram encontradas algumas dificuldades ao longo do desenvolvimento deste trabalho, as quais demandaram tempo e energia. Uma delas ocorreu na integração do display Sharp 96x96 com o microcontrolador MSP430g2553. Este *display* requer pelo menos 1KByte de RAM do microcontrolador que o operar, devido a um buffer de dados que deve ser mantido constantemente.

Em geral, o conteúdo deste buffer reflete pixel a pixel a tela sendo mostrada. No entanto, o microcontrolador MSP430g2553 possui apenas 512 bytes de RAM, o que levou a Texas a desenvolver uma implementação especial para ele, que demonstra o funcionamento do módulo de *display*, mas possui limitações.

Como o microcontrolador possui 16Kbytes de memória Flash a implementação da Texas utiliza esta memória para salvar os conteúdos do *display*. No entanto, a memória Flash é significativamente mais lenta para escrita e requer mais energia. Além disso, ela possui um tempo mínimo de 10000 ciclos de clock para cada operação de escrita. Para aplicações onde seja necessário escrever novos dados na tela com certa frequência, essa implementação apresenta problemas que levam ao travamento do código do microcontrolador. Portanto, devido a restrição de *hardware* imposta pelo *display*, optou-se por utilizar outro microcontrolador no dispositivo concentrador. Para facilitar a implementação utilizou-se o mesmo microcontrolador das estações sensoras, o Kit Launchpad MSP432.

De modo geral, a solução implementada atende os requisitos de projeto. Fornece ao usuário uma interface intuitiva para cadastro de eventos sonoros de escopos, consegue capturar sua atenção por meios não audíveis e lhe informa da ocorrência de eventos relevantes ao seu dia-a-dia. Trabalhos futuros devem focar na melhoria de alcance entre dispositivo concentrador e estações sensoras no escopo residencial e aumentar o escopo de eventos sonoros reconhecíveis.

REFERÊNCIAS

- ANATEL. **Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008.** Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2008/104-resolucao-506>> Acesso em 03 nov. 2016.
- ANATEL. **Plano de destinação de faixas de frequência.** Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/pdf/consulta/consulta.asp>> Acesso em: 02 jun. 2015
- ANDERSON, Karen. **Hearing Aids What, Why, When, How?** , 2011. PhD for Minnesota Department of Education. Disponível em: <<http://successforkidswithhearingloss.com/wp-content/uploads/2014/06/HEARING-AIDS-What-When-Why-How.pdf>> Acesso em: 24 out. 2016.
- BARBACENA, Ilton L.; FLEURY, Claudio A.; 1996. **Display LCD.** Disponível em: <<ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/ea079/complementos/Lcd.pdf>> Acesso em 25 out. 2016.
- BECHETTI, Claudio; Ricotti, Lucio P., 1999. **Speech Recognition: Theory and C++ Implementation.** New York, NY: Wiley, c1999. Xvii, 407 p.
- CDC. **Types of Hearing Loss.** Disponível em: <<http://www.cdc.gov/ncbddd/hearingloss/types.html>> . Acesso em: 23 out. 2016
- CERTIC. **O profissional de engenharia de reabilitação,** 2010. NET. Disponível em: <<http://www.engenhariadereabilitacao.net/pt-pt/node/9>> Acesso em: 06 nov. 2016
- DAVIS, Hallowell; SILVERMAN, Sol R. **Hearing and Deafness,** 1970. 3rd ed. New York
- DIBAZAR, A. A; YOUSEFI, A.; PARK, H. O.; et al. **Intelligent Recognition of Acoustic and Vibration Threats for Security Breach Detection** , Close Proximity Danger Identification , and Perimeter Protection 1. , v. 3, p. 351–356, 2011.
- DIGI, 2012. **Indoor Path Loss.** Disponível em: <<http://ftp1.digi.com/support/images/xst-an005a-indoorpathloss.pdf>> Acesso em: 02 jun. 2015
- CHEN, Wilson. **Voice Recognition Module VR3 Manual Elechouse,** 2014. Disponível em: <http://www.elechouse.com/elechouse/images/product/VR3/VR3_manual.pdf> Acesso em 25 out. 2016.
- HC-FMUSP, Grupo de Implante Coclear. **O que é implante coclear?**, 2005. Disponível em: <<http://www.implantecoclear.org.br/textos.asp?id=5>> Acesso em: 06 abr. 2015.
- GENG, Hui.; SHI, Yiyu.; DONG, Ming.; LIU, Runsheng. **A Master-Slave SoC Structure for HMM Based Speech Recognition.** , p. 2–5, 2012.
- GERHARD, David. **Audio Signal Classification History and Current Techniques,** 2003. Disponível em <<http://www.cs.uregina.ca/Research/Techreports/2003-07.pdf>> Acesso em 24 out. 2016.

