

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LAÍS MONIQUE MENDES SALLES

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE
MEDIÇÃO DE RUÍDO COM BASE NO SISTEMA *OpenWrt***

**Ilha Solteira
2017**

LAÍS MONIQUE MENDES SALLES

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE
MEDIÇÃO DE RUÍDO COM BASE NO SISTEMA *OpenWrt***

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Especialidade: Mecânica dos Sólidos.

Prof. Dr. JOÃO ANTÔNIO PERREIRA
Orientador

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S168d Salles, Laís Monique Mendes.
Desenvolvimento de um dispositivo de medição de ruído com base no sistema *OpenWrt* / Laís Monique Mendes Salles. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
81 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2017

Orientador: João Antônio Perreira
Inclui bibliografia

1. Dispositivo de medição de ruído. 2. Nível de pressão sonora. 3. Arduino. 4. Sistema *OpenWrt*.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Desenvolvimento de um dispositivo de medição de ruído com base no sistema OpenWrt

AUTORA: LAÍS MONIQUE MENDES SALLES

ORIENTADOR: JOÃO ANTONIO PEREIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECANICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


PROFESSOR ADJUNTO ADAILTON SILVA BORGES
Câmpus de Cornélio Procopio / UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Ilha Solteira, 31 de agosto de 2017

DEDICO

Ao meu pai Valentim Salles e a minha mãe Claudinéia Fernandes Mendes Salles, que sempre me apoiaram com muito carinho, orações e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar forças para enfrentar essa jornada e as dificuldades que tive ao longo do tempo.

Agradeço imensamente ao meu pai, Valentim; a minha mãe, Claudinéia; e ao meu irmão Lucas, pelo apoio, confiança, orações, amor e carinho que me ajudaram a chegar até o final.

Agradeço os professores e técnicos da instituição pela dedicação e conhecimento prestado. Principalmente, o meu orientador, João Antônio Perreira pela compreensão, paciência, dedicação e aconselhamentos não só acadêmicos, mas de vida.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Fundação CAPES) que financiou a realização desse projeto por 24 meses, a Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira (FEPISA) pela contribuição financeira e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) pelo apoio administrativo.

Agradeço aos amigos que aqui fiz, que me apoiaram desde o princípio: as meninas da república DNA e a família Brauna que me abrigaram nas primeiras semanas; a todos os moradores do Ilhéus CCX, que se tornaram uma família e grandes amigos que sempre vou levar comigo, em especial Camilo Volpe, Jorge Eduardo, Felipe Coleone, Matthias Zerza, Lumena Besson, Tiago Torres, Rafael Assumpção, Rafael Mattei e Rômulo Rodrigues; aos amigos do PPGEM pela cumplicidade e ajuda nas atividades desse projeto, em especial João Antônio Mastrangi, Camilo Carranza, Daniel Obata e Luis Gustavo Villani; e ao grupo Denúncia, em especial Amanda Silva, Eduardo Bonfá, Heitor Barradas, Luan Leite e Ricardo Gonçalves, pela forte amizade criada, pelas aventuras e histórias que fizeram a trajetória mais feliz e amena, os quais se tornaram amigos para vida toda.

Agradeço a família MGT, principalmente ao sensei Glauco Almeida pelo carinho e confiança.

Agradeço aos amigos Cinthia Lisbôa, Fernanda Buainain, Isabela Ervolino, Naiara Salvatierre, Naiara Mendes, Rafael Neves e Patrícia Umeda pelo companheirismo, conselhos e confidências neste período e em toda a vida, e por me lembrarem que eu sou capaz sempre.

RESUMO

O presente trabalho tem como proposta o desenvolvimento de um dispositivo de medição de ruído utilizando componentes e dispositivos eletroeletrônicos de baixo custo para uso no monitoramento de ruído em ambientes de trabalho. No desenvolvimento e implementação do sistema de medição foram estudadas duas propostas de dispositivos, uma com base na plataforma *Arduino* e outra com base no sistema *OpenWrt* em conjunto com um roteador. Os circuitos de captação do ruído foram desenvolvidos com base em circuitos de captação de sinais já existentes, identificando o que melhor se adaptou a proposta. O sistema de medição contempla ainda a proposta de operação remota, por meio da telemetria, de forma que o operador possa controlar as medições sem estar no local. Para isso, foi utilizado um módulo *Wireless* no *Arduino* e o próprio roteador usado sistema *OpenWrt*. Os dispositivos de medição propostos podem ser usados tanto para o monitoramento do ruído, como para o registro dos níveis de ruído de forma contínua ou em intervalos de tempo predefinidos, possibilitando assim, a obtenção do histórico do ambiente. Para avaliação de desempenho dos dispositivos foi utilizado um sistema de medição de ruído comercial e as especificações e requisitos de normas técnicas. Os resultados mostraram que o dispositivo implementado com base no sistema *OpenWrt* apresentou um melhor desempenho, principalmente, em relação sua taxa de amostragem que é maior, não necessitando ajustes e a busca de soluções para aumentar da taxa de amostragem verificados no *Arduino*.

Palavra-chave: Dispositivo de medição de ruído. Nível de pressão sonora. *Arduino*. Sistema *OpenWrt*.

ABSTRACT

The present work proposes the development of a noise measurement device, using components and electronic devices of low cost for use in the monitoring of noise in work environments. In the implementation of the measuring system were studied two proposals of devices one based on the platform Arduino and another based on the OpenWrt system together with a router. The noise pickup circuits were developed based on existing signal pickup circuits, identifying what best suited the proposal. The measurement system also contemplates the proposal of remote operation, by telemetry, so that the operator can control the measurements without being in place. For this, a wireless module was used in the Arduino and the router itself in the OpenWrt system. The proposed devices can be used both for noise monitoring and recording of noise levels continuously or at predefined time intervals, thus enabling the achievement of environmental history. For performance evaluation of the devices a commercial noise measurement system was used and the specifications and requirements of technical standards. The results showed that the system implemented based on the OpenWrt system presented a better performance, mainly in relation to its sampling rate that is higher, requiring no adjustments and the search for solutions to increase the sampling rate verified in the Arduino.

Keywords: Noise sensor. Sound pressure level. Arduino. OpenWrt system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturação da placa <i>Arduino Uno</i>	22
Figura 2 - Roteador portátil: <i>TP-Link: TL-MR3020</i>	25
Figura 3 - Representação gráfica de um sinal sonoro.....	30
Figura 4 - Representação gráfica de um sinal analógico.....	32
Figura 5 - Representação gráfica de um sinal digital.....	32
Figura 6 - Anatomia do ouvido humano.....	35
Figura 7 - Representação gráfica de curvas isoaudíveis.....	37
Figura 8 - Curvas de ponderação A, B, C e D.....	38
Figura 9 - Fluxograma do dispositivo de medição desenvolvido.....	44
Figura 10 - Sensor de som KY-038.....	45
Figura 11 - Microfone de eletreto Panasonic WM-55A.....	46
Figura 12 - Microfone dinâmico, MIC-100.....	47
Figura 13 - Circuito de amplificador/compensador.....	48
Figura 14 - Dispositivo baseado no <i>Arduino</i>	51
Figura 15 - Rede Xbee.....	53
Figura 16 - Dispositivo baseado no <i>OpenWrt</i>	54
Figura 17 - Interface <i>PuTTY</i> de configuração.....	55
Figura 18 - Área de acesso ao <i>OpenWrt</i> pelo <i>PuTTY</i>	55
Figura 19 - Teste com osciloscópio no sistema <i>OpenWrt</i>	57
Figura 20 - Interface gráfica do dispositivo de medição de ruído.....	60
Figura 21 - Filtro de ponderação A em escala Decibel.....	61
Figura 22 - Nível de pressão sonora de Lanman.....	63
Figura 23 - Nível de pressão sonora do dispositivo desenvolvido.....	64
Figura 24 - Bancada utilizada para obtenção da constante de calibração do dispositivo.....	65
Figura 25 - Teste para determinação da constante C do dispositivo baseado em <i>Arduino</i>	66
Figura 26 - Teste para determinação da constante C o dispositivo baseado no <i>OpenWrt</i>	67
Figura 27 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>Arduino</i> para uma frequência de 100 Hz.....	69

Figura 28 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>Arduino</i> para uma frequência de 500 Hz.....	69
Figura 29 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>Arduino</i> para uma frequência de 1000 Hz.....	70
Figura 30 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>Arduino</i> para o sinal de ruído de um caminhão de lixo em funcionamento.....	70
Figura 31 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>OpenWrt</i> para uma frequência de 100 Hz.....	72
Figura 32 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>OpenWrt</i> para uma frequência de 500 Hz.....	72
Figura 33 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>OpenWrt</i> para uma frequência de 1000 Hz.....	73
Figura 34 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em <i>OpenWrt</i> para o sinal de ruído de um caminhão de lixo em funcionamento.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custos dos dispositivos de medição de ruído.....	58
Tabela 1 - Medidas obtidas nos testes com o dispositivo desenvolvido com o <i>Arduino</i> e o sistema comercial <i>Solo Black</i>	71
Tabela 2 - Medidas obtidas nos testes com o dispositivo desenvolvido com o <i>OpenWrt</i> e o sistema comercial <i>Solo Black</i>	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Corrente Alternada
A/D	Analógica-digital
D/A	Digital-analógica
CC	Corrente Contínua
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DC	Corrente Direta
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPROM	<i>Erasable Programmable Read Only Memory</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
GCC	<i>GNU Compiler Collection</i>
GND	<i>Graduated Neutral Density Filter</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>
IDE	<i>Arduino Integrated Development Environment</i>
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IP	<i>Internet Protocol</i>
LCD	Display de Cristal Líquido
LED	Diodo Emissor de Luz
NBR	Normas Brasileiras
NR	Normas Regulamentadoras
NPS	Nível de Pressão Sonora
MVC	<i>Model View Controller</i>
PROM	<i>Programmable Read Only Memory</i>
RBC	Rede Brasileira de Calibração

RFC	<i>Request for Comments</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RMS	Medida Global Simples
ROM	<i>Read Only Memory</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

dB	Decibel
$dB(A)$	Decibel na ponderação A
$X(t)$	Sinal de entrada
$P(t)$	Pressão sonora
T	Tempo
P	Pascal
P_{ref}	Pressão sonora de referência
D	Dose diária de ruído
C_i	Tempo real de exposição a um nível de pressão sonora
T_i	Tempo total permitido a um nível de pressão sonora
L_{eq}	Nível sonoro equivalente
R	Resistência de realimentação
$V_{saída}$	Amplitude do sinal de saída
V_{ent}	Amplitude do sinal de entrada
f_s	Frequência de amostragem
N	Comprimento da sequência
Δt	Intervalo de observação
Δf	Resolução da frequência
C	Constante de calibração
ϵ_x	Energia do sinal
$X[K]$	Frequência da amostra
$\alpha A(f)$	Filtro de ponderação A

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO.....	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	PLATAFORMA ARDUINO E SISTEMA OPENWRT EM ROTEADORES	21
2.1	PLATAFORMA ARDUINO	21
2.2	SISTEMA OPENWRT EM ROTEADORES	24
3	CONCEITOS BÁSICOS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS E MEDIDAS DE RUÍDO	30
3.1	PROCESSAMENTO DE SINAIS	30
3.2	CONVERSÃO ANALÓGICA-DIGITAL	32
3.3	CONCEITOS DE SOM E RUÍDO	33
3.4	O SOM E OS SERES HUMANOS	34
3.4.1	O Ouvido Humano	35
3.4.2	Curvas Audiométricas	36
3.5	MEDIDOR DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORO	39
4	DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE RUÍDO	41
4.1	METODOLOGIA	41
4.2	MICROFONES	44
4.2.1	Circuito Amplificador/Condensador	47
4.3	DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO COM BASE NA PLATAFORMA ARDUINO	50
4.4	DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO COM BASE NO OPENWRT.....	53
4.5	CUSTOS DOS COMPONENTES DOS DOIS DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO	57
5	AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE RUIDO	59
5.1	INTERFACE GRÁFICA - AMBIENTE MATLAB	59
5.2	TESTE DE VALIDAÇÃO DO CODIGO IMPLEMENTADO	63
5.3	DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO C	64
5.3	MEDIÇÃO DE SINAIS DE TOM PURO E O RUIDO PRODUZIDOS POR UM GERADOR DE SINAL	68
6	CONCLUSÃO	76
	REFERENCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A audição é de fundamental importância na vida do homem, ela permite o indivíduo perceber o mundo ao seu redor, trazendo várias sensações, como de alegria e prazer através de uma boa música ou os sons tranquilos e agradáveis da natureza, ou até mesmo sensações de irritação, como por exemplo, com o ruído/barulho de uma britadeira. Além disso, a audição é um importante meio de comunicação entre as pessoas que se dá a partir dos sons. Os sinais sonoros são ondas de pressão que possuem diversas utilidades no cotidiano do homem, por exemplo: comunicação entre as pessoas, alerta de perigo, sinais de alarmes, entre outros.

Apesar de todas as qualidades do som, em determinados momentos ele pode incomodar, quando isso acontece passa a ser chamado de ruído. O ruído no senso comum é qualquer barulho indesejado, já para eletrônica qualquer corrente elétrica ou tensão indesejada observado na medição de um sinal elétrico. O incômodo causado pelo ruído pode variar de pessoa para pessoa, além disso, também existem outros fatores que influenciam esse efeito, como o local, o tempo de exposição e etc. Por exemplo, o ronco do motor de um carro de corrida provavelmente soa como música para o ouvido de um piloto, porém para uma pessoa que está próxima e não gosta de corridas pode soar como um ruído irritante. O ruído também pode ser útil como um indicador do bom funcionamento de máquinas e equipamentos os quais possuem um dado ruído característico, caso ocorra alguma alteração do ruído, essa alteração pode indicar um mau funcionamento e conseqüentemente, demandando eventual manutenção.

O ruído está cada dia mais presente no cotidiano das pessoas, seja em locais abertos ou fechados o ruído incomoda, o ruído do tráfego de veículos nas ruas, o ruído dos aeroportos, o ruído na indústria e ambientes de trabalho em geral é um problema. O estudo do ruído e efeitos acústicos vêm aumentando consideravelmente, principalmente porque as novas demandas e exigências desejam projetos de ambientes cada vez mais silenciosos e confortáveis para o homem.

O primeiro relato de estudo de acústica começou já com Pitágoras, há cerca de 2.500 anos atrás, onde ele estudou intervalos musicais e suas relações. Também há passagens bíblicas que comprovam a utilização de conhecimentos acústicos naquela época. Na época também havia relatos de poluição sonora, gerados pelas cataratas do Rio Nilo. O som gerado por elas deixavam alguns moradores da região surdos.

No início de século XX, a preocupação acústica era com o som dos teatros e a acessibilidade das vozes dos atores, o que estimulou o estudo da acústica arquitetônica. A partir dos anos 30 do século XX, surgiram vários ramos da acústica: a Acústica Fisiológica, a Psicoacústica, a Acústica Médica e a Acústica Arquitetônica.

Fletcher e Munson apud Nepomuceno (1994), realizaram estudos sobre a sensibilidade do sistema auditivo com relação as várias frequências audíveis, que geraram as Curvas Isoaudíveis, as quais são utilizadas para equalizar, através de uma ponderação, sons e ruídos nas várias frequências, ilustrando sua equivalência em relação à percepção auditiva pelo ouvido humano. O processo de industrialização a partir dos anos 50 do século passado aumentou fortemente, trazendo consigo o aumento populacional das grandes cidades e como consequência, o aumento dos problemas sócios ambientais. Assim como os outros tipos de poluição (poluição do ar, do solo e da água), a poluição sonora, causada pela indústria, agricultura mecanizada, o fluxo de movimentação e atividades nas grandes cidades afetam a qualidade de vida das pessoas.

O ruído assim como qualquer outro sinal sonoro é o efeito de uma variação na pressão de um determinado meio elástico. Quando essa variação é muito grande ela pode, inclusive, causar grandes danos, comprometer a estrutura de um imóvel, danificar componentes de um sistema, mas de forma geral o pior dano causado pelo ruído é prejudicar o aparelho auditivo do ser humano, o ouvido. Para impedir os danos causados pelo ruído é preciso conhecer e medir o ruído. Pensando nisso há leis de controle de ruído, como a Lei das Contravenções Penais, no artigo 42, a qual prevê que perturbar alguém, o trabalho ou o sossego alheio, por meio do uso excessivo de instrumentos sonoros ou sinais acústicos, ocasiona a pena de prisão de 15 dias a 3 meses, ou multa. Ainda no Código de Trânsito Brasileiro, no artigo 228, é estabelecido que utilizar no veículo equipamento de som com volume ou frequência não autorizadas pelo CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) é infração grave, com multa e retenção do veículo para regularização.

Além da preocupação com o bem estar da população, ainda existe outra preocupação social em relação ao ruído. É a preocupação com a saúde e a segurança no trabalho, o ruído pode ser um grande vilão na vida profissional de um trabalhador. O ruído é considerado como um dos maiores problemas de poluição ambiental, despertando assim cada dia mais o interesse por estudos e projetos na área de acústica (SOUZA, 2012). No Brasil, a poluição sonora industrial tem crescido muito nas últimas décadas, causando gravíssimos prejuízos físicos e psicológicos ao homem e abalando o meio ambiente sonoro (MACHADO, 2001). Pensando em garantir o cuidado com a ergonomia do

trabalhador o país criou as Normas Regulamentadoras (NR), criadas pela Ministério do Trabalho e Emprego, de caráter obrigatória e as Normas Brasileiras (NBR) estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de caráter voluntário e fundamentada no consenso da sociedade. Neste contexto existem vários problemas que afetam a saúde e segurança do trabalhador, de acordo com a NR 15 – Atividades de Operações Insalubres, a exposição ao ruído é um deles.

De acordo com as normas e regulamentação dos órgãos competentes, uma empresa deve garantir que o seu trabalhador não será exposto a um nível de ruído maior que o limite de tolerância estabelecido por normas durante a sua vida laboral. A norma NR-15 estabelece os valores máximos de exposição diária permitida para um determinado nível de ruído.

O ruído não só interfere na qualidade do trabalho, podendo gerar até mesmo a perda da audição, como tem a capacidade de aumentar a carga de trabalho global de um trabalhador durante uma determinada tarefa e assim afetar o seu desempenho (AYBEK; KAMER; ARSLAN, 2010). Segundo Fernández et al. (2009), os trabalhadores que são expostos à ambientes com níveis de ruído superiores a 85 dBA podem adquirir doenças como nódulos, perda da voz e problemas nas cordas vocais causadas pela tentativa de se comunicar. Além de mascarar a fala, o ruído pode afetar os sons de alarme, prejudicando a comunicação geral no ambiente laboral (NOWEIR; ZYTOON, 2013). Por tanto, controlar, medir e conhecer o nível de ruído que o trabalhador está exposto no seu ambiente de trabalho é fundamental para melhorar ou manter a eficiência e a saúde no ambiente de trabalho.

Por lei uma empresa deve fornecer pleno cumprimento à legislação vigente, a qual exige a elaboração de programa de saúde ocupacional relacionado ao controle dos riscos físicos, químicos, biológicos e ergonômicos, dentre eles está o ruído. O que torna necessário e urgente que as empresas adotem um Sistema de Gestão de Ruído Ocupacional para atender a todas as exigências estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (Portaria nº 3214 de 08 de junho de 1978; NR1; NR6; NR7; NR9; NR15; NR17), bem como gerenciar, de forma integrada, todos os procedimentos e subprogramas decorrentes.

O ruído excessivo em um ambiente laboral é grave, o trabalhador que é exposto todos os dias, por um tempo considerável ao ruído, possivelmente se torna estressado, além disso, o ruído pode dificultar a comunicação entre os trabalhadores do ambiente, prejudicando o rendimento do trabalho e tornando o ambiente de trabalho bastante

cansativo. Ainda há a questão de cumprimento das leis e normas de saúde e segurança do trabalho, o seu não cumprimento pode ocasionar ações orientadas, corretivas e/ou multas por violação da legislação ou até mesmo interrupção das atividades da empresa.

Para garantir a saúde do trabalhador com relação ao ruído, as empresas devem monitorar e controlar o ruído no ambiente, para isso é necessário medir e mapear os locais mais ruidosos do ambiente o que permitiria monitorar o tempo de exposição dos funcionários ao ruído. Monitorando o ambiente, as empresas podem gerenciar melhor os efeitos do ruído na saúde do trabalhador e ainda, a partir do histórico dos níveis de ruídos gerados, estabelecer ações e melhorias para mitigar os seus efeitos.

Para a medição do ruído as normas exigem equipamentos com características específicas e certificados. Isso acaba dificultando o acesso a esse tipo de equipamento para empresas de pequeno porte ou até mesmo empresas maiores que tenham uma restrição de investimento nesse tipo de equipamento. Muitas empresas optam por contratar empresas especializadas para medir os níveis de ruído de tempos em tempos, ao invés de monitorar e acompanhar a evolução dos ruídos do local e estabelecer uma política de gestão do ruído.

Este trabalho de pesquisa tem como proposta desenvolver um dispositivo de medição de ruído utilizando componentes e dispositivos eletroeletrônicos de baixo custo que possa ser instalado e utilizado para o monitoramento contínuo do ruído nos diferentes ambientes de trabalho. Desta forma a empresa poderia realizar o monitoramento e o registro dos níveis de ruído do ambiente de forma contínua ou em intervalos de tempo definidos, possibilitando o histórico e a definição de comparativos, a fim de estabelecer o acompanhamento das condições acústicas do ambiente. Isso facilitaria a tomada de decisões quanto ao uso de aparelho de proteção, a necessidade de reduzir o tempo de exposição do trabalhador à determinado local ou até mesmo uma melhora na acústica arquitetônica do local. Ou seja, a empresa teria condições de avaliar a melhor atitude a se tomar para mitigar os problemas com ruído, podendo assim obter um Sistema de Gestão de Ruído Ocupacional eficiente.

No levantamento bibliográfico realizado envolvendo a análise de diferentes trabalhos relacionados com o conforto acústico, principalmente, de ambientes fechados, foram encontrados poucos trabalhos sobre sistemas alternativos de medição ruído. No trabalho de Setúbal (2008) é apresentado o desenvolvimento de um sistema de medição com baixo custo, o qual indica nível baixo, médio e alto de ruído, através de luzes. No caso a luz verde indica um nível baixo de ruído, a luz amarela indica um nível médio de

ruído e a luz vermelha indica um nível alto de ruído. A indicação qualitativa do nível de ruído é importante, entretanto, não permite conhecer o nível de ruído exato que a pessoa está exposta, o que dificulta a definição do tempo de exposição da pessoa ao ruído. Por exemplo, se o ruído é de 100 dB, o indivíduo pode permanecer no local por até 1 hora, já se o ruído é de 102 dB, o mesmo pode permanecer até 45 minutos. No ambiente de trabalho, é interessante conhecer o nível exato do ruído e não somente se é um nível baixo, médio ou alto, pois assim, a empresa teria subsídios para definir melhor atitude a ser tomada: diminuir o tempo de exposição, utilizar EPIs ou atuar diretamente para reduzir o ruído.

No levantamento bibliográfico também foram encontrados aplicativos de celular que realizam medição de ruído, um deles foi o *Noisetube*, o qual é um aplicativo bastante interessante usado para medir o ruído urbano (NOISETUBE, 2015). É um projeto de pesquisa iniciado em 2008 na *Science Lab Sony Computer* em Paris e atualmente mantido pelo Laboratório de *Software Idiomas na Vrije Universiteit Brussel* com o intuito de verificar o nível de ruído das cidades. Porém o uso de celular não é um dispositivo ideal para o uso no ambiente industrial, visto que muitas indústrias proíbem o uso de celulares. Além disso, o sensor utilizado em celulares não costumam ter um bom desempenho em medições em bandas de frequências muito baixas ou muito altas.

Neste contexto, esse trabalho se justifica pela necessidade de desenvolvimento de um sistema de medição de ruído com nível de exatidão compatível para uso em ambiente industrial que seja de custo acessível. Seja capaz de realizar um monitoramento contínuo do ambiente, possibilitando o armazenamento das medições e a definição dos históricos de ruído. Por fim, o trabalho traz ainda uma proposta de operação remota do dispositivo de medição, por meio da telemetria, em que o operador pode controlar as medições sem a necessidade de se estar no local. Neste caso, o usuário poderia monitorar e acompanhar, através de um computador, os níveis de ruído nos locais mais críticos, avaliar e gerenciar os níveis de ruído no ambiente visando estabelecer diretrizes para definição da estratégia de gestão do ruído ocupacional da empresa.

A proposta do trabalho, conforme apresentado anteriormente, é o desenvolvimento de um sistema de medição que contempla a proposta de operação remota, por meio da telemetria, de forma que o operador possa controlar as medições sem estar no local. Duas propostas de dispositivo foram discutidas e avaliadas, uma com base na plataforma *Arduino* e outra com base no uso do sistema *Openwrt* operando conjuntamente com um roteador que é utilizado para o gerenciamento e controle dos

microfones e sistema de armazenamento de dados. Na primeira proposta os componentes utilizados foram o *Arduino*, o módulo *Wireless* e um computador para o armazenamento e leitura dos dados. Já na segunda proposta foi utilizado um roteador com o sistema *OpenWrt*, um *pen drive* que é utilizado como uma extensão da memória do roteador (memória ROM) e um computador para armazenamento e processamento dos dados. Além da plataforma *Arduino* e do sistema *Openwrt*, foram utilizados e/ou adaptados códigos, bibliotecas e procedimentos disponibilizados pelos fabricantes e desenvolvedores destas duas plataformas. Os *sites* do *Arduino* (ARDUINO, 2017) e do *Openwrt* (OPENWRT, 2017) foram fontes de consultas permanentes no desenvolvimento do trabalho. Para o uso do roteador como dispositivo de telemetria do sistema de medição foi necessário alterar o sistema operacional do roteador, programando-o para fazer as novas operações de interesse. Já no módulo *Wireless* não foram necessárias alterações, bastou conectar o módulo no microcontrolador *Arduino*.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um dispositivo de medição utilizando componentes eletros eletrônicos de baixo custo para monitoramento de ruído em ambiente de trabalho, com uma proposta de operação remota por meio da telemetria, capaz de medir os níveis de ruído, bem como, armazenar os dados coletados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Utilizar dispositivos eletrônicos e eletroacústicos de baixo custo para o desenvolvimento do dispositivo de medição do nível de ruído;
- b) Utilizar dispositivos eletrônicos convencionais para realizar o armazenamento dos dados coletados, a fim de se obter o histórico do ambiente;
- c) Discutir a utilização de dispositivos eletrônicos tipo roteador para operação remota do dispositivo de medição por telemetria.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em 6 capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução do tema proposto, assim como sua justificativa, objetivos e organização. No segundo capítulo é explicada a plataforma *Arduino*, assim como o sistema *OpenWrt* utilizado em roteadores que será utilizado na montagem do dispositivo de medição. Já no terceiro capítulo são discutidos os conceitos básicos de processamentos de sinais, em seguida são discutidos os conceitos de som e ruído, o funcionamento do ouvido humano e a relação do som com os seres humanos, nível de pressão sonora e medidor de nível de pressão sonora. No quarto capítulo é relatado o desenvolvimento e implementação do dispositivo de medição de ruído. Primeiramente, é discutida a fase de captura do sinal de áudio, depois é apresentada uma discussão a respeito dos microfones utilizados e por fim o procedimento de cálculos e o desenvolvimento da interface gráfico. No quinto capítulo é feita a avaliação do sistema medição utilizando dados de simulação, dados experimentais e finalmente é feita uma comparação com um sistema comercial. Finalizando, no sexto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho.

2 PLATAFORMA ARDUINO E SISTEMA OPENWRT EM ROTEADORES

Neste capítulo é discutido o funcionamento da plataforma *Arduino* e o sistema *OpenWrt* utilizado em roteadores. Ambos são a base eletrônica para o desenvolvimento do presente trabalho.

2.1 PLATAFORMA ARDUINO

O *Arduino* foi criado pelo professor Massimo Banzi, em 2005 no *Interaction Design Institute* na cidade de Ivrea, na Itália. Banzi buscava uma alternativa barata e fácil para os alunos de design conseguissem trabalhar com tecnologia. O *Arduino* surgiu em uma conversa com David Cuartielles, pesquisador da Universidade de Malmö, na Suécia, o qual também buscava uma solução para tal problema. Juntos foram capazes de desenvolver um microcontrolador mais barato e mais simples de manusear do que os produtos já existentes no mercado, facilitando o trabalho dos estudantes de arte e design. A placa foi desenhada por David Cuartielles e o *software* foi programado por David Mellis; o engenheiro, Gianluca Martino, também participou do projeto, produzindo um lote inicial de duzentas placas.

O *Arduino* é uma plataforma de prototipagem de código aberto com base em *hardware* e *software* de fácil uso. O *hardware* é formado por um processador e suporte embutido de entrada/saída. O *software* consiste de uma linguagem de programação padrão e do *bootloader* que inicia o sistema operacional da placa (MCROBERTS, 2011). Em outras palavras o *Arduino* é um microcontrolador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre dispositivos externos conectados a ele. É uma plataforma de computação física, ou seja, um sistema que pode interagir com o ambiente por meio de *hardware* e *software*.

Este microcontrolador foi criado para atender as necessidades de designer e artistas, porém a sua popularidade foi tão grande que atualmente é utilizado por estudantes, amadores, programadores e profissionais.

O *Arduino* é formado por um elemento de *hardware*, a placa *Arduino*; e um elemento de *software* realizado no computador, o ambiente de desenvolvimento integrado do *Arduino*.

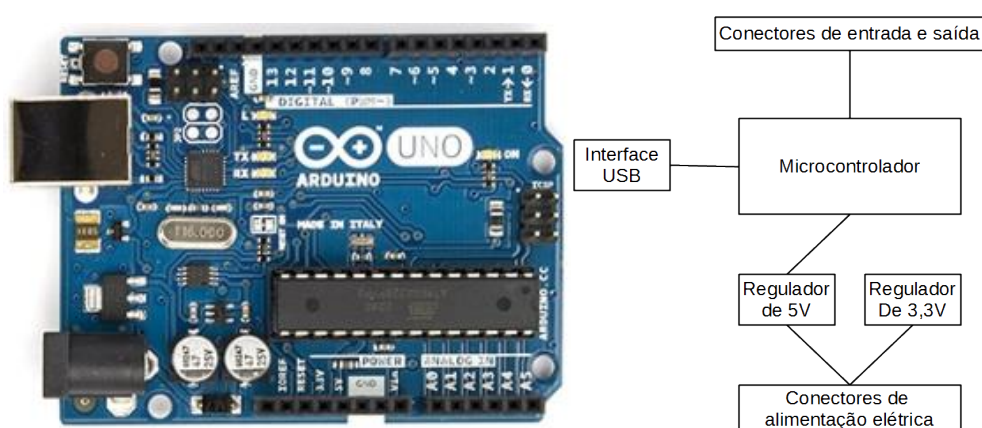
De acordo com Banzi e Shiloh (2015, p. 21)

A filosofia do *Arduino* concentra-se em desenvolver projetos, e não em falar sobre eles. Ela representa uma busca constante por meios mais rápidos e poderosos de criarmos protótipos melhores. Exploramos muitas técnicas de prototipagem e desenvolvemos formas de pensar cada vez mais práticas.

A placa *Arduino* nada mais é que um circuito de pequeno porte constituído de uma placa microcontroladora. Existem alguns modelos de placas, todas baseadas em um microprocessador de 8 bits Atmel AVR *reduced instruction set computer* (RISC). A primeira placa criada possuía um microprocessador ATmega8 com uma velocidade de clock de 16 MHz e memória flash de 8 KB.

Neste trabalho foi utilizada a placa *Arduino Uno*, de acordo com Evans, Noble e Hochenbaum (2013), ela é a melhor placa para começar a trabalhar com eletrônica e codificação. É a placa recomendada para um primeiro contato com a plataforma, sendo a placa mais robusta para se começar a manusear. O *Uno* é uma placa de microcontrolador baseado no ATmega328P. Possui 14 pinos digitais de entrada/saída, 6 entradas analógicas, um cristal de quartzo 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP e um botão de reiniciar. Ela contém tudo o que é necessário para dar suporte ao microcontrolador; basta conectá-la a um computador por meio de cabo USB ou ligá-la com um adaptador de corrente alternada-corrente contínua (AC-CC) ou bateria para começar. A Figura 1a ilustra uma placa oficial do *Arduino Uno* e enquanto a Figura 1b mostra a anatomia da placa.

Figura 1 - Estruturação da placa *Arduino Uno*



(a) Interface física da placa *Arduino Uno*

Fonte: Site oficial do *Arduino*

(b) Anatomia da placa *Arduino Uno*

Fonte: Monk (2015)

A placa *Arduino* é somente um conjunto de componentes, para a plataforma *Arduino* realizar algum trabalho é necessário o *Arduino Integrated Development*

Environment (IDE) do *Arduino*. O IDE é o Ambiente de Desenvolvimento Integrado do *Arduino* que possui tudo que é preciso para programá-lo, ele ainda possui diversos exemplos de programas que explicam como conectar e comunicar com alguns dispositivos, como LEDs, LCDs e sensores.

O IDE é um programa de computador que permite a execução de códigos para o *Arduino* em uma linguagem simples criada a partir da linguagem *Processing*, encontrada no endereço <https://www.processing.org>. O código desenvolvido é transcrito para a linguagem C e transmitido para o compilador *avr-gcc*, que é um *software* de código aberto que transcreve o código para uma linguagem que o *Arduino* é capaz de executar.

O *software* para o *Arduino*, é um código aberto e pode ser baixado gratuitamente do endereço <http://Arduino.cc/en/Main/Software>. No site há versões do IDE para *Windows*, *Mac OS X* e *Linux*.

A familiarização com IDE é fundamental para se escrever um código. Um bloco de códigos, no universo do *Arduino*, é chamado de *sketch*, o qual disponibiliza ao *Arduino* uma lista de instruções que esboça a atividade para a plataforma. O IDE facilita a criação de projetos no *Arduino*, minimizando sua complexidade.

De acordo com Banzi e Shiloh (2015), qualquer projeto construído utilizando o *Arduino* segue um padrão, o chamado dispositivo interativo. Este dispositivo é um circuito eletrônico capaz de detectar o ambiente que lhe cerca por meio de sensores. Para processar a informação recebida dos sensores o dispositivo utiliza um procedimento que é descrito no *software*. O dispositivo ainda pode interagir com o mundo por meio de atuadores. Sensores e atuadores são transdutores que convertem um dado físicos ou químicos (GARCIA, 2005).

Tooley (2007) explica que os sensores são dispositivos sensíveis a uma dada variável de interesse que a converte em uma outra variável física, geralmente, uma variável elétrica. São utilizados para gerar um sinal de entrada para um sistema de medição, instrumento ou um sistema de controle (temperatura, pressão, velocidade, etc.) que possui a capacidade de fornecer uma saída mensurável dessa variável. No caso do *Arduino* um sensor é uma entrada física para o circuito. Já Vahid (2008) afirma que atuadores são dispositivos usados para converter um sinal elétrico na forma de fenômeno físico. No *Arduino*, um atuador realiza uma ação, ao invés de reagir a algum elemento do ambiente, ele é uma saída física do circuito. Por exemplo, um LED converte a corrente elétrica em luz, um alto-falante converte a corrente elétrica em som.

Para utilização da plataforma é interessante entender como funciona o código computacional do *Arduino*. Primeiramente é necessário explicar que a placa possui diversos conectores, usados para ligar sensores e atuadores. Estes conectores são divididos em pinos de entrada digital, entrada analógica, saída digital e saída analógica. As entradas digitais permitem ler as informações dos sensores, enquanto que as saídas digitais permitem controlar os atuadores. Já os pinos de entrada analógica permitem a leitura de medidas de voltagem nos sensores e os pinos de saída analógica são capazes de fornecer saídas analógicas para os atuadores. Para que isso seja possível, deve-se especificar claramente a função de cada pino no *sketch* criado no IDE.

Uma função muito interessante e importante da plataforma *Arduino* é a comunicação serial, com ela pode-se realizar a comunicação de um computador com a placa e realizar a troca de dados ou monitorar o que está ocorrendo no *sketch* executado, através de um cabo USB. O *Arduino* pode enviar informações utilizando código, assim como recebê-lo. Pode-se usar esta função para verificar se o *Arduino* está gerando os dados corretamente no formato desejado.

O IDE tem a função de carregar o código, que nada mais é do que verificar o código, procurando se há algum erro e executando traduções para a converter o *sketch* para a linguagem C++, válido para o *Arduino*. Em seguida ele compila o código, ou seja, converte o código para uma forma que o *Arduino* compreende. Por fim, o arquivo final é combinado com as bibliotecas padrões do *Arduino* antes de ser carregado no *hardware*.

Um aspecto importante a se ressaltar é que o *Arduino* também opera *firmware*. O *firmware* é bastante parecido com *software*, pois também se trata de um aplicativo que pode ser instalado em *hardware*. A diferença é que o *firmware* é instalado diretamente no circuito integrado de memória do *hardware*, no momento da fabricação, ou seja, é o sistema operacional dos equipamentos eletrônicos. *Firmwares* são instruções operacionais programadas no *hardware* de um equipamento eletrônico que pode ser armazenada permanentemente no circuito integrado de memória de *hardware*, como uma ROM, PROM, EPROM ou ainda EEPROM e memória *flash*.

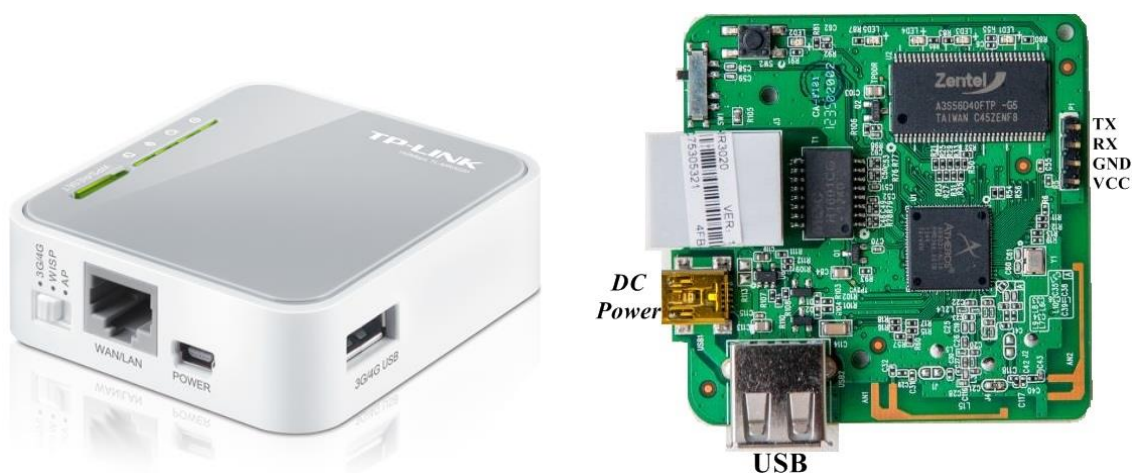
2.2 SISTEMA OPENWRT EM ROTEADORES

De acordo com o *site* do *OpenWrt* (2017), o sistema *OpenWrt* é uma interface que permite modificar o *firmware* de dispositivos, no caso deste trabalho, um roteador. Desta

forma, antes de qualquer aspecto mais avanço é necessário entender o funcionamento de um roteador.

Segundo o dicionário Aurélio (2010), roteador é um dispositivo usado para realizar a comunicação entre diferentes redes de computadores. De acordo com Kozierok (2005) o roteador realiza o gerenciamento do tráfego de uma rede local, além disso, ele é capaz de controlar o acesso aos seus dados de acordo com as especificações do administrador da rede. Na Figura 2a é ilustrado o modelo de roteador utilizado no presente trabalho, que é o roteador portátil *Wireless N 3G/4G* da *TP-Link:TL-MR3020* e já na Figura 2b é observado a composição eletrônica desse roteador.

Figura 2 - Roteador portátil: *TP-Link: TL-MR3020*



(a) TP-Link: TL-MR3020

Fonte: Site Oficial *TP-Link*

(b) Composição eletrônica do TL-MR3020

Fonte: Dados do próprio autor

O roteador tem a função de transmitir pacotes de dados de um *host* (qualquer dispositivo de uma rede) para outro, de acordo com as especificações estabelecidas pelo administrador. Ou seja, ocorre um redirecionamento de portas de destino. Ainda vale ressaltar que cada *host* possui um endereço de IP, o qual é definido como a identificação para um dispositivo qualquer de uma rede *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) (KHOSRAVI; ANDERSON, 2003). Essa identificação possui formato de um endereço numérico de 32 bits escritos como 4 números, os chamados octetos, os quais são separados por pontos, como por exemplo 192.168.0.156. Cada octeto corresponde a 8 bits. Já a rede TCP/IP é um conjunto de protocolos de comunicação entre dispositivos de uma mesma rede.

Esse dispositivo utiliza cabeçalhos e uma tabela de roteamento para traçar o caminho que os pacotes de dados irão percorrer, buscando os melhores caminhos, sejam eles o mais curtos ou o menos congestionados. Tal dispositivo ainda utiliza o protocolo *Internet Control Message Protocol* (ICMP) para comunicar-se com os *hosts* e configurar a melhor rota entre eles. O cabeçalho, em várias disciplinas da ciência da computação, é definido como uma unidade de informação que antecede o objeto de dados de um pacote; ou seja, é no cabeçalho que está contida a informação sobre o destino do pacote utilizada pelo roteador (OPPENHEIMER, 2014). Já em relação ao ICMP, temos que ele é uma extensão do protocolo IP (*Internet Protocol*), sendo definido pela RFC 792, que é um documento que contém notas técnicas e organizacionais sobre a *internet*. O ICMP suporta pacotes que contenham mensagens de erro, de controle e de informação.

Existem dois tipos de roteamento: os estáticos e os dinâmicos. O roteamento estático é encontrado em equipamentos mais baratos que buscam caminhos mais curtos para realizar as transmissões. Já o roteamento dinâmico é encontrado em equipamentos mais sofisticados que fazem uma avaliação prévia das condições das redes, sendo capazes de priorizar os caminhos mais eficientes, ou seja mais curtos e menos congestionados por excesso de transmissão de dados.

Ainda de acordo com Khosravi e Anderson (2003), existem três pontos a se considerar em relação a eficiência de um roteador:

- a) A velocidade de acesso que diferencia a velocidade da transmissão de dados que o roteador é capaz de atingir. Portanto, quanto maior a velocidade de acesso, mais rápido serão feitas as transmissões de dados;
- b) O padrão de conectividade da rede sem fio, que tem a função de indicar a frequência da transmissão de dados entre dispositivo e o roteador, existem três padrões: 802.11b, 802.11g e 802.11n. O padrão mais utilizado é 802.11b que possui uma velocidade de máximo de 1 Mbps, com um alcance de máximo operacional de 100 metros em ambiente fechado e 180 metros em uma área aberta;
- c) O ganho da antena que é um indicador de alcance do sinal de transmissão de dados. Portanto, quanto maior a potência indicada pela antena, maior a área de amplitude alcançada pela rede.