GOLD, Ben; MORGAN, Nelson. **Speech Recognition and Audio Signal Processing: Processing and Perception of Speech an Music**. 2 ed., 2001.

HAQUE, Fazlul. **FFT and Wavelet-Based Feature Extraction for Acoustic Audio Classification**, 2012. Disponível em: < <http://www.omicsonline.com/open-access/fft-and-waveletbased-feature-extraction-for-acoustic-audio-classification-2277-1891.1000101.pdf>> Acesso em 24 out. 2016.

HEAR, 2016. **Types of Hearing Loss**. Disponível em: < <http://hearnet.org.au/hearing-loss/types-of-hearing-loss>> Acesso em 24 out. 2016.

ITU, 2015. **Frequently Asked Questions**. Disponível em: < <http://www.itu.int/itu-r/terrestrial/faq/#g001>> Acesso em: 02 jun. 2015

KANEKO, Yoshihiro; CHUNG, Inho; SUZUKI, Kenji. **Light-emitting device for supporting auditory awareness of hearing-impaired people during group conversations**. Proceedings - 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, p. 3567–3572, 2013.

LIU, Xiaojun; 2015. **Design of Indoor Location System Based on Power Line Communication and RFID**. International Power, Electronics and Materials Engineering Conference. Disponível em: <http://www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=22813> Acesso em 25 out. 2016.

LUNA, Luisa; SILVA, Helder. **Estado da arte na área de Engenharia de Reabilitação**, 2009. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABT-IAA/engenharia-reabilitacao>> Acesso em 06 nov. 2016

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. **MSP432P401x Device Overview**, 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/MSP432P401R/datasheet>> Acesso em: 02 jun. 2015

MUNYI, Chomba. **Past and Present Perceptions Towards Disability: A Historical Perspective**, 2012. Disponível em: <<http://dsq-sds.org/article/view/3197/3068>>. Acesso em: 23 out. 2016.

NETO, Nestor W. **Como Funciona o Sistema Auditivo**, 2011. Disponível em: < > Acesso em 24 out. 2016.

NIDCD, 2016. **Age Related Hearing Loss**. Disponível em: < <https://www.nidcd.nih.gov/health/age-related-hearing-loss#3>>. Acesso em 23 out. 2016.

NIDCD, 2014. **Assistive devices for people with hearing, voice, speech or language disorders**. Disponível em: < <https://www.nidcd.nih.gov/health/assistive-devices-people-hearing-voice-speech-or-language-disorders>>. Acesso em: 23 out. 2016

NIDCD, 2016. **Hearing Aids**. Disponível em: < <https://www.nidcd.nih.gov/health/hearing-aids>>. Acesso em 23 out. 2016.

NORDIC, 2008. **Preliminary Product Specification v1.0**. Disponível em: < https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf> Acesso em 25 out. 2016.

PARK, James J. Hong Hyuk; NG, Joseph Kee-Yin; JEONG, Hwa-Young; WALUYO, Borgy, 2013. **Multimedia and Ubiquitous Engineering**. 1 ed. 1209p.

PRECISION, 2016. **12mm DC Motor Datasheet**. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/product/106-001-6mm-dc-motor-12mm-type>> Acesso em 26 out. 2016

DX.COM. **Produto nRF24L01+ em tamanho real**. Disponível em: <http://www.dx.com/pt/p/nrf24l01-2-4ghz-wireless-transceiver-module-black-149483#.WA_HR9UrLIU> Acesso em 25 out. 2016.