O roteador serve exatamente para o propósito da proposta de desenvolvimento deste trabalho, visto que o mesmo é um dispositivo criado para que o usuário utilize da telemetria. Além disso, o roteador possui um processador e um sistema operacional, se o

seu sistema operacional for alterado para o sistema *OpenWrt* é possível programar esse dispositivo para fazer o que se deseja e ainda utilizar a sua função *Wireless*, isso graças a existência de um processador no dispositivo. Neste caso, a integração do dispositivo de medição com um computador poderia ser feita com o uso do roteador, possibilitaria a operação remota do dispositivo de medição de ruído seja instalado em local afastado. Com base nisso, a opção de uso do roteador juntamente como o sistema *OpenWrt* no desenvolvimento do trabalho se mostra bastante atrativa.

O sistema *OpenWrt* do mesmo modo que a plataforma *Arduino* é uma prototipagem de código aberto, tendo seu *software* em uma linguagem de programação padrão, porém esse sistema não possui um *hardware* próprio, utilizando de dispositivos a ele incorporado, no caso do roteador o seu *hardware* possui um processador e uma entrada USB, permitindo assim a alteração do sistema operacional e a conexão em dispositivos suportes, respectivamente.

De acordo com Xie *et al.*(2014), *OpenWrt* é uma interface *Linux* usada em dispositivos incorporados para rotear o tráfego de rede. Esse sistema pode ser executado em diversos tipos de dispositivos como roteadores, *smartphones*, computadores de bolso e *laptops*. Seu sistema foi feito de maneira otimizada com tamanhos suficientemente pequenos para o armazenamento e memória limitada dos roteadores domésticos. De acordo com o *site* do *OpenWrt* (2017), ele fornece um sistema de arquivos totalmente gerenciável, isso permite que o usuário personalize o dispositivo a sua maneira, eliminando a limitação das configurações originais do mesmo fornecidas pelo fabricante. *OpenWrt* permite a construção de um aplicativo sem ter que construir um *firmware* completamente novo em torno dele.

OpenWrt utiliza principalmente uma interface de linha de comando, mas também possui uma interface *web*, a chamada interface *LuCi* baseada em uma estrutura *Model View Controller* (MVC), escrita na linguagem Lua. A estrutura MVC é um padrão de arquitetura de *software* que diferencia a representação da informação e a interação com usuário. *Model* é o modelo que consiste nos dados da aplicação, regras de negócios lógica e funções. Já *View* é a visão que pode ser qualquer saída de representação dos dados, exemplo um diagrama. Por fim o *Controller* é o controlador que busca realizar a medição da entrada, convertendo-a em comandos para o *Model* ou *View*.

A linguagem Lua pode ser definida de acordo com o *site* da Lua (2017, p. 1) como:

Lua é uma linguagem de programação poderosa, eficiente e leve, projetada para estender aplicações. Ela permite programação procedural, programação orientada a objetos, programação funcional, programação orientada a dados e descrição de dados... combina sintaxe procedural simples com poderosas construções para descrição de dados baseadas em tabelas associativas e semântica extensível. Lua é tipada dinamicamente, é executada via interpretação de *bytecodes* para uma máquina virtual baseada em registradores, e tem gerenciamento automático de memória com coleta de lixo incremental. Essas características fazem de Lua uma linguagem ideal para configuração, automação (*scripting*) e prototipagem rápida.

O *OpenWrt* é uma plataforma de *software* livre, tendo o seu suporte no fórum do próprio *site*. Possui cerca de 3500 pacotes de *software* opcionais disponíveis para serem instalados no sistema de gerenciamento de pacotes (KANNAN et al, 2016).

A *LuCi* foi fundada em março de 2008 como *FFLuCi* pelo *Freifunk-Firmware* afim de melhorar o *OpenWrt*. O motivo inicial para este projeto foi a ausência de uma interface de usuário *web* gratuita, transparente, extensível e facilmente mantida para dispositivos incorporados. Embora a maioria das interfaces de configuração similares usem frequentemente a linguagem *shell script* (linguagem de *script* usada em vários sistemas operacionais, com diferentes dialetos, que varia de acordo com o interpretador de comando usado), a *LuCi* usa a linguagem de programação *Lua* e divide a interface em partes lógicas como modelos e imagens, ainda usa bibliotecas orientadas de acordo com objetos e modelos utilizados. Isso garante um maior desempenho, menor tamanho de instalação, tempos de execução mais rápidos e melhor manutenção.

Com o tempo a *LuCi* evoluiu para uma coleção de várias bibliotecas, aplicativos e interfaces de usuário com propósito geral para programação em *Lua*, enquanto o foco ainda permanece na interface do usuário da *web*, que também se tornou uma parte oficial do *OpenWrt*. É interessante mencionar que a interface *LuCi* é um projeto aberto e independente, onde todos podem contribuir.

Assim como a plataforma *Arduino*, o sistema *OpenWrt* pode trabalhar com a comunicação serial, por meio de porta de rede. Também é possível conectar ao dispositivo incorporando sensores e atuadores afim de realizar diversas tarefas. No trabalho, tanto a plataforma *Arduino* como o sistema *OpenWrt* possuem um papel importante, visto que eles são usados para captura do sinal acústico medido, bem como, permitir que o dispositivo de medição de ruído atue de forma remota e integrada a um computador, ressaltando que na plataforma *Arduino* é necessário a utilização de um módulo *Wireless*.

2.3 OPERAÇÃO REMOTA POR TELEMETRIA

Uma das abordagens discutidas neste trabalho é a operação remota do dispositivo de medição de ruído por meio da telemetria. De acordo com a definição de Dunn (2013), “a telemetria é a transmissão sem fio de dados de medição de um local remoto para um local central, para o processamento e/ou armazenamento dos dados”. Ou seja, a telemetria permite a medição e análise de dados e informações à distância, em locais onde um sistema de cabeamento, por exemplo, não seria viável. Nas discussões de Mattos (2004) a telemetria começou com a necessidade de medidas em locais inacessíveis, como por exemplo, a temperatura dentro de um forno, mas com o tempo sofreu evoluções, tornando-se uma ciência complexa usada para medidas remotas em qualquer local.

A telemetria é uma tecnologia utilizada para a coleta de informações de pontos geograficamente remotos ou que estão em constante movimento, como os automóveis, transmitindo dados e informações para uma central de controle, que tem a função de acompanhar e decodificar esses dados. Sua aplicação é bastante ampla na gestão de bens, ativos, por exemplo, no consumo de comodidade, onde empresas de saneamento, energia elétrica ou gás utilizam contadores que enviam a informação do consumo para uma central e posteriormente é efetuada a fatura temporal do consumo. No caso de controle de ruído ocupacional, uma proposta de transmissão de dados e informações para uma central de monitoramento e controle poderia ser facilmente adaptada para um programa de gestão do ruído ocupacional.

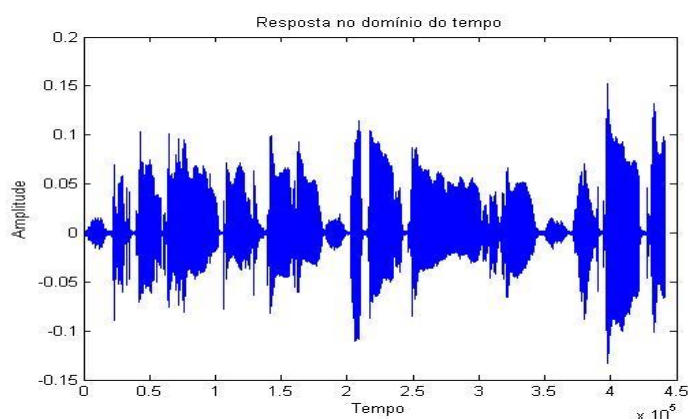
3 CONCEITOS BÁSICOS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS E MEDIDAS DE RUÍDO

Neste capítulo são apresentados os conceitos e fundamentos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente são discutidos os conceitos básicos de processamentos de sinais, abordando tipos de sinais, amostragem e quantização de sinal e conversão analógico-digital. Em seguida são discutidos os conceitos de som e ruído, o funcionamento do ouvido humano e a relação do som com os seres humanos, nível de pressão sonora e uma contextualização sobre medidor de nível de pressão sonora.

3.1 PROCESSAMENTO DE SINAIS

Um sinal é uma função de variáveis independentes que representa uma quantidade ou variável física, a qual normalmente possui informações sobre o comportamento ou a natureza de um dado fenômeno. De acordo com Oppenheim e Willsky (2010), há dois tipos básicos de sinais: sinais de tempo contínuo e sinais de tempo discreto. Os sinais de tempo contínuo, a variável independente é contínua, logo esses sinais são definidos em um conjunto contínuo de valores da variável independente. Já os sinais de tempo discreto são definidos em instantes discretos, ou seja, a variável independente assume apenas um conjunto discreto de valores. Na Figura 3 é mostrado o sinal de uma onda sonora.

Figura 3 - Representação gráfica de um sinal sonoro



Fonte: Dados do próprio autor

Um sinal pode ser de tempo contínuo ou de tempo discreto. Um sinal de tempo contínuo é definido em cada instante de tempo e costuma ser associado aos sinais

analógicos, os quais possuem uma variação com o tempo análoga a algum fenômeno físico (ROBERTS, 2010). Todos os sinais analógicos são sinais de tempo contínuo, porém a recíproca não é verdadeira, nem todos os sinais de tempo contínuo são sinais analógicos.

O objetivo do processamento de sinais é extrair informações que os sinais carregam. O método de extração depende do tipo do sinal e da natureza da informação que ele carrega. A representação do sinal pode ser uma função no domínio original da variável independente ou em termos de funções no domínio de uma transformada.

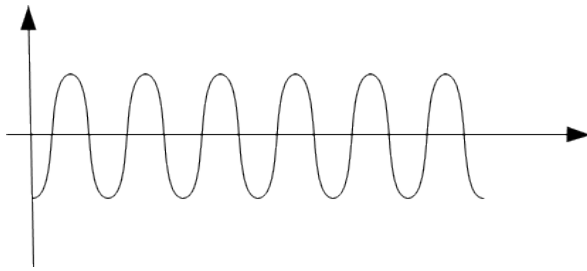
O processamento de sinais conforme discutido Yarlagadda (2010) é dividido em função da natureza do sinal em processamento de sinal analógico e processamento de sinal digital. No processamento de sinal analógico se utiliza elementos de circuitos analógicos, já no processamento de sinal digital o processamento é feito a partir de cálculos numéricos.

Nos sensores o sinal de entrada conforme discutido em Tan (2008) é um sinal de entrada analógico, conseqüentemente, contínuo no tempo. Normalmente, esse sensor é usado para converter um sinal não elétrico em um sinal elétrico analógico que pode passar por um filtro analógico, usado para limitar a gama de componentes do sinal antes do processo de amostragem e digitalização. A unidade de processador de um sinal digital pode ser um computador, um microprocessador ou um microcontrolador; além disso, as regras de processamento de sinais digitais são implementados, de modo geral, utilizando *softwares*.

A amostragem de um sinal consiste na obtenção do sinal contínuo no tempo em instantes discretos de tempo. Na amostragem o sinal é convertido em uma seqüência de números, com cada número representando a amplitude do sinal da mensagem em um instante de tempo particular (HAYKIN; VEEN, 2001). O conjunto de amostras é um exemplo de sinal discretizado no tempo. Um sinal discretizado no tempo pode também ser produzido por um sistema de tempo discreto que gere valores de um sinal somente em um certo instante de tempo (LATHI; DING, 2012). Sinais de tempo discretos são associados a sinais digitais, os quais são a transmissão de uma seqüência de valores de um sinal de tempo discreto, representados por dígitos em alguma forma codificada. Neste caso, os sinais são classificados em sinais analógicos e digitais:

- a) Sinal analógico: possui tempo contínuo e amplitude contínua, na Figura 4 é mostrada a representação gráfica de um sinal analógico.

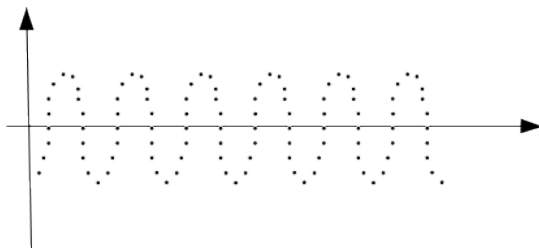
Figura 4 - Representação gráfica de um sinal analógico



Fonte: Dados do próprio autor

- b) Sinal digital: possui tempo discreto e amplitude discreta, na Figura 5 é mostrada a representação gráfica de um sinal digital. É representado por um número finito de dígitos, isso significa que um sinal digital só é definido para determinados instantes de tempo, e que o conjunto de valores que ele pode assumir é finito.

Figura 5 - Representação gráfica de um sinal digital



Fonte: Dados do próprio autor

3.2 CONVERSÃO ANALÓGICA-DIGITAL

A maioria dos sinais que são encontrados no dia a dia são sinais contínuos, como por exemplo, a intensidade da luz que varia de acordo com a distância, a intensidade de ruído entre outras. Com o advento do computador o homem sentiu a necessidade de digitalizar esses sinais para poder interagir com eles por meio dos computadores, tanto recebendo as informações, conversão analógica-digital (A/D) com enviando informações, conversão digital-analógica (D/A).

A conversão A/D conforme discutido em Smith (2011), é feita em dois passos: amostragem e quantização. Para realizar a conversão A/D o sinal de tempo contínuo é amostrado gerando assim um sinal de tempo discreto e as amplitudes que eram contínuas são quantizadas. Normalmente, o primeiro passo para a conversão do sinal analógico para o digital é realizando a amostragem do sinal e posteriormente o sinal é digitalizado usando

um conversor analógico-digital que transforma o sinal analógico em um sinal digital (BROESCH ET AL., 2008). A amostragem é a obtenção de amostras de um sinal contínuo, em instantes de tempo de intervalos iguais. Já a quantização realiza a aproximação dos valores obtidos na amostragem, para um conjunto finito de níveis, o qual é determinado pelo número de *bits* que serão utilizados para codificar o sinal. Cada amplitude é alocada ao nível de quantização mais próximo, ou seja, ao nível que leve ao menor erro absoluto.

Um aspecto importante a ser observado na amostragem é a questão da taxa de amostragem, a taxa de amostragem deve ser definida com base no teorema da amostragem, sabe-se que a taxa de amostragem deve ser maior que o dobro da maior frequência do espectro, então o sinal pode ser reconstruído baseado em amostras discretas (CANDY; TEMES, 1992). No caso de medidas acústica para frequência de corte (alta frequência) da ordem de $22,05\text{kHz}$ é necessário utilizar frequência de amostragem de entrada duas vezes maior, ou seja, de $44,1\text{kHz}$.

3.3 CONCEITOS DE SOM E RUÍDO

Para uma avaliação do ruído é importante compreender o que são as ondas sonoras. Para Beranek e Vér (1992), uma onda sonora é qualquer perturbação que se propaga em um meio elástico. Essas perturbações podem ser percebidas pelo senso de audição de um ser humano, por meio de uma variação na pressão do ar no ouvido. A variação na pressão em relação à pressão atmosférica é chamada de pressão sonora, medida em pascal (Pa).

De acordo com o dicionário Aurélio (2010) som, no seu sentido físico, é “o movimento vibratório de um corpo sonoro, que se propaga no ambiente e impulsiona o órgão da audição: som agudo, som grave”. E ruído é “qualquer som indistinto, sem harmonia”.

Já para Everest e Pohlmann (2009), o som pode ser entendido como um movimento de onda no ar ou outros meios de elásticos, o que se entende como um estímulo. O som também pode ser entendido como uma excitação do mecanismo de audição, o que resulta na percepção de som, sendo considerado uma sensação. Para Nepomuceno (1994), o som nada mais é que uma vibração que se propaga em um meio elástico, porém deve possuir uma frequência entre 16 e 20 Hz até 20kHz, que é a faixa de

frequência dita como uma faixa audível. Sons abaixo dessa faixa são denominados infrassons e acima de ultrassons.

O ruído é um som, mas o som não é necessariamente um ruído. Existem algumas definições para ruído, para Kinsler et al. (1982), o ruído é uma onda sonora aperiódica, ou seja, com várias frequências ao mesmo tempo. O ruído ainda pode ser considerado um som que atrapalha a execução das atividades de uma pessoa (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2006), como o som de uma mosca voando que deixa um estudante incomodado, diminuindo a sua concentração. Porém, de acordo com Bistafa (2006), o ruído pode também ser utilizado como uma forma de informação, como o bom ou mal funcionamento de um maquinário, o início de um incêndio, entre outros tipos de avisos.

Segundo a Norma NBR 12179 (ABNT, 1992, p.2), ruído é todo som indesejável, porém o seu efeito não depende somente das suas características, mas também da pessoa que está exposto a este ruído. O ruído é todo o som que excede os níveis determinados pelas normas, que possam prejudicar a segurança, a saúde e a qualidade de vida de uma pessoa, gerando problemas de audição, falta de concentração, dificuldade de comunicação e estresse.

O ruído contínuo pode ser, uma máquina operando ininterruptamente, como ventiladores, bombas e motores. Já o ruído intermitente aparece quando uma máquina opera em ciclos, ou quando carros estão em movimento, fazendo com que os níveis de ruído aumentem e diminuam rapidamente. O ruído gerado por impactos ou explosões é considerado um ruído impulsivo (DAVIS; MASTEN, 2016).

3.4 O SOM E OS SERES HUMANOS

O som é definido como uma sensação melodiosa e harmônica, enquanto o ruído, uma sensação incomoda e irritante. O ruído é um tipo de som percebido de forma subjetiva pelo homem. Isso porque para uns ele pode ser um som agradável e para outros um som indesejável como mencionado anteriormente. Porém, nos dias atuais, com a globalização e o avanço tecnológico os níveis de ruído se tornaram uma forma de poluição que atinge fortemente o ser humano, estando presente a todo momento no dia a dia do homem.

Uma pessoa que é submetida a altos níveis de ruído pode ter o seu bem estar afetado, assim como problemas de saúde, principalmente de audição. De acordo com

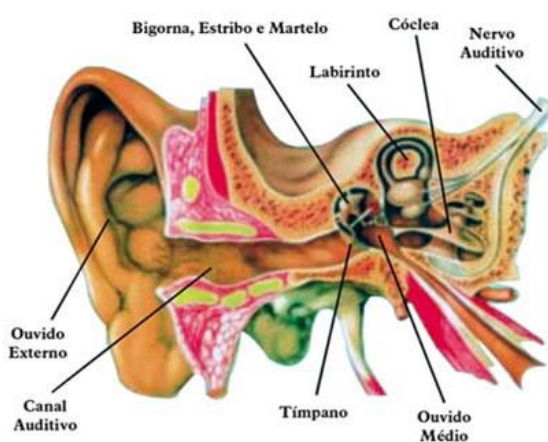
Gerges (2000), as alterações fisiológicas que o homem pode sofrer são: dilatação da pupila, hipertensão sanguínea, mudanças gastrointestinais e reação da musculatura do esqueleto que, se o indivíduo for exposto por um grande tempo se torna irreversível. Um grande tempo de exposição à altos níveis de ruído pode sobrecarregar o coração, gerando secreções anormais de hormônios e tensões musculares. A exposição ao ruído ainda pode causar hipertensão arterial (FUSINATO, 2005).

3.4.1 O Ouvido Humano

O ouvido humano é um órgão de grande sensibilidade e responsável pela percepção e interpretação das ondas sonoras que chegam até ele em uma faixa de frequência audível (20Hz a 20kHz). Isso ainda pode variar de pessoa para pessoa, pois o limite superior da audição humana diminui com o envelhecimento, o chamado presbiacusia (JOURDAIN, 1998).

De acordo com Gerges (2000), desde a captura do som até a percepção do mesmo, acontece uma série de transformações de energia, que começa quando o som passa pelo canal auditivo (energia sonora), seguindo para o mecanismo dos ossículos (energia mecânica), que possui a função de amplificar o sinal de áudio, depois passa pela cóclea que funciona como um sistema hidráulico e finaliza com a energia elétrica dos impulsos nervosos que alcançam o cérebro. Na Figura 6 é ilustrado de forma simplificado os principais componentes do ouvido humano.

Figura 6 - Anatomia do ouvido humano



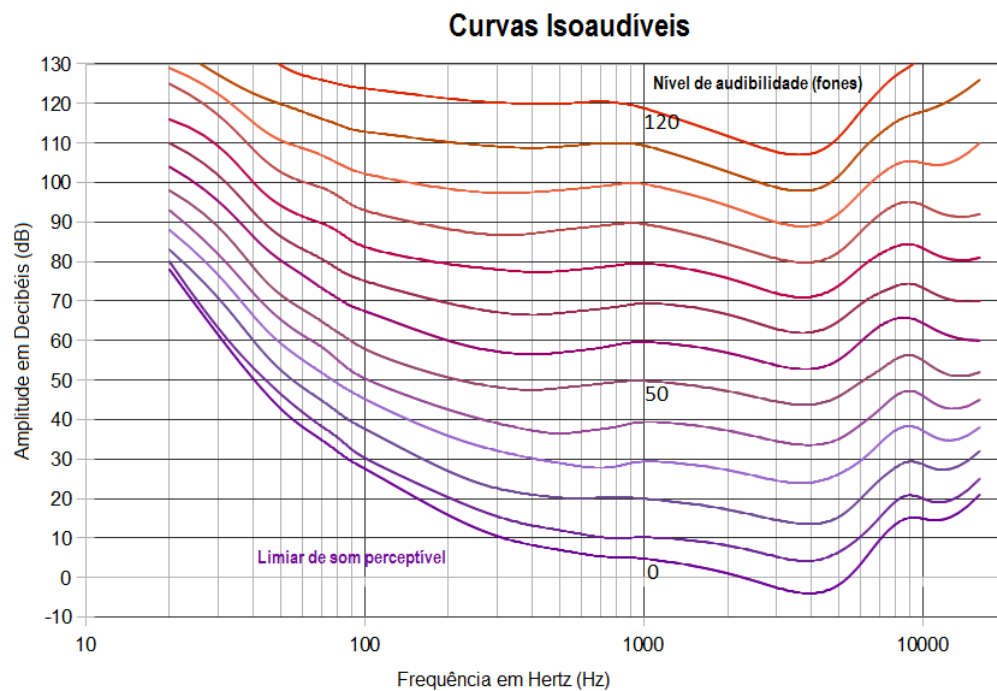
Fonte: Falconi (2011)

De acordo com Rui (2007) o ouvido humano é dividido em três partes:

- a) Ouvido externo: constituído pelo pavilhão auditivo, canal auditivo e tímpano. O pavilhão auditivo coleta o som que passa pelo canal auditivo até alcançar o tímpano;
- b) Ouvido médio: constituído pelos ossículos (martelo que bate contra a bigorna, que bate contra o estribo) que funcionam como um braço de alavanca, resultando na amplificação do som. A participação do ouvido médio começa quando som atingem o tímpano fazendo-o vibrar, e termina quando o estribo pressiona a janela oval (ligada a cóclea), já no ouvido interno (STEVENS; WARSHOFSKY, 1969).
- c) Ouvido interno: responsável por levar o som até o cérebro por meio de nervos. A cóclea é um espiral cônico com três tubos comprimidos lado a lado (RUI, 2007). Os tubos de cima e de baixo, possuem um líquido chamado de perilinfa, eles possuem a função de se comunicar com o ouvido médio, enquanto o tubo do meio está cheio de um fluido chamado endolinfa, neste tubo existem diversas células ciliadas que diferenciam as frequências (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2002). Um aspecto importante a se ressaltar é que essas células não se regeneram.

3.4.2 Curvas Audiométricas

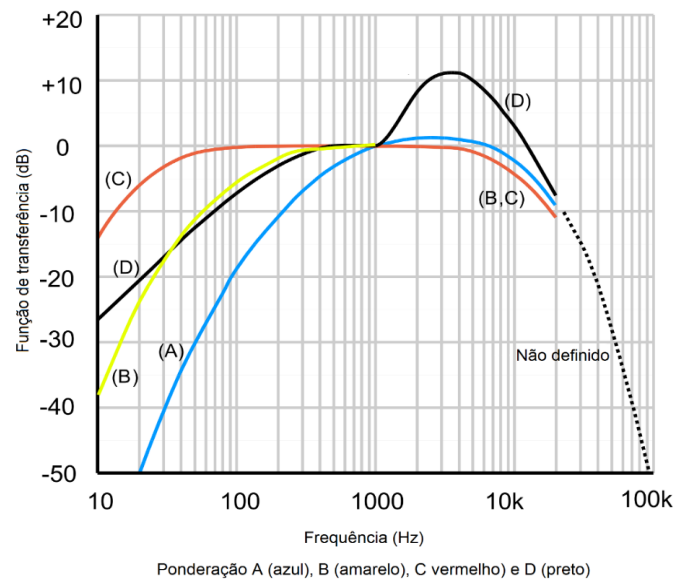
O sistema auditivo não captura o som de forma linear, isso porque o ouvido humano apresenta uma sensibilidade diferente para cada frequência. A sensação de se ouvir, para o ser humano, advém da variação de pressão sonora na faixa de frequência de 20Hz a 20KHz comenta Bistafa (2006). Assim, um som grave será percebido como se fosse menos intenso do que um som médio de mesmo nível de pressão sonora. Ou seja, para o ouvido humano, sons de frequências diferentes soam com intensidade de níveis sonoros diferentes. Portanto, o nível é uma indicação física da amplitude, ao passo que a audibilidade é uma indicação subjetiva, variando de um indivíduo para outro. A Figura 7 mostra uma família de curvas de igual audibilidade sonora (curvas isoaudíveis) de resposta do ouvido humano dados em fones. Fone é a unidade criada para comparar o nível de audibilidade sonora.

Figura 7- Representação gráfica de curvas isoaudíveis

Fonte: Adaptado de Gerges (2000)

Devido ao fato do ouvido humano não possuir uma resposta linear em relação à frequência, os circuitos eletrônicos utilizados nos dispositivos de medição fazem uma correção dos valores medidos buscando modelar esse comportamento não linear da resposta do ouvido humano. As correções são feitas para cada faixa de frequências de forma a reproduzir a sensibilidade do ouvido humano, levando a um conjunto de curvas de ponderação, as quais são padronizadas e classificadas como A, B, C e D. Na Figura 8 são mostrados os gráficos das curvas dos circuitos de compensação, conforme discutido em Bistafa (2006), as mesmas são classifica como filtros passa-alta com as seguintes características:

- a) Tipo A: aproxima a sensação auditiva correspondente à curva isofônica de 40 fones (desenfatiza baixas frequências);
- b) Tipo B: aproxima a sensação auditiva correspondente à curva isofônica de 70 fones;
- c) Tipo C: aproxima a sensação auditiva correspondente à curva isofônica de 100 fones;
- d) Tipo D: desenvolvida para avaliação de ruídos de sobrevoos de aeronaves (penaliza altas frequências).

Figura 8 - Circuitos de compensação A, B, C e D

Fonte: Adaptado de Nepomuceno (1977)

Existem diversas formas de mensurar o som, em termos do nível de intensidade sonora, do nível de potência sonora ou ainda pelo nível de pressão sonora. Neste trabalho o ruído será medido utilizando o nível de pressão sonora como forma de quantificação do mesmo.

Para um melhor entendimento das medidas de nível de pressão sonora é importante entender o funcionamento do ouvido humano. O ouvido humano pode diferenciar uma grande faixa de pressão sonora, de acordo com a frequência que o som é emitido, em outras palavras, a percepção do som varia de acordo com cada frequência sonora emitida (DE MARCO, 1982). De acordo com Fahy (2005), o ouvido humano não responde de forma linear à pressão sonora, assim como muitos outros sistemas fisiológicos e percepções psicofísicas, as quais exibem uma resposta logarítmica. Por esse motivo, foram definidos equivalentes logarítmicos de pressão e sua média quadrada, desde modo foi definido o nível de pressão sonora pela Equação 1.

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P(t)}{P_{ref}(t)} (dB) \quad (1)$$

Onde:

$P(t)$ é a pressão sonora;

P_{ref} é a pressão sonora de referência = 2×10^{-5} Pa, que corresponde aproximadamente ao limiar da audição normal a 1 kHz.

3.5 MEDIDOR DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORO

O medidor de nível de pressão sonora é um instrumento capaz de medir o nível de ruído com uma resposta normalmente em decibéis (dB). Este instrumento tem como principal componente um transdutor eletroacústico que converte o sinal de áudio em um sinal elétrico. Esse instrumento ainda precisa de um amplificador para aumentar a intensidade do sinal que é captado pelo transdutor, visto que é um sinal de intensidade muito baixa, ordem de milivolts. Também precisa de um conversor AC-DC que converte o sinal de uma corrente alternada para uma corrente contínua.

Possui ainda um filtro que adequa esse sinal para um determinado fim, que são as chamadas ponderações, que pode ser A, B, C e D. Ainda segundo a norma, em uma auditoria para garantir o seu cumprimento deve-se medir o nível de ruído com um instrumento de nível de pressão sonora operando no circuito de ponderação “A” e circuito de resposta lenta (*Slow*).

A performance dos medidores de nível de pressão sonora é determinada pelos padrões IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional). As seguintes padronizações são aplicáveis:

- a) IEC 60651 – Padronização para medidores de nível de pressão sonora;
- b) IEC 60804 – Padronização para medidores de nível de pressão sonora;
- c) IEC 61672 – Padronização para medidores de nível de pressão sonora, substituindo IEC 60651 e IEC 60804;
- d) IEC 60942 – Padronização para calibradores de medidores de nível de pressão sonora.

A nível nacional a ABNT estabelece normas apenas a respeito de calibração e procedimento de operação deste instrumento, como por exemplo:

- a) NBR 10151 - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento;
- b) NBR 17025 - Acreditação de Laboratórios (calibração).

O nível de pressão sonora, portanto, é uma grandeza acústica que determina a sensação de intensidade de som. A grande maioria das medições de ruído são de decibéis ponderados, dB(A). De acordo com Peters et al. (2011), a ponderação é o resultado de uma rede de ponderação de frequência eletrônico no medidor de nível de som que tenta

construir a resposta humana a diferentes frequências para a leitura indicada por um medidor de nível de som, de modo que ela se relacionará com a intensidade do ruído.

Com base nisso, pode-se dizer que, o componente principal para a medição acústica é um sensor de pressão sonora. Esse sensor é um transdutor eletroacústico, chamado microfone, tem a capacidade de transformar a pressão sonora em sinais elétricos. Tal sinal é condicionado e expresso em termos de nível de pressão sonora, por meio de um medidor de nível sonoro. Bistafa (2006), explica que esse instrumento não vem com filtros de análise de frequência, fornecendo somente, o nível sonoro total do som que é captado pelo microfone. Mas é importante lembrar que esse instrumento possui filtros ponderados que fornecem uma melhor correlação do nível sonoro com o nível de audibilidade.

É importante explicar neste momento o que é o nível total (global) de pressão sonora. Esse índice é uma grandeza que fornece apenas um nível em decibel sem informações sobre a distribuição de energia deste nível nas frequências. Portanto é uma medida global simples (RMS) efetuada com um medidor sonoro sem filtros parciais (GERGES, 2000).

Destacando que o dano causado na audição não depende somente do nível de ruído exposto, mas também ao tempo que o indivíduo é exposto a este ruído, foi estabelecido um valor único, o nível sonoro equivalente (L_{eq}), que é utilizado para descrever o nível de pressão sonora medido durante um determinado intervalo de tempo T . É definido como o nível de som contínuo que tenha a mesma energia acústica do som flutuante que está sendo medido num determinado local. De acordo com Gerges (2000), o cálculo é feito integrando-se a variação da pressão no tempo de observação, Equação 2.

$$L_{eq} = 10. \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_{ref}^2} dt \quad (dB) \quad (2)$$

O nível sonoro equivalente é usualmente utilizado para quantificar níveis de ruído ambiental expressos na curva de ponderação “A”. A Norma NBR 10151 (ABNT, 2000) recomenda o L_{eq} para análises de ruído em ambientes internos.

4 DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE RUÍDO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento e implementação do dispositivo de medição de ruído. Primeiramente, é discutida a fase de captura do sinal de áudio, que é a parte central do trabalho, que vai possibilitar o cálculo do nível de ruído de modo correto. Ainda neste capítulo, é apresentada uma discussão a respeito dos microfones utilizados e os motivos que levaram a escolha dos mesmos. E finalmente, é apresenta os procedimentos de cálculos e o desenvolvimento da interface gráfico do dispositivo de medição de ruído.

4.1 METODOLOGIA

O presente trabalho teve como norte o desenvolvimento de um dispositivo que possa ser usado para o monitoramento contínuo de ruído em ambientes de trabalho. Além de medir o ruído, o dispositivo deve ser capaz de armazenar os dados coletados para posterior análise ou a definição de históricos dos níveis de ruído no local. O dispositivo traz a proposta de operação remota através da telemetria, duas possibilidade foram discutidas uma com base no uso de um módulo *Wireless* e outra com base no uso de um roteador. A operação remota possibilitaria o uso do dispositivo de medição de forma integrada com um computador em um programa de gestão de ruído onde o usuário poderia controlar a operação do dispositivo para o monitoramento dos níveis de ruído do ambiente à distância. O alcance do sistema remoto, neste caso, está diretamente relacionado com a capacidade de roteamento do dispositivo que pode ser alterado por meio de antenas.

Duas propostas de dispositivo de medição foram implementação e avaliadas: uma com base na plataforma *Arduino* e outra com base no uso do sistema *Openwrt* operando conjuntamente com um roteador utilizado para o gerenciamento e controle dos microfones e sistema de armazenamento de dados. Na primeira proposta os componentes utilizados foram o *Arduino*, o módulo *Wireless* e um computador para o armazenamento e leitura dos dados. Já na segunda proposta foi utilizado um roteador com o sistema *OpenWrt*, um *pen drive* utilizado como uma extensão da memória do roteador (memória ROM) e um computador para armazenamento e processamento dos dados. Além da plataforma *Arduino* e do sistema *Openwrt*, no desenvolvimento dos dispositivos foram utilizados e/ou adaptados códigos, bibliotecas e procedimentos disponibilizados pelos

fabricantes e desenvolvedores destas duas plataformas. Para isso, duas das fontes de consultas permanente foram o *site* do *Arduino* (ARDUINO, 2017) e o *site* do *Openwrt* (OPENWRT, 2017).

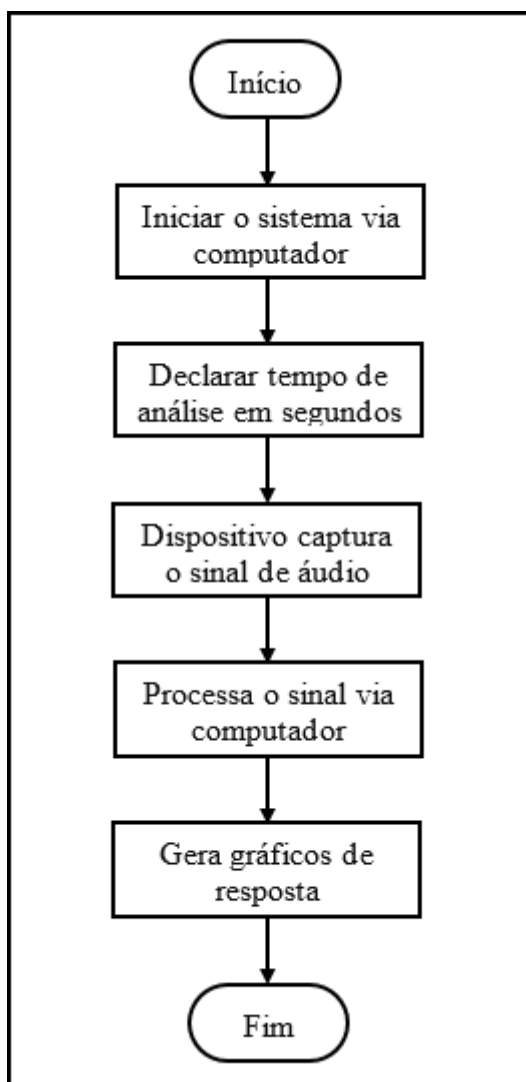
A proposta desenvolvida com base na plataforma *Arduino* possui uma limitação com relação às oscilações negativas nos valores de leitura, visto que o mesmo não trabalha com tensões negativas, isso porque cada pino de leitura do *Arduino* possui um diodo que impede a corrente no sentido contrário, ou seja, tensão negativa (ARDUINO, 2016). Isso acaba gerando um corte para os sinais com valores de tensão negativa, para corrigir essa limitação foi utilizado um circuito amplificador/compensador do sinal. Para isso foi desenvolvido um compensador DC (corrente direta), o qual ajusta o sinal de saída do amplificador, deixando o sinal em uma faixa de tensão de 0 V até o valor máximo de tensão de trabalho que atende a faixa de operação do *Arduino*. O circuito de compensação DC atua como um sistema de filtro passa-baixo que suaviza o sinal, reduzindo eventuais ruídos indesejáveis. O aterramento do sistema foi feito através de resistores que também contribuiu para a adequação da sensibilidade do microfone. Neste caso, dispositivos eletrônicos de condicionamento e tratamento do sinal de áudio capturado pelo microfone também foram utilizados visando ajustá-lo às condições e especificações dos componentes utilizados no dispositivo de medições. O sistema de transmissão dos dados foi via módulo *Wireless*.

Já a proposta desenvolvida com base no sistema *OpenWrt* necessitou de um *pen drive* para realizar o armazenamento do *firmware*, visto que a memória ROM do roteador é muito pequena. Foi utilizado ainda um dispositivo de *hardware* (placa de som) para a conversão analógico/digital dos sinais capturados pelo sensor de pressão (microfone). Para as conexões dos componentes no dispositivo foi utilizado um *hub*. O *hub* é um adaptador para entradas USB que tem como principal função multiplicar as entradas USB de um dado dispositivo. Neste caso, o *hub* foi conectado à porta USB do roteador, possibilitando a conexão do *pen drive* e da placa de som e o microfone foi conectado a placa de som por meio de uma entrada de *plug* P2. Um aspecto importante a se ressaltar é que o dispositivo, neste caso, passou a ter uma memória externa para armazenamento de dados (*pen drive*) e a montagem de *hardware* ficou mais simples, visto que o roteador já é capaz de realizar a captura e transmissão dos dados. Os dados são inicialmente armazenados no *pen drive* e depois enviados para um computador a partir de comandos do usuário ou de forma pré-programada.

A análise e o processamento do sinal de áudio capturado pelo microfone, ambos são realizados em ambiente *Matlab*. Para isso foi desenvolvida uma interface gráfica utilizando a ferramenta *Guide* que permite usuário visualizar o sinal bruto, o sinal em pressão sonora e nível de pressão sonora.

A calibração e avaliação do desempenho do dispositivo de medição foi realizada utilizando um sistema de medição comercial, mais especificamente, o medidor de pressão sonora *Solo Black SLM* da marca *01dB*. O medidor é do tipo 1 que atende as especificações da IEC 60651 e possui recursos para medição de nível de pressão sonora equivalente, como é especificado na IEC 60804. O calibrador do medidor é da mesma marca e atende às especificações da IEC 60942 (*94dB a 1000Hz*), sendo que ambos possuem certificado de calibração da Rede Brasileira de Calibração (RBC).

Na Figura 9 é mostrado o fluxograma do processo de medição desenvolvido em que é possível acompanhar as várias etapas envolvidas na medição. Inicialmente, é definido o intervalo de aquisição, o dispositivo é acionado remotamente para a captura da pressão, finalizado a captura os dados são enviados para o computador por telemetria e finalmente, o cálculo dos níveis de pressão sonora é realizado e os resultados são apresentados na forma de gráficos e valores na tela.

Figura 9 - Fluxograma do sistema de medição desenvolvido

Fonte: Dados do próprio autor

4.2 MICROFONES

A escolha e seleção do tipo de microfone utilizado se mostrou um passo importante, a qualidade do som depende principalmente da qualidade do microfone. No caso de equipamentos de gravação, por exemplo, não basta ter a melhor mesa de som se o microfone deixar a desejar (Clifford, 1977). Três tipos de microfones foram testados, o microfone de condensador, de eletreto e dinâmico. Os testes foram realizados para identificar o funcionamento de cada microfone, neste caso foi utilizado somente um dispositivo, o dispositivo com base na plataforma *Arduino*.

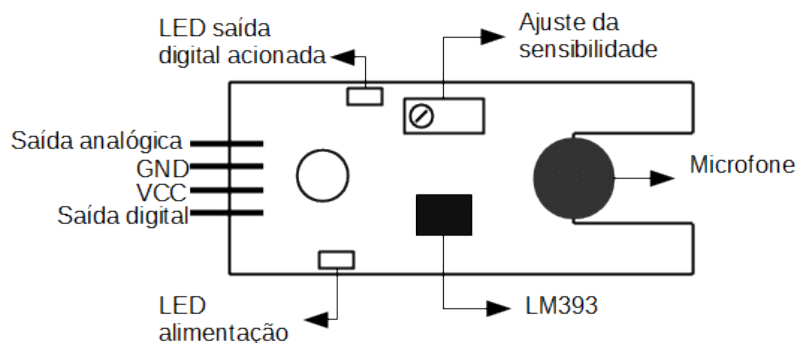
O microfone de condensador testado foi o sensor de som KY-038. O sensor KY-038, diferentemente dos demais microfones testados, é um dispositivo com um circuito

onde já existe um amplificador e um compensador de sinal, ou seja, o KY-038 é um circuito eletrônico capaz de medir a intensidade sonora do ambiente ao seu redor, variando o estado de sua saída digital caso detectado um sinal sonoro. O limite de detecção pode ser ajustado através do potenciômetro presente no sensor que regulará a saída digital (D0), porém para obter uma resolução melhor é possível utilizar a saída analógica (A0) e conecta-la um conversor A/D, neste caso, o *Arduino*. O módulo trabalha com uma tensão de operação de 4-6V com uma corrente direta, e ele possui dois LEDs indicadores: um que mostra se o módulo está ligado e outro que acende quando a saída digital estiver em nível alto (*High*). Na Figura 10a é mostrada a foto do sensor e na Figura 10b o esquema de funcionamento do sensor.

Figura 10 - Sensor de som KY-038



(a) Foto do sensor de som KY-038



(b) Esquemática do sensor de som KY-038

Fonte: Dados do próprio autor

As especificações básicas do sensor são:

- Faixa de frequência: 100 ~ 10.000 Hz;
- Sensibilidade: $-46 \pm 2,0$ (0dB = 1V/Pa) a 1 kHz ajustável pelo potenciômetro;
- Fonte de alimentação: máximo de 5V;
- Sensibilidade mínima a ruído: 58dB.

O Microfone de eletreto testado foi o Panasonic WM-55A que é um microfone unidirecional que foi desenvolvido para captações (eletrificações) de instrumentos, principalmente acordeom. Para conectá-lo ao *Arduino* foi necessário um conector e um *plug* P2. Para isso foi soldado um cabo coaxial nas entradas do microfone (terra e sinal) e na outra extremidade do cabo foi soldado dois jumper para serem ligados no pino GND e na saída analógica do *Arduino*. O microfone foi alimentado pelo pino 5V do *Arduino*. Na Figura 11 é mostrado o microfone de eletreto em questão.