QI, Chongjie; QUE, Dashun. Indoor speech interaction system for deaf-mute based on ZigBee. **2013 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2013**, , n. August, p. 400–403, 2013.

RADABAUGH, Mary P. **IBM National Support, Center for Persons with Disabilities**, 2014. Disponível em: <http://www.ilcnsw.asn.au/home/assistive_technology/assistive_technology> Acesso em 24 out. 2016.

SCHUMACHER, Florian. **Energy Harvesting for Wearables**, 2014. Disponível em: <<https://www.wearable-technologies.com/2014/07/energy-harvesting-for-wearables/>> Acesso em: 02 jun. 2015

SEHILI, M. A.; ISTRATE, D.; DORIZZI, B.; et al. **Daily sound recognition using a combination of gmm and svm for home automation**. , , n. Eusipco, p. 1673–1677, 2012.

SETEC, M. –; TERUKO, M.; MASCHIO, F.; SOBRE, E.; DE, A. P. **Serviço público federal departamento de pesquisa e pós-graduação**. , 2009.

SHASTRI, Manisha. **Victim of Disability: A Case Study**, 2012. Disponível em: <http://www.academia.edu/8373960/Victim_of_Disability_A_Case_Study> . Acesso em 23.out. 2016.

SHAUKAT, A.; AHSAN, M.; HASSAN, A.; RIAZ, F. **Daily Sound Recognition for Elderly People Using Ensemble Methods**. , p. 418–423, 2014.

SILVA, Otto Marques da. **A epopeia ignorada: a pessoa deficiente na história do mundo de ontem e de hoje**. São Paulo: CEDAS, 1986.

STEPHENS, Dafydd; HETU, Raymond. **Impairment, Disability and Handicap in Audiology: Towards a Consensus**. 1991. Pg 185-200.

SUBRAMANIAN, Hariharan, 2004. **Audio Signal Classification**. Disponível em <https://www.ee.iitb.ac.in/~esgroup/es_mtech04_sem/es_sem04_paper_04307909.pdf> Acesso em 24 out. 2016.

SUTTON, Felix; FORNO, Reto DA; LIM, Roman; ZIMMERLING, Marco; THIELE, Lothar. Demonstration Abstract: **Automatic Speech Recognition for Resource-Constrained Embedded Systems**. , p. 323–324, 2014.

ADVANTECH B+B SMARTWORX. **10 Commandments of Wireless Communications.** Disponível em: <<http://www.bb-elec.com/learning-center/all-white-papers/wireless-cellular/10-commandments-of-wireless-communications.aspx>> Acesso em: 02 jun. 2015

THOMSEN, Adilson; 2011. **Controlando Um LCD 16x2 com Arduino.** Disponível em: <<http://blog.filipeflop.com/display/controlando-um-lcd-16x2-com-arduino.html>> Acesso em 25 out. 2016.

LAIRD Technologies. **Understanding range for RF devices,** 2012.. Disponível em: <http://www.digikey.com/web%20export/supplier%20content/laird_776/pdf/laird-wireless-understanding-range-rf-devices.pdf?redirected=1> Acesso em: 02 jun. 2015

UNICEF; WHO. **Assistive Technology for Children With Disabilities: Creating Opportunities for Education, Inclusion and Participation,** 2015. Disponível em: <<http://www.unicef.org/disabilities/files/Assistive-Tech-Web.pdf>> Acesso em 24 out. 2016

VISHAY, 2002. **16x2 Character LCD.** Disponível em: <<http://www.engineersgarage.com/sites/default/files/LCD%2016x2.pdf>> Acesso em 25 out. 2016.

WANG, Jia-Ching; LIN, Chang-Hong; SIAHAAN, Ernestasia; CHEN, Bo-Wei; CHUANG, Hsiang-Lung. **Mixed Sound Event Verification on Wireless Sensor Network for Home Automation.** , v. 10, n. 1, p. 803–812, 2014.