Figura 11 - Microfone de eletreto Panasonic WM-55A



Fonte: *Site* Oficial Panasonic (2017)

As especificações básicas do mesmo são:

- a) Faixa de frequência: $100 \sim 12.000 \text{ Hz}$;
- b) Sensibilidade: $-47 \pm 4,0 \text{ (0dB = 1V/Pa)}$ a 1 kHz ;
- c) Fonte de alimentação: $1,5 \sim 5\text{V}$;
- d) Impedância: 680Ω .

O microfone MIC-100 é um microfone dinâmico de alto desempenho com uma entrada mono de 6,3mm, isso quer dizer, que ele possui um único elemento de microfone ou de captura que gera um sinal; ao contrário de um estéreo. Para conectar esse microfone ao *Arduino* foi necessário um conector de $\frac{1}{4}$ e um *plug* P10. Para realizar a conexão do microfone ao *plug* foi realizada a soldagem de fios no *plug* de aterramento e geração de sinal. A ligação do microfone com o *Arduino* foi realizada pelo fio soldado ao *plug* de aterramento conectado ao pino GND do *Arduino*, e o fio de geração de sinal conectado a uma saída analógica do *Arduino*. A alimentação do microfone foi pelo pino 5V do *Arduino*. Na Figura 12 é mostrado o microfone dinâmico em questão.

Figura 12 - Microfone dinâmico, MIC-100



Fonte: Dados do próprio autor

As especificações básicas do mesmo são:

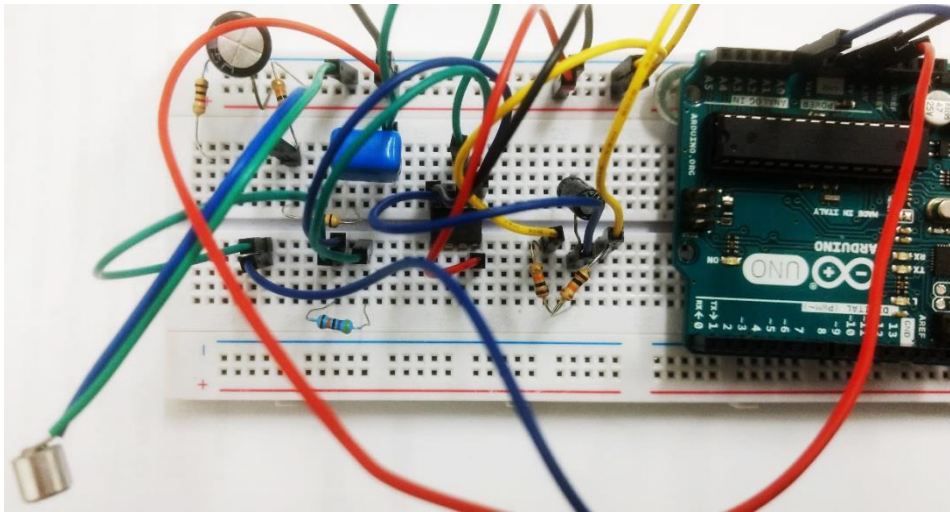
- a) Faixa de frequência: $90 \sim 12.000 \text{ Hz}$
- b) Sensibilidade: -55 dB
- c) Fonte de alimentação: máximo de 5 V
- d) Impedância: 600Ω

O sensor de som KY-038 possui um circuito amplificador/compensador do sinal de tensão próprio, conseqüentemente foi necessário somente conectá-lo ao *Arduino* e realizar a programação desejada. Para o microfone Panasonic Wm-55A e o MIC-100 foram necessários desenvolver um circuito amplificador/compensador do sinal.

4.2.1 Circuito Amplificador/Condensador

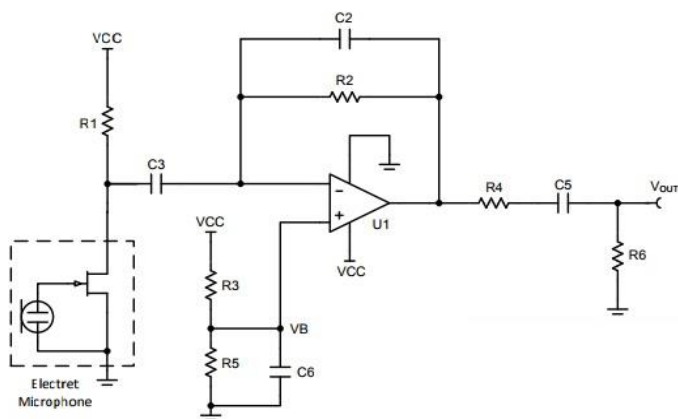
O circuito amplificador/compensador utilizado foi baseado no circuito desenvolvido pela *Texas Instruments Incorporated* (2015). Na Figura 13 é mostrado o circuito montado, assim como seu diagrama esquemático que ilustra os componentes do amplificador e do conversor CC.

Figura 13 - Circuito de amplificador/compensador



(a) Foto do circuito amplificador/compensador desenvolvido

Fonte: Dados do próprio autor



(b) Diagrama esquemático do amplificador/compensador

Fonte: *Texas Instruments Incorporated* (2015)

O sinal de áudio nada mais é que uma onda sonora constituída por pequenas oscilações. Em eletrônica essas oscilações do sinal de áudio são representadas por tensões de oscilação ao longo do intervalo de tempo. Neste momento foi necessária atenção com a voltagem de saída do transdutor, visto que o *Arduino* possui uma limitação com relação às oscilações negativas, ele considera os valores negativos “picos de baixas amplitudes” iguais a 0 V, o que acaba gerando um corte para os valores de voltagem negativa. Para evitar este problema foi necessário um circuito de amplificação e compensação de sinal, que vai deslocar os valores de voltagem para uma faixa de valores variando de 0 V até o valor máximo da voltagem de operação. Os componentes utilizados no circuito são listados a seguir:

- a) 1 microfone;
- b) 1 circuito integrado TL082;
- c) 2 resistores de $1k\Omega$ de $\frac{1}{4}$ watt;
- d) 3 resistores de $10k\Omega$ de $\frac{1}{4}$ watt;
- e) 1 resistor de $576k\Omega$ de $\frac{1}{4}$ watt;
- f) 1 capacitor eletrolítico de $1\mu F$;
- g) 1 capacitor eletrolítico de $470\mu F$;
- h) 1 capacitor de poliéster de $1\mu F$;
- i) 1 *Arduino Uno*;
- j) 1 cabo USB;
- k) 1 *protoboard*;
- l) Fios *jumper*.

A montagem deste circuito foi dividida em duas etapas, uma etapa de amplificação e uma de conversão.

- a) Amplificador: Na etapa de amplificação a amplitude do sinal foi aumentada de cerca de mais ou menos de 200 mV para mais ou menos 2 V. O amplificador teve outra função no circuito ainda, a de proteger a fonte de áudio do resto do circuito, no caso o microfone. Isso foi feito através da montagem de um amplificador operacional, por meio do circuito integrado TL082 em uma configuração de amplificador. As especificações do fabricante diz que o TL082 deve ser alimentado com 15 V e -15 V, desde que o sinal nunca seja amplificado acima de $\pm 2,5$ V, portanto, o amplificador operacional foi executado com uma fonte de alimentação menor, com o 5 V do próprio *Arduino*. Lembrando que o microfone deve ser conectado na entrada não-inversora do TL082. Ainda foi utilizado um resistor $576 k\Omega$ entre a saída e a entrada inversora do amplificador, a fim de evitar danos nos componentes. Foi utilizado dois resistores de $10 k\Omega$ para definir o ganho do amplificador não-inversor, o ganho definido foi de 2 V. Tendo como base o amplificador ilustrado no diagrama esquemático da Figura 13 é possível descrever as amplitudes relativas do sinal antes e depois do amplificador não-inversor, Equação 3.

$$V_{saída} = V_{ent} \sim \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \text{ ou } \frac{V_{saída}}{V_{ent}} = \sim 1 + \frac{R2}{R1} \quad (3)$$

Onde:

R = resistência de realimentação (entre a saída e a entrada não-inversora);

$V_{saída}$ = amplitude do sinal de saída (a saída do amplificador);

V_{ent} = amplitude do sinal de entrada (a entrada do amplificador).

- b) Conversor CC: Um conversor CC é um circuito eletrônico que altera uma dada tensão ou corrente contínua de uma determinada amplitude em outra tensão ou corrente. No caso do circuito desenvolvido, o circuito CC foi utilizado para converter o sinal de saída do amplificador, fazendo com que o sinal de áudio oscilasse em torno de uma tensão de ± 2 V, ou seja, o conversor permitiu que o sinal ficasse limitado dentro do intervalo aceitado pelas entradas analógicas do *Arduino* sem saturar, em outras palavras, sem valores negativos, ficando no intervalo de 0 – 4 V. A montagem do circuito de conversor CC teve dois componentes principais: o divisor de tensão e o capacitor 1 μ F. O divisor de tensão foi constituído por dois resistores um de 1k Ω e um de 10 k Ω ligados em série e alimentados pela fonte de 5 V do *Arduino*. A tensão de junção dos dois resistores foi de 2 V. Tal junção foi ligada à saída do amplificador através do capacitor de 1 μ F.

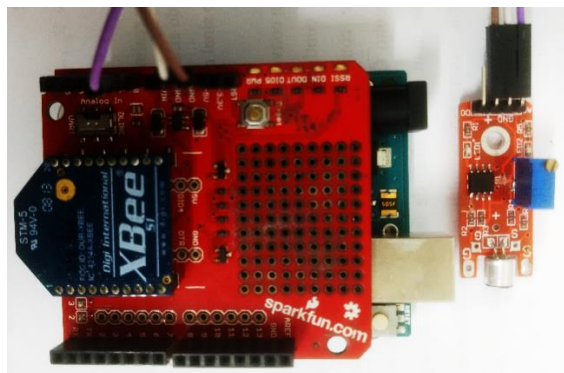
Na avaliação dos microfones, os testes mostraram que os microfones de condensador e de eletreto obtiveram um resultado bastante similar, porém o microfone de eletreto obteve um melhor resultado. Já os resultados do microfone dinâmico não foram satisfatórios. Além disso, os microfones de condensador e de eletreto são esteticamente mais harmônicos com os dispositivos desenvolvidos.

4.3 DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO COM BASE NA PLATAFORMA ARDUINO

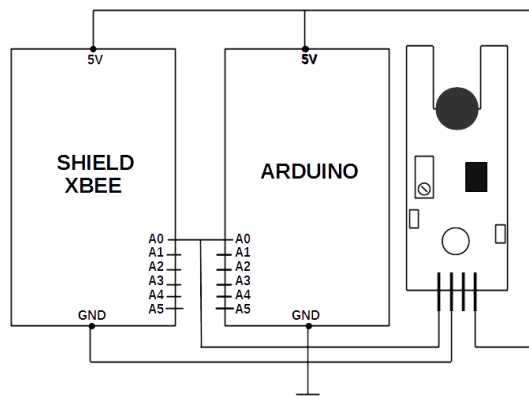
O dispositivo de medição *Arduino* foi desenvolvido com base na plataforma *Arduino* e o circuito utilizado foi o KY-38. Inicialmente foi desenvolvido um circuito com base na proposta de Ghassaei (2008), entretanto, por questões devido ao mal contato da *protoboard* foi feita a opção pelo uso do circuito do sensor KY-038 já existente. No

desenvolvimento do dispositivo foi utilizado o *Arduino Uno*, o sensor KY-038, a placa de comunicação *Xbee*, cabo USB, fios de *jumpers* cujo funcionamento atendeu as expectativas. A Figura 14 ilustra o circuito utilizado e seu diagrama esquemático.

Figura 14 - Dispositivo baseado no *Arduino*



(a) Foto do dispositivo



(b) Diagrama esquemático do dispositivo

Fonte: Dados do próprio autor

Para ler o sinal de áudio foi desenvolvido um código, via IDE do *Arduino*, que lê o sinal de entrada (tensão) utilizando o comando “`analogRead`” onde cada nível do sinal lido corresponde a um número entre 0 e 1023 que é armazenado como uma variável. Nos testes realizados, utilizando o Gerador de Sinal Tektronix AFG3021C para simular o sinal de tensão de entrada no *Arduino*, ficou demonstrado que a utilização do dispositivo para medidas acústicas não é a mais adequada, em função da limitação da taxa de amostragem. Foram realizadas várias simulações em que o gerador de sinal era utilizado para gerar uma senóide com níveis de tensão compatível e variando a respectiva frequência. Neste caso, o sinal gerado era digitalizado e posteriormente, os valores do sinal digitalizado armazenados na variável eram utilizados para alimentar a porta digital de entrada do *Arduino*, gerando assim, um sinal analógico de saída a partir do sinal digitalizado. O sinal de saída da porta analógica do *Arduino*, gerado a partir da conversão do sinal digital em analógico foi comparado com o sinal original utilizando o Osciloscópio Tektronix TBS1064. Nas comparações foi observado que a máxima taxa de amostragem alcançada foi de aproximadamente 333 μ s, ou seja, 3000 Hz.

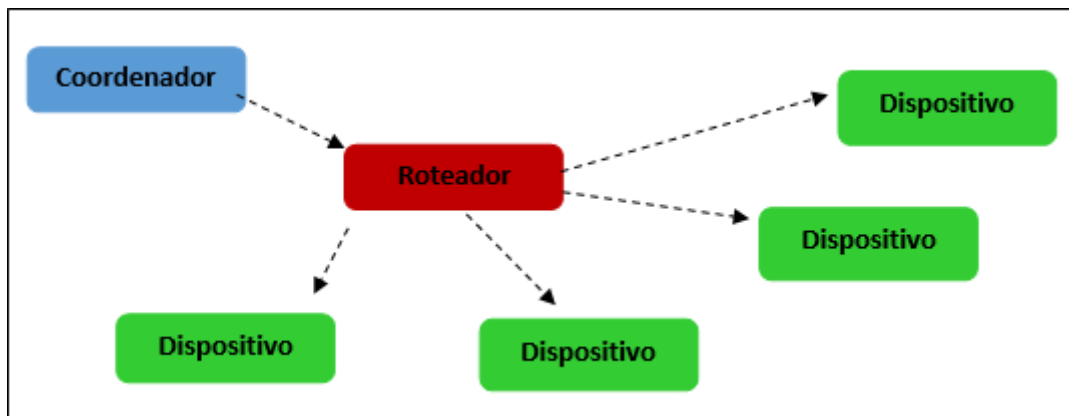
Buscando contornar esta limitação, se buscou uma forma de estender a taxa de amostragem, para isso foi realizada uma alteração do número de níveis utilizados na conversão do sinal que foi reduzido de 0 a 1023 para 0 a 255 níveis. No entanto, a taxa

de amostragem obtida foi de 10 kHz em detrimento da resolução dos níveis de amplitude (divisões) do sinal analógico, mesmo assim os valores máximos conseguido ainda ficaram abaixo da taxa utilizada para sinal de áudio que é de 40kHz.

4.3.1 Módulo de Transmissão

No módulo de transmissão, considerando que a proposta envolve a operação remota do dispositivo de medição, em que tanto o controle de operação como a análise dos dados poderia ser feita a partir de um computador a distância, foi utilizado um módulo *Wireless*. O modelo utilizado foi o *Xbee*, que é um componente eletrônico capaz de realizar a comunicação sem fio até 100 pés (30,48 m) dentro de um ambiente fechado (com paredes) e até 300 pés (91,44 m) em ambiente livre. Este módulo permite uma comunicação eficiente e confiável entre computadores, microcontroladores e sistemas que dispõem de interface serial.

Para a comunicação, inicialmente é necessário instalar a placa *Xbee Explorer USB* conectando-a a uma porta USB do computador, pois assim é possível programar, configurar e atualizar o módulo *Xbee*. A instalação é feita pelo *software* XCTU e após a instalação já é possível realizar a comunicação entre o *Xbee* e o *Arduino*. Para isso é preciso conectar o computador no *Xbee Explorer USB* e conectar o *Arduino* a *Xbee Shield*. A comunicação dos dois módulos é feita a partir do cadastro do nome, do número da rede e do endereço físico de cada módulo em ambos dispositivos. A rede *Xbee* deve ter pelo menos um módulo configurado como coordenador, o qual tem a função de iniciar a rede e comunicar-se com o outro módulo, que funciona no modo roteador, este último comunica-se com os dispositivos finais. Na Figura 15 é mostrada uma ilustração do esquema de funcionamento de uma rede *Xbee*.

Figura 15 - Rede Xbee

Fonte: Dados do próprio autor

Ainda no IDE do *Arduino* foi necessário determinar a velocidade de transmissão dos dados via porta serial, a qual foi definida no ambiente *Matlab*. Para realizar essa comunicação primeiramente foi necessário instalar no *Matlab* o pacote do *Arduino* que está disponível no próprio *site* do *Matlab*. A comunicação foi executada por meio de uma porta serial.

Assim como no *Arduino*, no *Matlab* também foi necessário realizar algumas especificações. Primeiramente foi preciso verificar a porta serial e a velocidade de transmissão da porta. Em seguida, foi realizada a aquisição do sinal. Logo depois a porta serial deve ser fechada.

4.4 DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO COM BASE NO OPENWRT

O dispositivo de medição *OpenWrt* foi desenvolvido com base no uso do sistema *OpenWrt* juntamente com um roteador. O sistema *OpenWrt*, conforme discutido anteriormente, é um software livre que permite mudar o *firmware* do fabricante de um dado dispositivo, como por exemplo, reprogramar um roteador para fazer uma outra tarefa específica. Os componentes e materiais utilizados no desenvolvimento e montagem do dispositivo de medição *OpenWrt* foram um microfone Panasonic Wm-55A, uma placa de som, um roteador *TP-link: TL-MR3020*, um *pen drive* e um *hub*. Neste caso, o módulo de comunicação remota (módulo *Wireless*) do dispositivo de medição com o computador utilizado no dispositivo de medição *Arduino* foi substituído por um roteador.

A montagem eletrônica do dispositivo de medição neste caso foi mais simples, visto que os componentes utilizados são dispositivos comerciais que não envolve uma

dificuldade maior na conexão e montagem dos mesmos. Na Figura 16 é mostrado um foto do dispositivo montado.

Figura 16 - Dispositivo baseado no *OpenWrt*



Fonte: Dados do próprio autor

O primeiro passo para a operação do dispositivo foi a realização da troca do *firmware* original do roteador pelo *firmware* do *OpenWrt* versão v1.23.2. Quando essa alteração é feita, é necessário estabelecer uma senha de acesso para o endereço IP do roteador. O *OpenWrt* possui a interface *LuCi*, nela é possível realizar alterações no *script*, porém essa não é a única maneira de ter acesso ao *firmware*. Outra maneira, a qual foi utilizada neste trabalho, é através do aplicativo *PuTTY*. Na Figura 17 é ilustrado o *design* deste aplicativo, onde é necessário definir o endereço IP, a porta utilizada e o tipo de conexão.

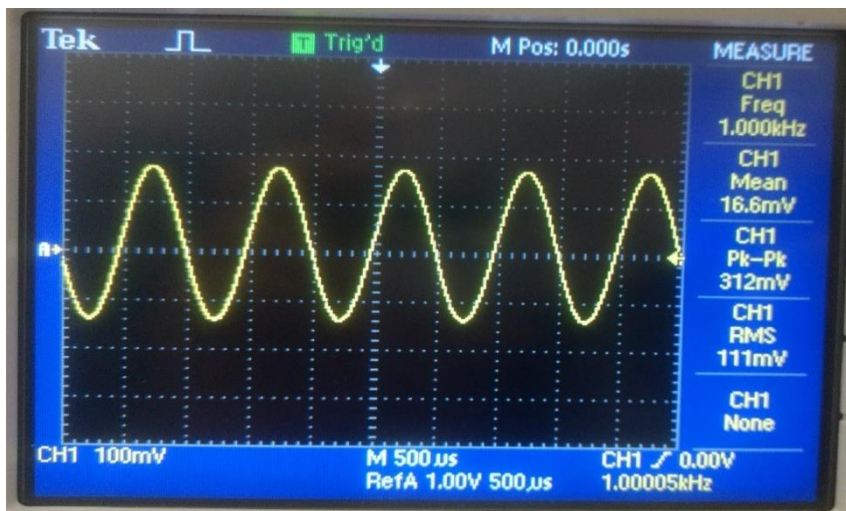
configuração, pacote *Samba* e o pacote *Socat*. O pacote *Samba* possibilita o compartilhamento dos dados armazenados e o pacote *Socat* permite o acesso aos dados por meio de uma comunicação serial com *Matlab*. A instalação desses pacotes permitiu o acesso ao *pen drive* que será utilizado como uma extensão da memória do roteador, visto que o mesmo possui uma memória RAM de 32 MiB e memória *Flash* de 4 MiB que não é o suficiente, nem mesmo para a instalação e configuração do *firmware* do dispositivo desenvolvido. O processador do roteador é Atheros AR9331@400Mhz.

No *pen drive* foi criado duas partições, uma para *firmware* e outra para a gravação dos dados. Em seguida foi instalado o pacote da placa de som que juntamente com o microfone e roteador realizam a captura do som. Neste momento, o dispositivo de medição já é capaz de realizar a gravação do sinal do sensor de pressão (microfone), através de comando “*arecord*” e das especificações da taxa de amostragem e número de *bits*. Neste caso, foram utilizados taxa de 44100 Hz e 16 *bits*, valores adequados para a gravação de um áudio. Para o compartilhamento dos dados armazenados no sistema foi necessário a instalação do pacote *Samba* e o pacote *Socat* foi utilizado para o acesso aos dados por meio de uma comunicação serial com *Matlab* que é o *software* utilizado no processamento e análise dos dados.

Para realização de todas as etapas do processo é necessário especificar no *script*, não só o comando de gravação e as especificações de áudio, mas também a porta de compartilhamento, no caso tcp-I:7000. O comando necessário para realizar a gravação é: `socat tcp-I:7000,reuseaddr,fork,system:"arecord -r44100 -fS16_LE"`, ver Figura 19.

Nesta etapa de montagem e avaliação foram realizados alguns testes para verificar os níveis máximos de tensão que o sistema suporta sem que o sinal capturado sofra distorção. Para isso, foi utilizado o Gerador de Sinal Tektronix AFG3021C e o Osciloscópio Tektronix TBS1064, onde foram gerados vários sinais (senóides) com os níveis de amplitude variando para observar quando o sistema apresenta distorção do sinal. Foi observado que voltagens superior a 312 mV pico a pico leva a uma distorção do sinal, Figura 19.

Figura 19 - Teste com osciloscópio no sistema *OpenWrt*



Fonte: Dados do próprio autor

Assim como no roteador, no *Matlab* também foi necessário realizar especificações. Primeiramente, foi preciso verificar o endereço de IP e a porta serial, assim como especificar o tamanho do *buffer*, que é uma região de memória física utilizada para armazenar temporariamente os dados enquanto eles são transferidos de um lugar para outro, o tamanho padrão utilizado pelo sistema *OpenWrt* é de 512 Kbps. Ainda é preciso determinar o tempo de análise e a taxa de amostragem, desde modo a conexão TCP é estabelecida. Por fim, foi preciso fornecer as especificações sobre a gravação de áudio, no caso o cabeçalho *wave*, visto que a gravação dos dados é feita neste formato, portanto foi determinado que o áudio possui 16 *bits*, pertencendo ao cabeçalho 23. Em seguida, é realizada a aquisição do sinal. Logo depois a porta serial deve ser fechada.

4.5 CUSTOS DOS COMPONENTES DOS DOIS DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO

Finalmente, na Tabela 1 é apresentada uma estimativa dos custos dos componentes utilizados no desenvolvimento do dispositivo de medição com base na plataforma *Arduino* e do dispositivo de medição com base no *OpenWrt*. Com relação aos custos de desenvolvimento dos dispositivos, outras variáveis estão envolvidas, principalmente, confiabilidade e a exatidão do equipamento o que torna difícil uma comparação direta dos valores dos dispositivos, além é claro do próprio tempo despedido no desenvolvimento de cada dispositivo.

Tabela 1 - Custos dos dispositivos de medição de ruído

Dispositivo baseado no <i>Arduino</i>			Dispositivo baseado no <i>OpenWrt</i>		
Item	Uni.	Custo (R\$)	Item	Uni.	Custo (R\$)
Sensor KY-038	1	19,90	Microfone Panasonic Wm-55A	1	65,00
<i>Arduino Uno</i>	1	119,00	Roteador <i>TP-link: TL-MR3020</i>	1	60,00
<i>Xbee</i>	1	251,04	Placa de som	1	7,00
Kit de fios <i>jumber</i>	1	16,90	<i>Pen drive</i>	1	13,00
			<i>Hub</i>	1	16,00
Total		406,84			161,00

Fonte: Dados do próprio autor

Adicionalmente, foi feito um levantamento visando obter a ordem de preços de vários sistemas comerciais e foram encontrados equipamentos para compra pela internet de todos os preços, desde algumas dezenas de reais até valores na ordem de várias dezenas de milhares de reais. Por exemplo, o medidor de ruído digital portátil DT-85A que trabalha com uma faixa de frequência de 31,5 Hz ~ 8KHz, faz as medições em nível de pressão sonora com a ponderação A e utilizando como sensor um microfone de condensador pode ser encontrado ao preço de 99 reais, já um medidor profissional como o *Solo Black SLM* da 01 dB que é um medidor integrador de nível de pressão sonora de alta precisão, com controle integrado multifrequência e multinível de toda a cadeia de medição, do microfone aos níveis exibidos na tela, que trabalha com uma faixa de frequência de 12.5 Hz ~ 20 kHz e custa em torno de 20 mil dólares.

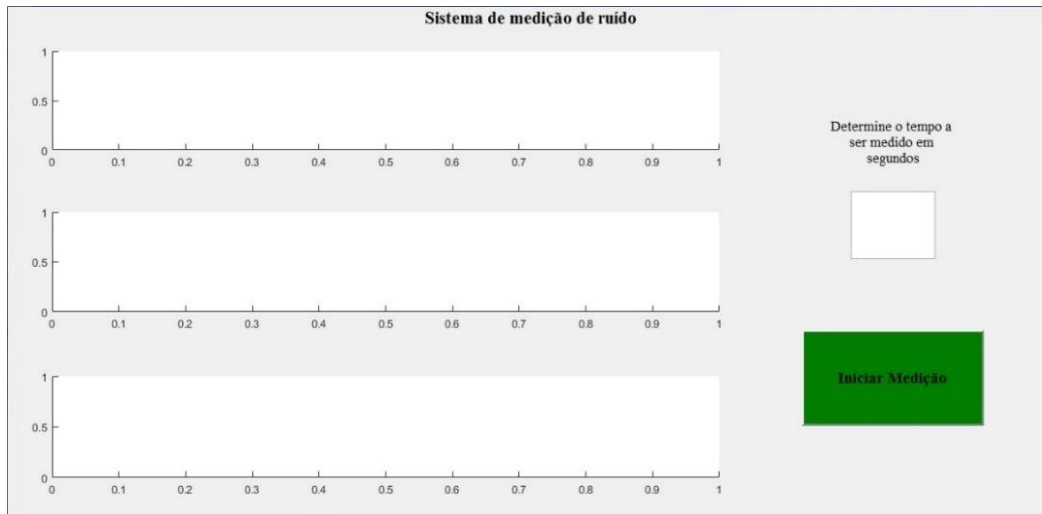
5 AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE RUÍDO

Neste capítulo é discutido a implementação computacional dos algoritmos de cálculo e a avaliação de desempenho do dispositivo de medição de ruído. Inicialmente é apresentada a interface gráfica e o algoritmo utilizado para calcular os níveis de pressão sonora, ponderação A. Posteriormente é discutido a obtenção da constante de calibração e avaliação do dispositivo e finalmente, os dispositivos de medição de ruído são utilizados em alguns testes de laboratório e os resultados obtidos são comparados com valores obtidos com um medidor comercial.

5.1 INTERFACE GRÁFICA - AMBIENTE MATLAB

Esta etapa, considerando que o sinal de áudio já está disponível no ambiente *Matlab*, corresponde a análise e processamento do sinal para o cálculo dos valores dos níveis de ruído medidos. Os procedimentos de cálculo e definição da escala de observação dos valores medidos foram definidos de acordo as especificações da NR-15, que requer a medição de nível de ruído com um instrumento de nível de pressão sonora operando no circuito de ponderação “A” com um tipo de resposta “*Slow*”. Nos dois dispositivos, o cálculo dos valores e a ponderação é realizada no *software*.

Na Figura 20 é mostrado o *Layout* da interface gráfica do dispositivo de medição. A execução do processo de medição é bastante simples, para isso basta acionar o *button* iniciar a medição. O usuário pode ainda definir o tempo de medição que ele deseja observar, uma vez definido esse parâmetro o processo de medição pode ser iniciado. Além disso, é possível trabalhar com qualquer taxa de amostragem que seja suportada pelo *hardware*. Como interface de saída o usuário tem o gráfico do sinal bruto captado pelo sensor (microfone), o gráfico do sinal de nível de pressão sonora já convertido utilizando a sensibilidade do microfone e o gráfico dos níveis de pressão sonora utilizando ponderação “A”, resposta “*Slow*”.

Figura 20 - Interface gráfica do dispositivo de medição de ruído

Fonte: Dados do próprio autor

Os cálculos e a ponderação do NPS foram realizados com base no trabalho de Lanman (2005). Neste caso, foi utilizado um filtro de ponderação (ponderação A) em frequência, onde foi utilizada a Transformada de Fourier Discreta (DFT) para determinar os espectros de frequências do segmento do sinal áudio de entrada. O comprimento da janela foi definido com base nos tempos de respostas utilizados pelos medidores de nível de pressão sonora comerciais, resposta “Fast” e “Slow”. No caso de respostas “Fast” são da ordem de 125 ms, enquanto que as respostas “Slow” são aproximadamente 1s. Para implementação da transformada de Fourier foi usada a função FFT do *Matlab* e o comprimento de janela utilizado foi de potência de dois.

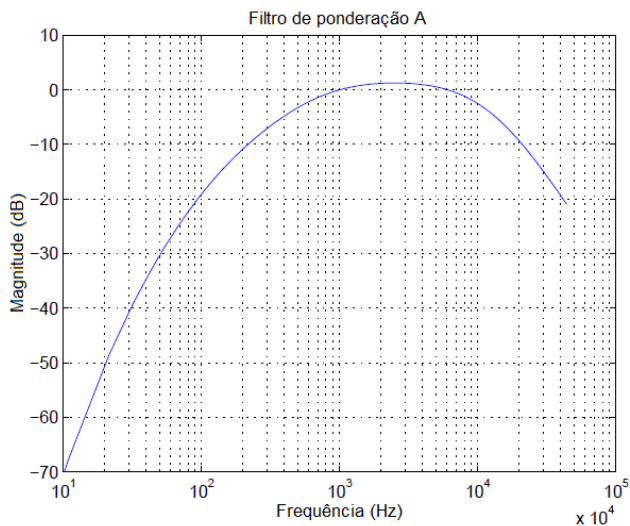
O filtro de ponderação A, conforme discutido anteriormente, foi desenvolvido com a função de modelar a resposta do ouvido humano. Os valores de ponderação utilizados na curva de ponderação A correspondem a uma média empírica obtida através de uma ampla amostra de experiências perceptivas. A curva de ponderação A pode ser obtida junto as organizações internacionais de normalização, o *American National Standards Institute* (ANSI), por exemplo. Porém para o medidor em questão os valores foram calculados utilizando Equação 4 (Lanman, 2005).

$$\alpha_A(f) = \frac{(3,5041384 \times 10^{16})f^8}{(20,598997^2 + f^2)^2 \times (107,65265^2 + f^2) \times (737,86223^2 + f^2) \times (12194,217^2 + f^2)^2} \quad (4)$$

A resposta do filtro $\alpha_A(f)$ é ilustrada graficamente na Figura 21, onde é possível observar, na escala dB, que o filtro de ponderação A tem um pico de resposta próximo de

3kHz, que rapidamente cai para frequência mais baixas e que a atenuação ocorre gradualmente na faixa de 3kHz para 22,05kHz. Essa é uma aproximação grosseira do sistema auditivo humano que permite uma quantificação do nível sonoro em relação ao homem.

Figura 21 - Filtro de ponderação A em escala Decibel



Fonte: Lanman (2005)

Os coeficientes da FFT ponderadas pelos os coeficientes do filtro de ponderação A são obtidos através da equação 5.

$$X_A(k) = \alpha_A(f)X(k), \text{ para } f_k = k\Delta f \quad (5)$$

O cálculo do nível de som em dB(A) é feito a partir da energia do sinal no intervalo definido para análise, resposta “Fast” ou resposta “Slow”. A energia do sinal, em geral, é calculada em tempo, como a soma das magnitudes quadráticas das amostras. Entretanto, o que se tem disponível no momento é o espectro do sinal ponderado (curva A) e não o sinal em tempo o que torna inviável o cálculo da energia desta forma. Neste caso, a energia total do sinal foi calculada por integração do sinal em frequência para depois, com base no teorema de Parseval, estimar a energia em tempo. Isso reduz muito a complexidade dos cálculos pois, caso contrário, seria necessário a transformada inversa da FFT para cálculo da energia.

De acordo com o teorema de Parseval as energias em tempo-frequência são equivalentes, Equação 6.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 \quad (6)$$

Onde: ε_x energia do sinal;

$X[K]$: frequência da amostra.

Considerando que para sinais reais as componentes da DFT são complexo conjugados simétricos a energia do sinal pode ser calculada usando apenas primeiras $\frac{2}{N} + 1$ amostras do espectro do sinal ponderado em A, Equação 7.

$$\varepsilon_x \approx \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N/2} |X_A[k]|^2, \text{ para } x[n] \in \mathbb{R} \quad (7)$$

A equação acima pode ser utilizada para estimar a energia total do sinal no intervalo observado. Uma vez que o medidor pode ser utilizado para diferentes taxas e intervalos de observação, a energia é estimada em termos da potência média do sinal. Para um dado intervalo de observação de ΔT segundos a energia média instantânea do sinal é dada pela Equação 8.

$$\tilde{\varepsilon}_x \approx \frac{2}{N\Delta T} \sum_{k=0}^{N/2} |X_A[s]|^2 \quad (8)$$

Agora, para obter o valor numérico de saída do nível sonoro em dB(A) (Ponderação A em decibel), conforme discutido anteriormente, é necessário o sinal de referência, ou seja, a pressão sonora de referência cujo valor é de $20\mu Pa$. Considerando que se tenha o sinal de referência i.e., $\tilde{\varepsilon}_{ref}$ o NPS (dB(A)) pode ser dado pela Equação 9.

$$NPS = 10 \log_{10} \frac{\tilde{\varepsilon}_x}{\tilde{\varepsilon}_{ref}} = 10 \log_{10} \tilde{\varepsilon}_x - 10 \log_{10} \tilde{\varepsilon}_{ref} \quad (9)$$

O termo $10 \log_{10} \tilde{\varepsilon}_{ref}$ é uma constante fixa de forma que o expressão em dB(A) pode ser dada pela Equação 10.

$$NPS = 10 \log_{10} \tilde{\varepsilon}_x - C \quad (10)$$

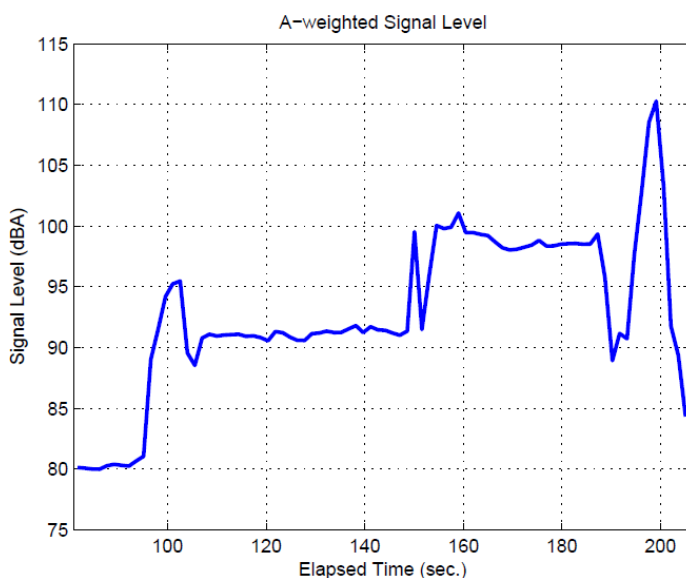
A constante C pode ser determinada por condições de calibração. Isso pode ser feito usando um sinal com nível conhecido em dB(A) ou utilizando um medidor de melhor exatidão para estimar o valor da constante C . Ao longo da implementação foi utilizado um sinal de teste cujos os níveis de dB(A) são conhecidos, já no processo final de calibração foi utilizado o medidor de comercial *Solo Black SLM* da marca 01dB.

5.2 TESTE DE VALIDAÇÃO DO CODIGO IMPLEMENTADO

A fim de demonstrar a efetividade dos algoritmos implementados para os cálculos dos valores e níveis de ruído do sinal medido pelo dispositivo, inicialmente a avaliação foi feita utilizando um sinal de ruído não medido diretamente com o dispositivo, mas sim utilizado um sinal de ruído conhecido, ou seja, um sinal conhecido (referência) que pudesse ser utilizado para comparação dos valores. Neste caso, foi utilizado o sinal referente ao ruído produzido por um caminhão de lixo em funcionamento disponível em Lanman (2005) cujos níveis de ruído estimados foram comparados com os níveis obtidos em Lanman (2005).

Na Figura 22 é reproduzido o sinal em tempo, em nível de pressão sonora na ponderação A, resposta “*Slow*” obtidos por Lanman (2005).

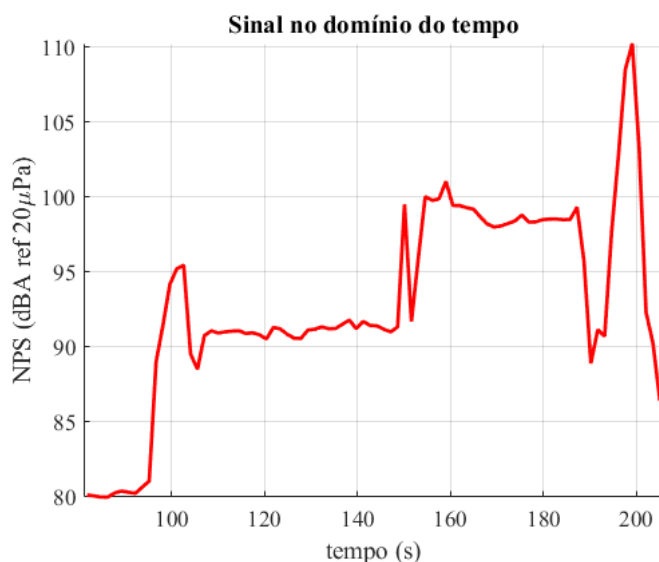
Figura 22 - Nível de pressão sonora de Lanman



Fonte: Lanman (2005)

Já na Figura 23 é mostrado o resultado obtido com o algoritmo implementado, em que o nível de pressão sonora também é calculado na ponderação A, resposta “*Slow*”. A constante de calibração utilizada foi à mesma utilizada por Lanman.

Figura 23 - Nível de pressão sonora do sistema desenvolvido



Fonte: Dados do próprio autor

Uma comparação dos gráficos mostra que os níveis de pressão sonora obtidos são equivalentes em ambos os gráficos ao longo do sinal, o que permite afirmar que o algoritmo desenvolvido é efetivo no cálculo dos níveis de pressão sonora.

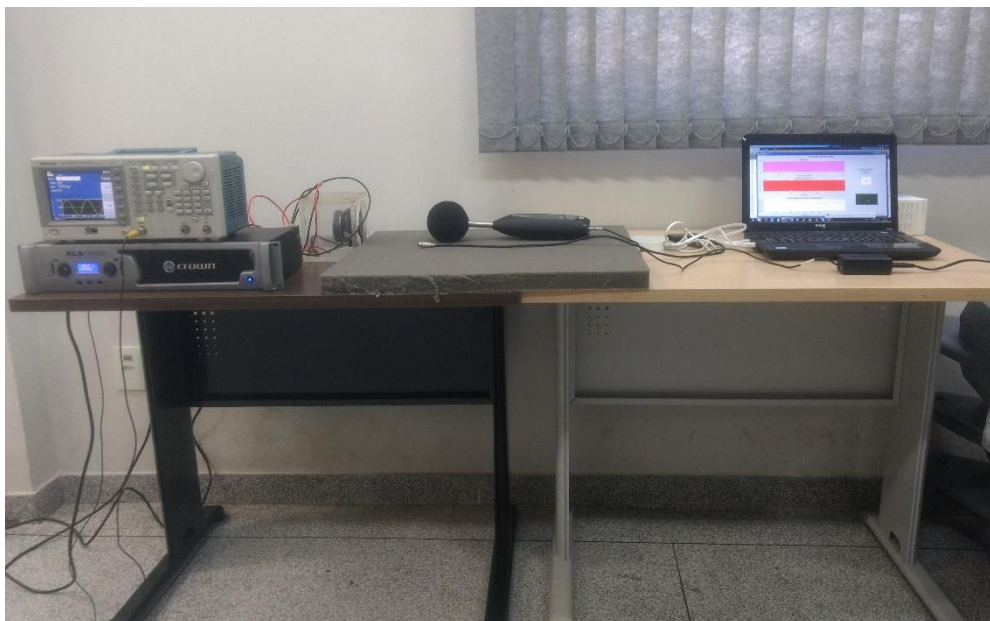
5.3 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO C

Para determinar o valor da constante de calibração C do dispositivo de medição de pressão sonora desenvolvido foi utilizado o medidor de nível de pressão sonora comercial *Solo Black SLM* da 01 dB, onde ambos os sistemas eram utilizados simultaneamente para medir o mesmo sinal de ruído. Os ensaios foram realizados em uma sala com tratamento acústico que permite um razoável isolamento em relação ao ambiente externo e o ruído ambiente (sala) medido nos testes foi o ruído gerado por um Gerador de Sinal *Tektronix AFG3021C*.

Nos testes os microfones dos dois medidores foram posicionados a uma mesma distância e direção do gerador de ruído e o gerador foi acionado pra produzir o sinal a ser medido. Num primeiro momento foram gerados sinais de um único tom em diferentes

frequências, mais especificamente, nas frequências de 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Cada sinal foi medido simultaneamente por ambos os sistemas, modo de resposta “*Slow*”, ponderação A e posteriormente comparados para determinação da constante C. Na Figura 24 é mostrada a bancada utilizada no processo de obtenção da constante de calibração do dispositivo de medição.