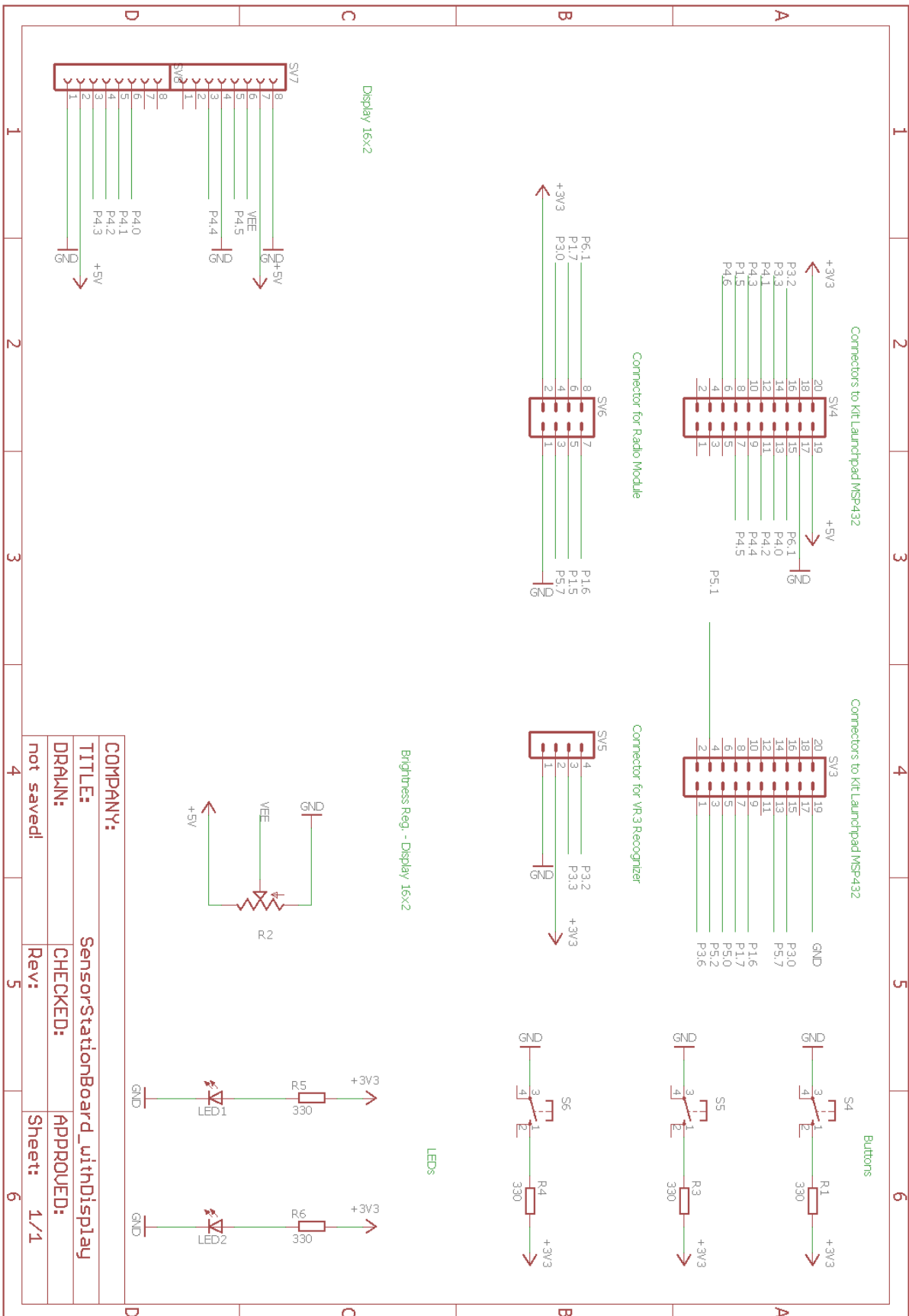
WHO, 2016. **Assistive technology.** Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/assistive-technology/en/>>. Acesso em: 23 out. 2016

WHO, 2011. **World report on disability.** Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44575/4/9788564047020_por.pdf>. Acesso em : 23 out. 2016

WHO, 2012. **Global estimates on prevalence of hearing loss.** Disponível em: <http://www.who.int/pbd/deafness/WHO_GE_HL.pdf> Acesso em: 14 mar. 2015.