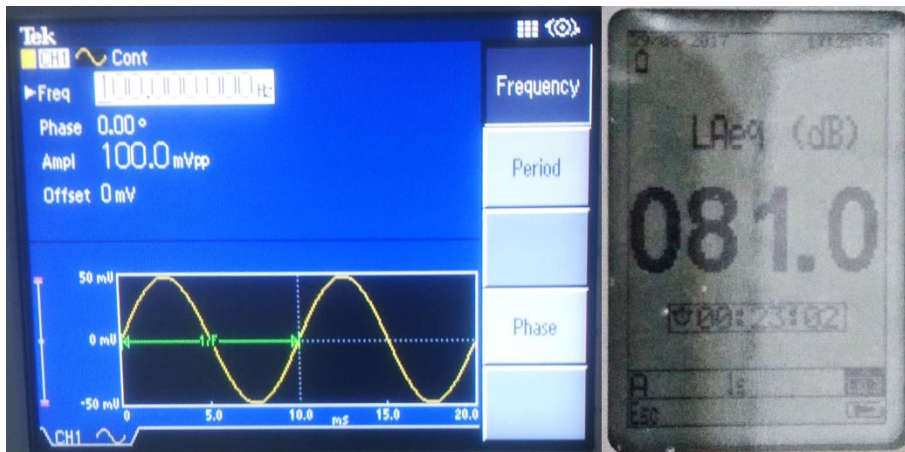
Figura 24 - Bancada utilizada para obtenção da constante de calibração do dispositivo.



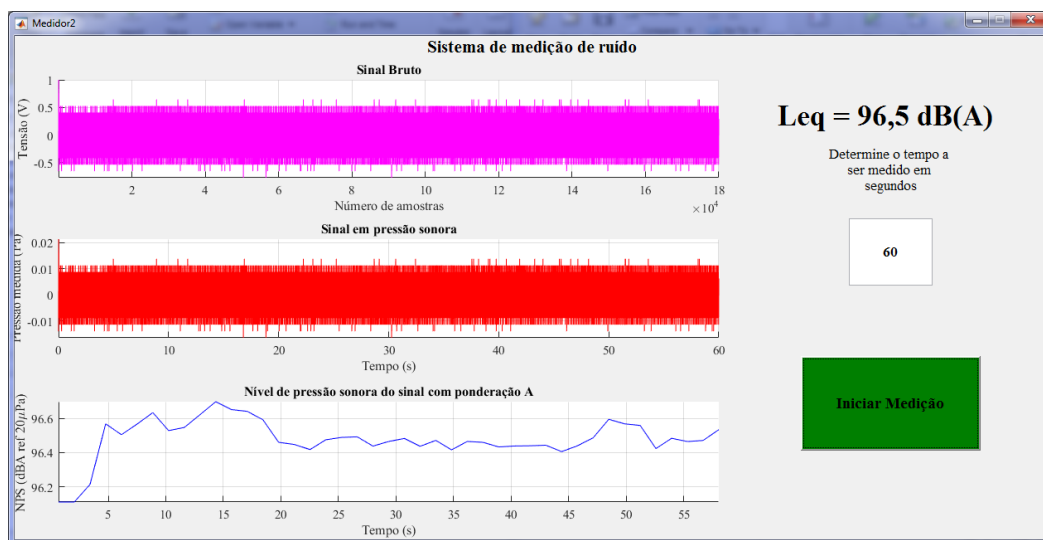
Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 25 são mostrados os resultados obtidos quando da geração de um sinal senoidal, frequência de 100 Hz, medido pelo sistema comercial e pelo dispositivo de medição *Arduino*. Na Figura 25a é mostrada a senóide de frequência de 100 Hz e amplitude de 100 mV pico a pico, observada em um osciloscópio *Tektronix* juntamente com a “tela” do medidor *Solo Black* mostrando o valor medido, 81 dB(A). Já na Figura 25b são mostrados os gráficos do sinal medido com o dispositivo, em voltagem, pressão sonora e nível de pressão acústica bem como o valor medição 96,5 dB(A).

Figura 25 - Teste para determinação da constante C do dispositivo baseado em *Arduino*



(a) Senóide de 100 Hz gerada com *Tektronix AFG3021C* e medição feita com o medidor comercial

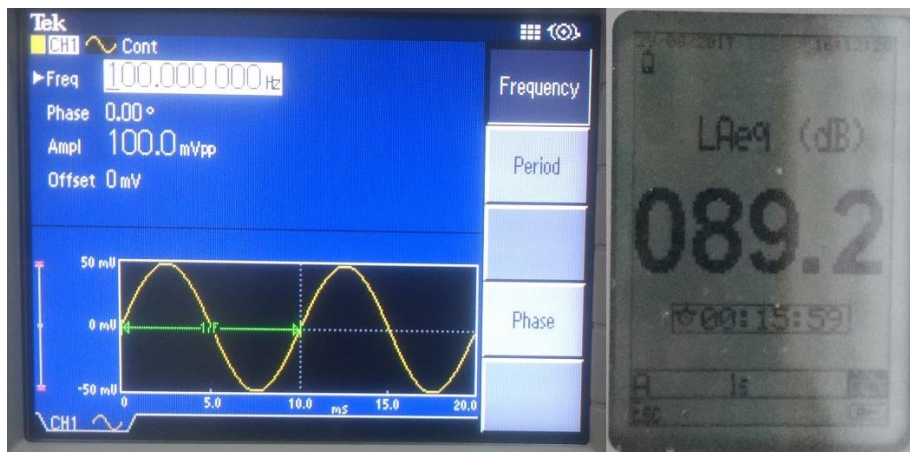


(b) Resultados obtidos com a medição feita pelo dispositivo implementado da onda senoidal de 100 Hz
Fonte: Dados do próprio autor

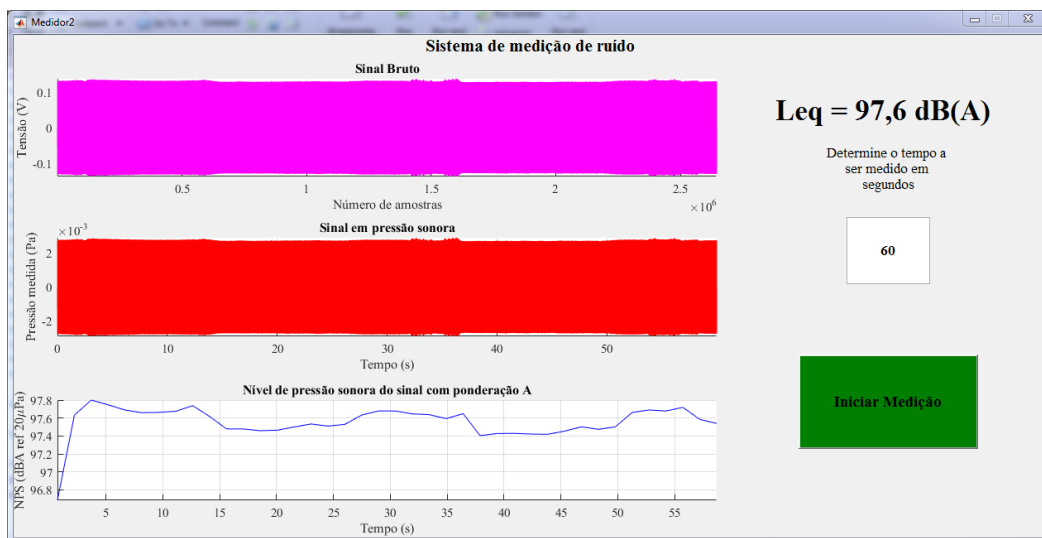
A partir da comparação dos valores obtidos com os valores do medidor comercial (referência) foi possível determinar o valor da constante de calibração C do dispositivo de medição em questão, $C = 76,8$.

O mesmo processo discutido acima foi realizado para o cálculo da constante de calibração C do dispositivo desenvolvido com o *OpenWrt*. Na Figura 26a é mostrado a senóide de frequência de 100 Hz e amplitude de 100 mV pico a pico observada no osciloscópio e o valor medido pelo Solo Black 89,2 dB(A) e na Figura 26b são mostrados os gráficos e valor medido com o dispositivo *OpenWrt* 97,6 dB(A)

Figura 26 - Teste para determinação da constante C do dispositivo baseado no *OpenWrt*



(a) Senóide de 100 Hz gerada com *Tektronix AFG3021C* e medição feita com o medidor comercial



(b) Resultados obtidos com a medição feita pelo dispositivo implementado da onda senoidal de 100 Hz

Fonte: Dados do próprio autor

Neste caso, a constantes de calibração obtida para dispositivo de medição *OpenWrt* foi de 63,6.

É importante ressaltar que os valores de amplitude utilizados nos dois experimentos não foram os mesmos, no experimento envolvendo o dispositivo de medição *OpenWrt* o valor de amplitude utilizado foi 8 dB(A) maior. Essa diferença foi devido ao fato de não ter sido utilizado o mesmo ganho do amplificador nos dois experimentos, uma vez que o foco não foi a comparação dos dois dispositivos entre si, mas sim a obtenção da constante de calibração a partir da comparação do dispositivo de medição com o medidor *Solo Black*.

Outro aspecto a ser ressaltado, conforme pode ser observado nos gráficos, é que o sinal obtido pelo dispositivo com base no *Arduino* apresenta uma contaminação devido a ruídos de aquisição o que pode afetar a medição.

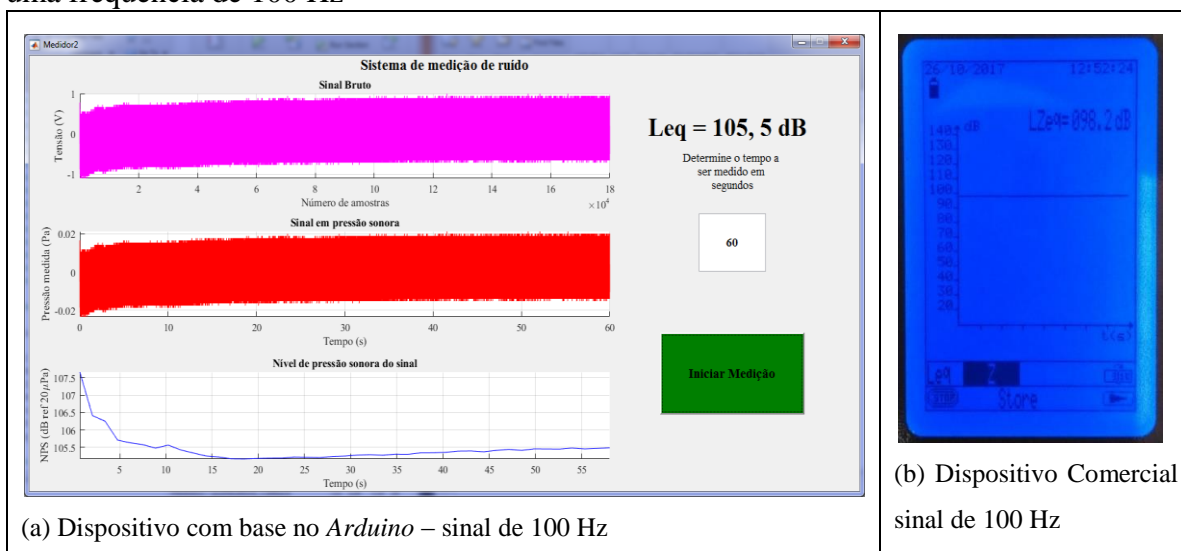
5.3 MEDIÇÃO DE SINAIS DE TOM PURO E O RUÍDO PRODUZIDOS POR UM GERADOR DE SINAL

Para uma avaliação mais efetiva dos dispositivos de medição de Nível de Pressão Sonora desenvolvidos, dispositivo desenvolvido com base no *Arduino* e com base no *OpenWrt*, os mesmos, agora já com os valores das constantes de calibração *C* determinados, foram utilizados para medir diferentes sinais acústicos. Inicialmente foram feitas medidas de sinais de tom puro, com frequências de 100 Hz, 500 Hz e 1000 Hz e posteriormente, um sinal referente ao ruído de um caminhão de lixo em funcionamento disponível em Lanman (2005). Os sinais foram gerados utilizando um gerador *Tektronix AFG3021C*. A proposta destes testes foi avaliar a resposta dos dispositivos em diferentes frequências isoladamente, bem como para medidas de um ruído com características similares a um ruído ambiental das grandes cidades. Em todos os testes os resultados obtidos com os dispositivos desenvolvidos foram comparados com os valores obtidos utilizando o medidor comercial *Solo Black SLM*.

As medições foram realizadas no modo de resposta “*Slow*”, com um tempo de duração de 60 segundos sem ponderação, pois a comparação direta sem pré-processamento nos pareceu mais adequada para confrontar os resultados.

Na Figura 27 são mostrados os resultados obtidos na medição do sinal de tom puro de 100 Hz produzido pelo Gerador de sinal utilizando o dispositivo de medição *Arduino* e o medidor comercial *Solo Black*. Na Figura 27a são mostrados os resultados obtidos utilizando o dispositivo, gráficos em voltagem, pressão sonora, nível de pressão acústica e o valor equivalente, *Leq*. Já na Figura 27b é mostrado à tela do medidor comercial com o valor medido.

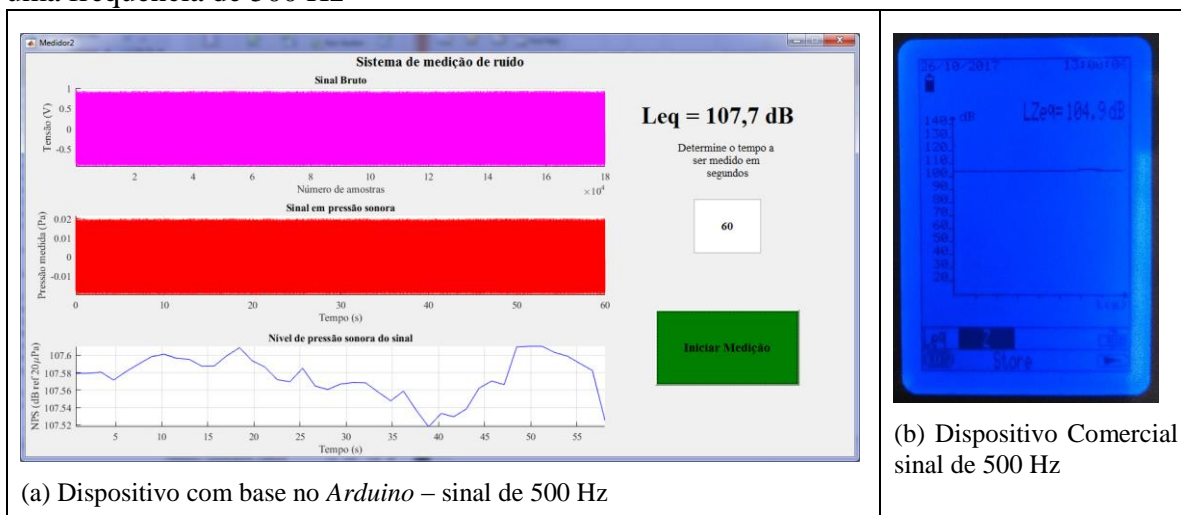
Figura 21 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo com base no *Arduino* para uma frequência de 100 Hz



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 28 são mostrados os resultados obtidos para a medição do sinal de tom puro de 500 Hz. Na Figura 28a são mostrados os gráficos obtidos utilizando o dispositivo e na Figura 28b é mostrada a tela do medidor comercial com o valor medido.

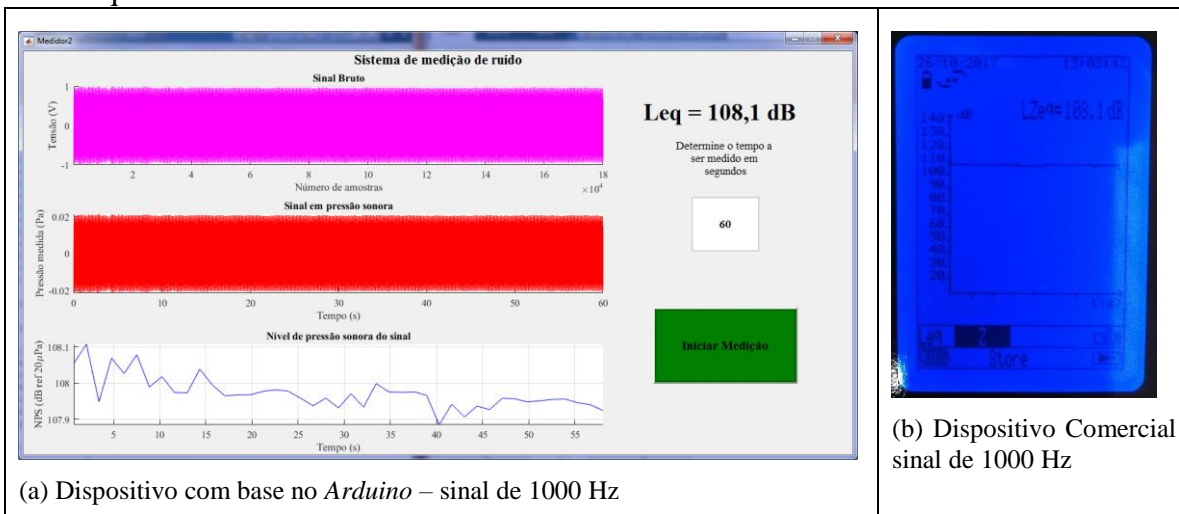
Figura 28 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em *Arduino* para uma frequência de 500 Hz



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 29 são mostrados os resultados obtidos para a medição do sinal de tom puro de 1000 Hz, na Figura 29a são mostrados os gráficos obtidos utilizando o dispositivo desenvolvido e na Figura 29b é apresentada a tela do medidor comercial com o valor medido.

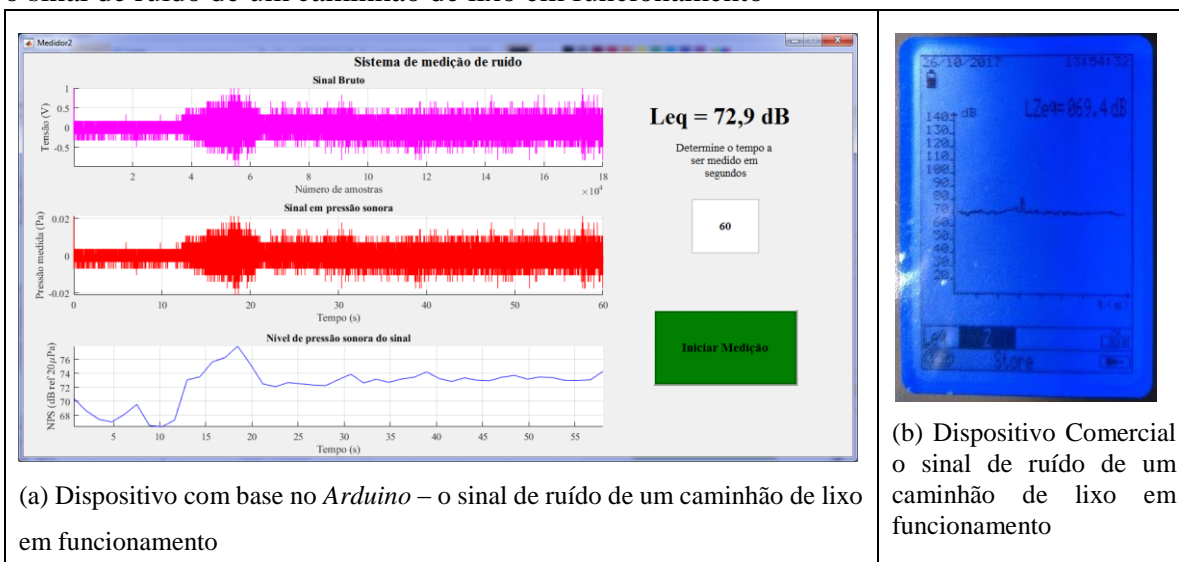
Figura 29 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em *Arduino* para uma frequência de 1000 Hz



Fonte: Dados do próprio autor

Já na Figura 30 são mostrados os resultados obtidos para a medição do sinal de ruído gerado por um caminhão de lixo em funcionamento. Na Figura 30a são mostrados os gráficos obtidos utilizando o dispositivo e na Figura 30b é apresentada a tela do medidor comercial com o valor medido.

Figura 30 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em *Arduino* para o sinal de ruído de um caminhão de lixo em funcionamento



Fonte: Dados do próprio autor

Na Tabela 2 são mostrados os resultados obtidos nas medições realizadas utilizando o dispositivo de medição *Arduino* e o sistema comercial *Solo Black*, bem como a diferença entre os dois sistemas.

Tabela 2 - Medidas obtidas nos testes com o dispositivo desenvolvido com o *Arduino* e o sistema comercial *Solo Black*

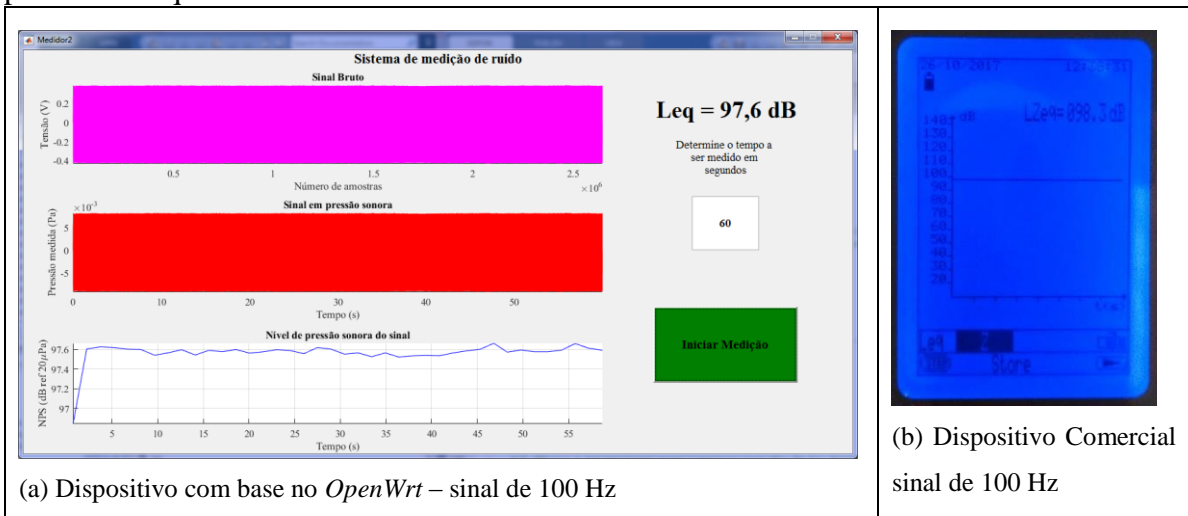
Sinal	<i>Arduino</i>	<i>Solo Black</i>	Diferença
100 Hz	105,5 dB	98,2 dB	6,92 %
500 Hz	104,9 dB	107,7 dB	2,6 %
1000Hz	108,1 dB	108,1 dB	0 %
Caminhão	72,9 dB	69,4 dB	3,22 %

Fonte: Dados do próprio autor

Analisando os resultados obtidos é possível verificar que as medições para os sinais de tom puro de frequências mais baixas apresentam uma diferença considerável, entretanto, para a frequência de 1000 Hz não existe diferença. Para a medição do sinal de ruído gerado por um caminhão de lixo em funcionamento a diferença é da ordem de 3%.

Os mesmos testes foram repetidos agora utilizando simultaneamente o dispositivo com base no *OpenWrt* e o medidor comercial *Solo Black*. Na Figura 31 são mostrados os resultados obtidos para a medição do sinal de tom puro de 100 Hz com o dispositivo desenvolvido com *OpenWrt* e o medidor comercial *Solo Black*. Na Figura 31a são mostrados os gráficos obtidos utilizando o dispositivo e na Figura 31b é mostrada a tela do medidor comercial com o valor medido.

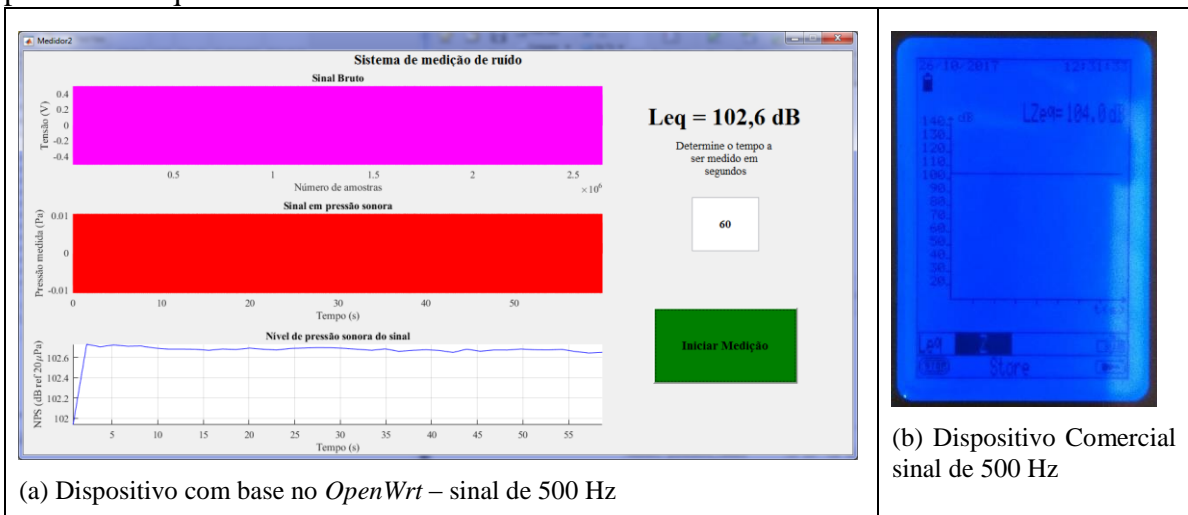
Figura 31 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo com base no *OpenWrt* para uma frequência de 100 Hz



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 32 são mostrados os resultados obtidos para a medição de sinal de tom puro de 500 Hz utilizando o dispositivo com base no *OpenWrt* e o medidor comercial *Solo Black*. Na Figura 32a são mostrados os gráficos obtidos utilizando o dispositivo e na Figura 32b é apresentada a tela do medidor comercial com os valores medidos.

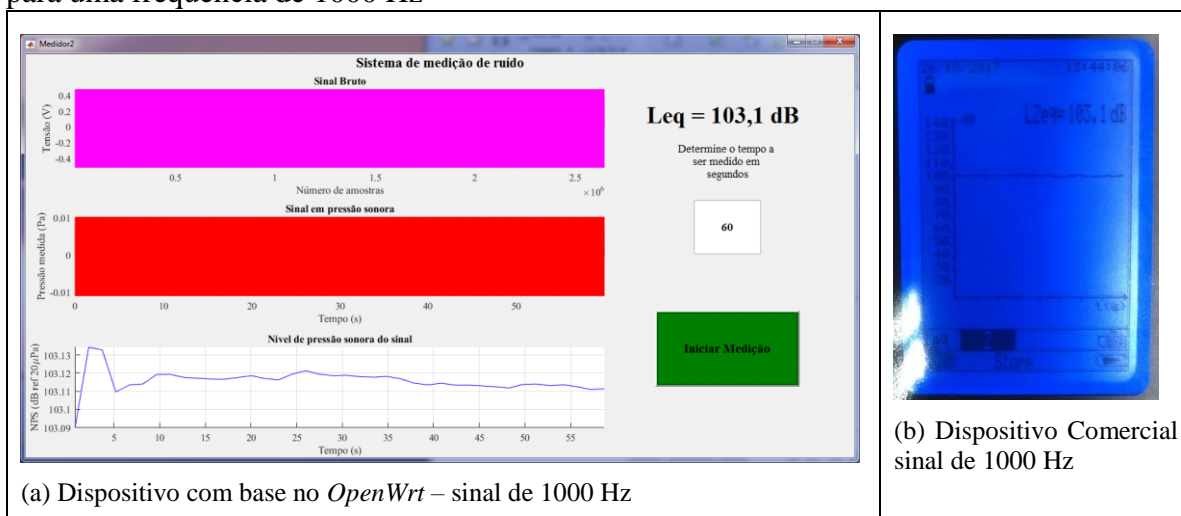
Figura 32 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em *OpenWrt* para uma frequência de 500 Hz



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 33 são mostrados os resultados obtidos para a medição de sinal de tom puro de 1000 Hz, a Figura 33a apresenta os gráficos obtidos utilizando o dispositivo e a Figura 33b apresenta a tela do medidor comercial com os valores medidos.

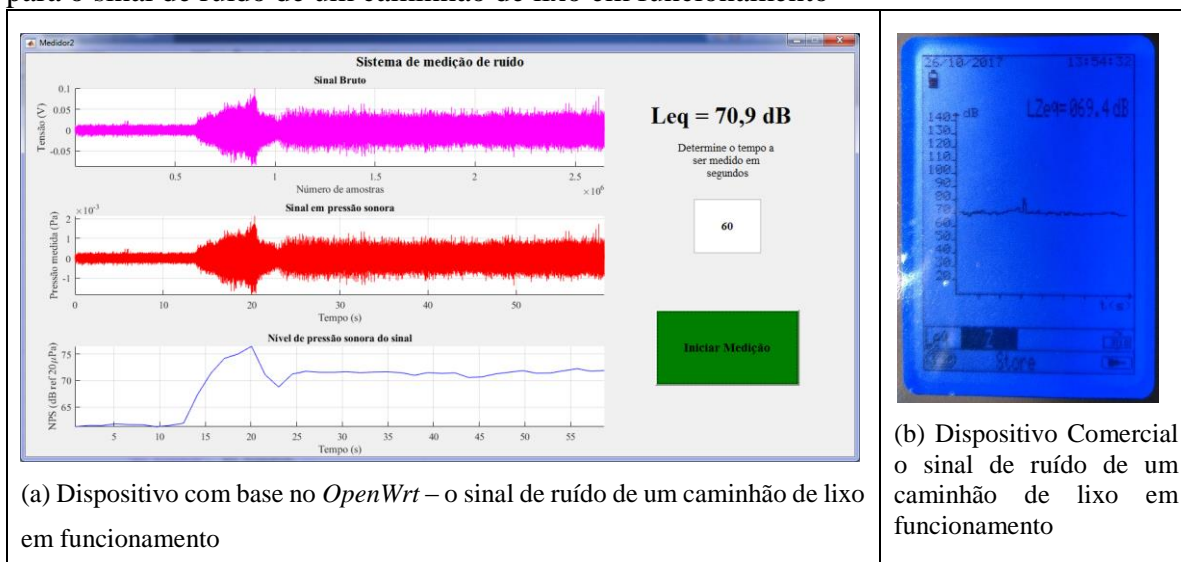
Figura 33 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em *OpenWrt* para uma frequência de 1000 Hz



Fonte: Dados do próprio autor

E finalmente, na Figura 34 são apresentados os resultados obtidos para a medição do sinal de ruído gerado por um caminhão de lixo em funcionamento. Na Figura 34a são mostrados os gráficos obtidos com o dispositivo de medição proposto e na Figura 34b é apresentada a tela do medidor comercial com valor medido.

Figura 34 - Comparação do sistema comercial e do dispositivo baseado em *OpenWrt* para o sinal de ruído de um caminhão de lixo em funcionamento



Fonte: Dados do próprio autor

A Tabela 3 contém os valores obtidos utilizando o dispositivo desenvolvido com base no *OpenWrt* e o sistema comercial *Solo Black*, bem como a diferença entre eles.

Tabela 3 - Medidas obtidas nos testes com o dispositivo desenvolvido com o *OpenWrt* e o sistema comercial *Solo Black*

Sinal	<i>OpenWrt</i>	<i>Solo Black</i>	Diferença
100 Hz	97,6 dB	98,3 dB	0,72 %
500 Hz	102,6 dB	104 dB	1,36 %
1000Hz	103,1 dB	103,1 dB	0%
Caminhão	70,9 dB	69,4 dB	2,11 %

Fonte: Dados do próprio autor

A análise e comparação dos resultados obtidos utilizando o dispositivo *OpenWrt* com os valores medidos com o sistema comercial *Solo Black* mostra que o dispositivo proposto se mostra bastante razoável com pequenas diferenças. Nas medições dos sinais de tom puro, os erros, tomando os valores medidos com o sistema comercial como valores de referência, são praticamente desprezíveis considerando a capacidade de percepção do ouvido humano (1 dB). Para o sinal de ruído gerado por um caminhão de lixo em funcionamento a diferença é da ordem de 2 %.

5.4 DISCUSSÃO E COMPARAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

Os testes mostraram que a partir da determinação das respectivas constantes de calibração dos dois dispositivos é possível utiliza-los para medição de nível de pressão sonora.

Um aspecto importante a se destacar em relação a resolução dos dispositivos desenvolvidos é a questão das faixas de frequências de cada um. O microfone do dispositivo desenvolvido com base no *Arduino* trabalha em uma faixa de frequência de 100 Hz ~ 10 kHz e a taxa máxima obtida com o dispositivo foi de 10 kHz, por tanto a faixa de frequência fica limitada ao *Arduino*. Já no dispositivo desenvolvido com o *OpenWrt* o seu microfone trabalha em uma faixa de frequência de 100 Hz ~ 12 kHz e a taxa máxima obtida com o dispositivo foi de 44,1 kHz, portanto, a faixa de trabalho neste caso fica limitada ao microfone e é ligeiramente maior, 100 Hz ~ 12 kHz. Componentes com frequência fora dessa faixa não são captadas nas medições mesmo o dispositivo tendo uma taxa de amostragem suficiente para medição de ruídos da ordem de 20 kHz.

Outro aspecto importante a ressaltar é operação remota do dispositivo de medição trabalhando com telemetria por meio do módulo *Wireless* para o dispositivo *Arduino* e o próprio roteador no caso do dispositivo com base no *OpenWrt*. Isso oferece uma maior flexibilidade, visto que o usuário poderia controlar a operação do sistema a distância ou

mesmo montar uma rede de monitoramento do ruído com dispositivos instalados em vários ambientes e controlados/monitorados a partir de um computador central.

Ainda é importante mencionar que o dispositivo é simples e de fácil operação. As medições podem ser armazenadas diretamente na memória do computador e posteriormente analisadas para uma avaliação acústica do local ou mesmo ser integradas diretamente em um Sistema de Gestão de Ruído Ocupacional.

Numa avaliação preliminar com base nos resultados obtidos é possível afirmar que o dispositivo com base no *OpenWrt* se mostrou mais eficiente. O custo de montagem dos dois sistemas foi bastante similar, no sistema com base no *Arduino* o custo foi da ordem R\$ 406,84 e no sistema com base no *OpenWrt* foi de R\$ 161,00.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi discutido o desenvolvimento e implementação de um sistema de medição de ruído utilizando componentes e dispositivos eletroeletrônicos de baixo custo. Duas propostas foram implementadas, uma com base na plataforma *Arduino* e outra com base no sistema *OpenWrt*. Adicionalmente, o trabalho inclui ainda uma proposta de operação remota do dispositivo de medição trabalhando com telemetria por meio do módulo *Wireless* para o dispositivo *Arduino* e um roteador para o dispositivo *OpenWrt*.

No desenvolvimento e implementação dos sistemas foram realizados vários testes com diferentes microfones o que possibilitou entender melhor o processamento e conversão dos sinais analógico-digital, assim como definir os diferentes componentes eletrônicos utilizados bem como a montagem do circuito eletrônico. Os circuitos de captação do ruído foram desenvolvidos com base em circuitos de captação de sinais já existentes, identificando o que melhor se adaptou a proposta. Para isso foi necessário entender o funcionamento do IDE e pacotes do *Arduino* assim como o conhecimento do sistema *OpenWrt* cuja eletrônica se mostrou mais acessível, bem como, uma melhor qualidade do sinal medido.

Comparando os dois dispositivos desenvolvidos observou-se um custo equivalente para a montagem dos dispositivos, sendo que o custo do sistema com base o *Arduino* é ligeiramente maior. O desempenho do sistema de medição com base no sistema *OpenWrt* se mostrou melhor além de não apresentar o mesmo problema de limite de frequência de amostragem observado no sistema *Arduino*.

O sistema de medição com base no sistema *OpenWrt* implementado se mostrou factível com a possibilidade de operação remota, que pode ser um diferencial em um sistema de medição e de gestão de ruído em ambientes de trabalhos. Entretanto, para um melhor o desempenho telemétrico é necessário antenas de roteamento, o que pode variar com a distância que o sistema é colocada da rede e da quantidade de obstáculos entre os *hosts*.

Finalmente, tem-se como propostas para trabalhos futuros a avaliação de outros tipos de microfones com faixas de frequências mais amplas, obtendo assim uma maior qualidade do sinal mesmo que a um maior custo e verificar os benefícios dessas alterações. Proceder uma avaliação mais detalhada da proposta de funcionamento remoto, por meio de diversas antenas de roteamento e implementar a análise do ruído por bandas

de frequência. E finalmente, discutir uma proposta integrada do sistema de medição de ruído em um Programa de Gestão de Ruído Ocupacional de um ambiente industrial.

REFERENCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10151:** acústica: avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade: procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12179:** tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.
- ARDUINO. **SPI library:** a brief introduction to the serial peripheral interface (SPI). [S. l.], 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>>. Acesso em: 05 jan. 2016.
- AYBEK, A.; KAMER, H. A.; ARSLAN, S. Personal noise exposures of operators of agricultural tractors. **Applied Ergonomics**, London. v. 41, p. 274–281, 2010.
- BANZI, M.; SHILOH, M. **Primeiros passos com o Arduino:** a plataforma de prototipagem eletrônica open source. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2015.
- BEAR, M. F.; CONNORS, B. W.; PARADISO, M. A. **Neurociências:** desvendando o sistema nervoso. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- BERANEK, L.L., VÉR, I.L. **Noise and vibration control engineering:** principles and applications. [S. l.]: Wiley-Interscience, 1992.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- BROESCH, J. D.; STRANNEBY, D.; WALKER, W. **Digital signal processing:** instant access. San Diego: Elsevier, 2008.
- CANDY, J. C.; TEMES, G. C. **Oversampling methods for A/D and D/A conversion.** Nova York: IEEE Press, 1992.
- CLIFFORD, M. **Microphones:** how they work and how to use them. Blue Ridge Summit: Tab Books, 1979.
- DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. **Princípios de engenharia ambiental.** São Paulo: 3. ed. AMGH, 2016.
- DE MARCO, C. S. **Elementos de acústica arquitetônica.** São Paulo: Nobel, 1982.
- DUNN, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos.** Bookman: Porto Alegre, 2013.
- EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em ação.** São Paulo: Novatec, 2013.
- EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. **Master handbook of acoustics.** 5. ed. [S. l.: s. n.], 2009.

- FALCONI, A. **Labirinto**. Juiz de Fora: Oriente Ocidente, 2011.
- FAHY, F. **Foundations of engineering acoustics**. Elsevier, 2005.
- FERNÁNDEZ, M. D.; QUINTANA, S.; CHAVARRÍA, N.; BALLESTEROS, J. A. Noise exposure of workers of the construction sector. **Applied Acoustics**, v. 70, p. 753-760, 2009.
- FUSINATO, V. A. Minicurso de acústica e ruído. In: SEMANA DA FÍSICA, 15., 2005, Maringá. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2005. p. 1-20.
- GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controles**. Florianópolis: NR Editora, 2000.
- HAYKIN, S; VEEN, B. V. **Sinais e sistemas**. Bookman: Porto Alegre: AMGH, 2001.
- HOLANDA, A. B. **Dicionário Aurélio da língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2010.
- JOURDAIN, R. **Música, cérebro e êxtase: como a música captura nossa imaginação**. Rio de Janeiro: Objetiva, 1998.
- KANNAN, R.; RASOOL, R. U.; JIN, H.; BALASUNDARAM, S. R. **Managing and Processing Big Data in Cloud Computing**. New York: Information Science Reference, 2016.
- KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of acoustics**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- KHOSRAVI, H.; ANDERSON, T. A. **Requirements for Separation of IP Control and Forwarding**. Hillsboro: The Internet Society: Informational, 2003.
- KOZIEROK, C. M. Overview of key routing protocol concepts: architectures, protocol types, algorithms and metrics. **The TCP/IP Guide**, [S. l.], v. 3. p. 1-3, 2005.
- LANMAN, D. R. **Design of a sound level meter**. New York: EN253, 2005. Disponível em: <<http://alumni.media.mit.edu/~dlanman/>>. Acesso em: 26 nov. 2016.
- LATHI, B. P.; DING, Z. **Sistemas de comunicações analógicos e digitais modernos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- MACHADO, P. A. L. **Direito ambiental brasileiro**. 11. ed. São Paulo: Malheiros, 2001.
- MATTOS, A. N. **Telemetria e conceitos relacionados: uma visão geral dos sistemas de telemetria com ênfase em aplicações aeroespaciais**. São José dos Campos, 2004.

MCROBERTS, M. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec, 2011.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA SOCIAL. **NR 15: atividades e operações insalubres**. Brasília, DF, 1978. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-15-atividades-e-operacoes-insalubres>>. Disponível em: 8 abr. 2015.

MONK, S. **Programação com Arduino II: passos avançados com sketches**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NOISETUBE. **Turn your mobile phone into an environmental sensor and participate in the monitoring of noise pollution**. [S. l.], 2015. Disponível em: <<http://www.noisetube.net/index.html#&panell1-1>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

NEPOMUCENO, L. A. **Elementos de acústica física e psicoacústica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

NEPOMUCENO, L. X. **Acústica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 169 p.

NOWEIR, M.H., ZYTOON, M.A. Occupational exposure to noise and hearing thresholds among civilian aircraft maintenance workers. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Amsterdam, v. 43, p. 495-502, 2013.

OPENWRT. **Wireless freedom**. [S. l.], 2017. Disponível em: <<https://openwrt.org/>>. Acesso em: 07 jan. 2017.

OPPENHEIM, A.V.; WILLISKY, A. S. **Sinais e sistemas**. São Paulo: 2. ed. Pearson, 2010.

OPPENHEIMER, P. **Top-down network design**. Indianapolis: Cisco Press, 2004.

PETERS, R. J.; SMITH, B. J.; HOLLINS, M. **Acoustics and noise control**. 3. ed. Nova York: Routledge, 2011.

ROBERTS, M. J. **Fundamentos em sinais e sistemas**. Bookman: Porto Alegre: AMGH, 2010.

RUI, L. R. **A física na audição humana: textos de apoio ao professor de física**. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

SMARTINTEC. **Como funciona o sistema de telemetria de dados**. [S. l.], 2014. Disponível em: <<http://www.smartintec.com.br/como-funciona-sistema-de-telemetria-de-dados/>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SOUZA, D. F. M. **Mapeamento acústico do ruído de tráfego rodoviário do bairro Imbuí, Salvador-BA**. Salvador: UFB- Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2012.

SOUZA, L. C. L.; ALMEIDA, M. G.; BRAGANÇA, L. **Bê-á-bá da acústica arquitetônica**. Bauru: Edufscar, 2006.

STEVENS, S. S.; WARSHOFSKY, F. **Biblioteca científica life: som e audição**. Rio de Janeiro: Livraria José Olympio Editora, 1969.

TAN, L. **Digital signal processing: fundamentals and applications**. [S. l.]: Elsevier, 2008.

TOOLEY, M. **Circuitos eletrônicos: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

VAHID, F. **Sistemas digitais: projeto, otimização e HDLs**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

YARLAGADDA, R. K. R. **Analog and digital signals and systems**. [S. l.]: Springer, 2010.

XIE, F; WU, M; ZHANG, Z. R; GE, Z. H. Implementation of Smarth Home Terminal Besed on OpenWrt. **Applied Mechanics and Materials**, [S. l.], v. 519-520, p. 516-519, 2014.