YOO, In-chul; YOOK, Dongsuk. **Automatic Sound Recognition for the Hearing Impaired** , 2008.

APÊNDICE 1 – Esquema Elétrico da Estação Sensora



APÊNDICE 2 – Avaliação de Custo Módulos RF

A Tabela 1 apresentada neste trabalho foi obtida como resultado de uma pesquisa sobre as principais características dos módulos RF mais comercializados atualmente. Os parâmetros elencados na Tabela 1 foram selecionados comparando-se as especificações técnicas destes módulos e através de artigos de revistas da área.

O atributo preço médio foi calculado utilizando-se pelo menos dois vendedores. Os vendedores consultados são todos comércios eletrônicos de grande porte ou o próprio fabricante. Além disso, os montantes obtidos incluem o valor de frete e não foram convertidos para a moeda nacional. A seguir são apresentados os endereços eletrônicos visitados para coleta de preços.

SparkFun. **XBee Pro 900**, 2015. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/9099>> Acesso em :12 jun. 2015.

Ebay. **XBee Pro 900**, 2015. Disponível em: <http://www.ebay.com/itm/XBee-PRO-900HP-RPSMA-/321081951943?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item4ac1f9c6c7> Acesso em: 12 jun. 2015.

Aliexpress. **XBee Pro 900**, 2015. Disponível em: <<http://pt.aliexpress.com/item/XBee-Pro-900-Module-Wire-Antenna/572310444.html>> Acesso em: 12 jun. 2015.

SparkFun. **XBee 1mW**, 2015. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/11215>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Ebay. **XBee 1mW**, 2015. Disponível em: <<http://www.ebay.com/itm/XBee-1mW-Wire-Antenna-/230752035702>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Aliexpress. **XBee 1mW**, 2015. Disponível em: <http://pt.aliexpress.com/store/product/XBee-1mW-Wire-Antenna/604119_491790820.html> Acesso em: 12 jun. 2015.

Ebay. **RFM92**, 2015. Disponível em: <<http://www.ebay.co.uk/itm/HopeRF-RFM92W-915Mhz-LoRa-Ultra-Long-Range-Transceiver-SX1272-compatible-/181415801105>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Aliexpress. **RFM92**, 2015. Disponível em: <<http://pt.aliexpress.com/item/Free-shipping-2pcs-lot-RFM92-RFM92-868M-Low-Power-Long-Range-wireless-transceiver-modules-distance-more/1755412158.html>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Aliexpress. **RFM96**, 2015. Disponível em: <<http://pt.aliexpress.com/item/RFM95-RFM96-868M-915M-100mW-Wireless-Front-end-Module-SPI-Interface-GFSK-Semtech-SX1276-Radio-Transceiver/32345683465.html>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Ebay. **RFM96**, 2015. Disponível em: <http://www.ebay.co.uk/itm/HopeRF-RFM96W-433Mhz-LoRa-Ultra-Long-Range-Transceiver-SX1276-compatible-/171363005217?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item27e607f321> Acesso em: 12 jun. 2015.

Ebay. **HC06**, 2015. Disponível em: <<http://www.ebay.com/itm/Wireless-Serial-4-Pin-Bluetooth-RF-Transceiver-Module-HC-06-RS232-With-backplane-/200924726178>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Aliexpress. **HC06**, 2015. Disponível em: <<http://pt.aliexpress.com/item/De-alta-qualidade-HC-06-sem-fio-Bluetooth-m-dulo-Serial-gr-tis-frete/32332717087.html?s=p>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Amazon. **HC06**, 2015. Disponível em: http://www.amazon.com/JBtek-Bluetooth-Converter-Serial-Communication/dp/B00L08GA4Q/ref=sr_1_1?s=electronics&ie=UTF8&qid=1433022134&sr=1-1&keywords=HC-06> Acesso em: 12 jun. 2015.

Amazon. **SPBT2632C1A**, 2015. Disponível em: <http://www.amazon.com/Bluetooth-802-15-1-Modules-Class1-128bit/dp/B00HKI9DA8/ref=sr_1_1?s=electronics&ie=UTF8&qid=1433022286&sr=1-1&keywords=SPBT2632C1A> Acesso em: 12 jun. 2015.

Ebay. **SPBT2632C1A**, 2015. Disponível em: http://www.ebay.com/itm/STMICROELECTRONICS-SPBT2632C1A-AT2-BLUETOOTH-MODULE-CLASS-1-/181640855105?pt=LH_DefaultDomain_3&hash=item2a4aa37e41> Acesso em: 12 jun. 2015.

Aliexpress. **SPBT2632C1A**, 2015. Disponível em: <<http://pt.aliexpress.com/item/KINO-SPBT2632C1A-AT2-BLUETOOTH-MODULE/32311103814.html>> Acesso em: 12 jun. 2015.

Amazon. **nRF24L01+**, 2015. Disponível em: <http://www.amazon.com/nRF24L01-Wireless-Transceiver-Arduino-Compatible/dp/B00E594ZX0/ref=sr_1_1?s=electronics&ie=UTF8&qid=1433022465&sr=1-1&keywords=nRF24L01%2B> Acesso em: 12 jun. 2015.

Ebay. **nRF24L01+**, 2015. Disponível em: <http://www.ebay.com/itm/2Pcs-Wireless-Transceiver-Module-NRF24L01-2-4GHz-Antenna-For-Arduino-New-/221481797303?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item33915806b7> Acesso em: 12 jun. 2015.

Aliexpress. **nRF24L01+**, 2015. Disponível em: <<http://pt.aliexpress.com/item/Alientek-2-4g-wireless-module-nrf24l01-stm32-microcontroller-development-board-51-free-shipping/1627349314.html>> Acesso em: 12 jun. 2015.

APÊNDICE 3 – Avaliação de Custo LEDs e Display 16x2

As informações de custo referentes ao módulo display 16x2 utilizado neste trabalho foram extraídas de uma pesquisa de preços. A pesquisa atribuiu um custo médio a dois componentes: o *display* 16x2 e LEDs 10mm. A seguir são apresentados os endereços eletrônicos visitados para coleta de preços.

DX.COM. LCD 16x2 JHD, 2016. Disponível em: < <http://www.dx.com/pt/p/16-x-2-character-lcd-display-module-with-blue-backlight-121356#.WBIBhdUrLIU>> Acesso em 01 nov. 2016.

Aliexpress. **16x2 JHD**, 2016. Disponível em: < https://pt.aliexpress.com/item/LCD1602-LCD-monitor-1602-5V-Blue-Screen-White-Code-Blacklight-16x2-Character-LCD-Display-Module-HD44780/32455156175.html?spm=2114.30010508.3.38.Fq8Vsg&s=p&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_2_10091_10090_10088_422_10089,searchweb201603_1&btsid=77ebaec-0a04-466f-b455-683df3e36308> Acesso em 01 nov. 2016.

Aliexpress. **LED 10mm, 2016..** Disponível em: < https://pt.aliexpress.com/item/100Pcs-10mm-20mA-Blue-Red-Yellow-Green-Round-Light-Emitting-LED-Diode-Assorted-Kit-5-Colors/32676543597.html?spm=2114.30010508.3.77.J0O30C&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_2_10091_10090_10088_422_10089,searchweb201603_1&btsid=c647a160-1ce4-4694-93d9-1e510d298eb9> Acesso em: 01 nov. 2016.

DX.COM. LED 10mm, 2016. Disponível em: < <http://www.dx.com/pt/p/wlxy-wl-5110-10mm-led-emitting-diode-set-red-green-white-yellow-301046>> Acesso em 01 nov. 2016.