

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Matheus Zardo von Mecheln

**Automação do Processo de Determinação da
Força do Arco de Protetores Auriculares**

Florianópolis
2018

Matheus Zardo von Mecheln

**Automação do Processo de Determinação da Força
do Arco de Protetores Auriculares**

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a aprovação na disciplina **DAS 5511: Projeto de Fim de Curso** do curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Rodolfo C. C. Flesch

Florianópolis
2018

Matheus Zardo von Mecheln

Automação do Processo de Determinação da Força do Arco de Protetores Auriculares

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511: Projeto de Fim de Curso e aprovada na sua forma final pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação.

Florianópolis, 14 de Dezembro de 2018

Banca Examinadora:

Rafael Nagi Cruz Gerges, M.Eng.
Orientador na Empresa
NR Consultoria e Treinamento Ltda. (LAEPI)

Prof. Rodolfo C. C. Flesch, Dr.
Orientador no Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luís Fernando Arcaro
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Fernanda Kasper Ortolan
Debatedor
Universidade Federal de Santa Catarina

Victor Skaetta Barankievic
Debatedor
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

A força do arco é uma característica dos protetores auriculares do tipo concha que influencia tanto a atenuação de ruído do equipamento quanto o conforto do usuário. A medição da força do arco é um processo obrigatório, conforme a norma NBR 16076, para certificação dos protetores auriculares no Brasil. O problema levantado é a realização manual deste processo. Dessa forma, o tempo do colaborador é mal alocado em um procedimento longo e repetitivo, além de existir uma possível influência no resultado final do ensaio. O projeto desenvolvido na empresa LAEPI, localizada em Florianópolis – SC, visa automatizar o processo descrito. Foram feitos aprimoramentos no sistema físico de medição, previamente utilizado em medições manuais, para comportar o sistema de reposicionamento automático. Foi desenvolvida uma interface física para comportar o sistema de medição com base na plataforma de prototipagem Arduino. Os dados são adquiridos pela interface de forma automática, que envia as medições para o computador por comunicação serial. Foi desenvolvido um software em LabVIEW para processar os dados obtidos e recebidos por USB, e exportar os resultados de forma padronizada conforme a necessidade da empresa. Foram realizados ensaios com o equipamento desenvolvido, a fim de comparar desempenho com o sistema antigo e a qualidade das medições. Com os resultados, observou-se uma boa repetibilidade das leituras de dados, além de uma considerável queda no tempo do operador dedicado ao processo. Ao fim, pôde-se concluir que o projeto atingiu o objetivo estipulado de automatizar o processo de determinação da força do arco em protetores auditivos.

Palavras-chave: Protetores Auriculares. Força do Arco. Automação. NBR16076

ABSTRACT

Headband force is a feature of earmuffs that influence both noise attenuation and user comfort. The measurement of the headband force is an obligatory process, according to the NBR 16076 norm, for the certification of earmuffs in Brazil. The appointed problem is the manual realization of the process. In this way, the time of the collaborator is badly allocated in a long and repetitive procedure, and besides there is a possible influence on the final result of the test. The project developed at LAEPI, located in Florianópolis - SC, aims to automate the described process. Improvements were made to the physical measurement system previously used in manual measurements to accommodate the automatic repositioning system. A physical interface was developed to support the measurement system, based on the Arduino prototyping platform. The data is automatically acquired by the interface, which sends the measurements to the computer via serial communication. A software was developed in LabVIEW to process the data received via USB and export the results in a standardized file according to the company needs. Tests were done with the developed equipment, in order to compare the performance with the old system and the quality of the measurements. With the results, a good repeatability was observed for the measurements, besides a considerable decrease in the time of the operator dedicated to the process. Finally, we could conclude that the project has achieved the stated goal of automating the process of measuring the headband force in earmuffs.

Keywords: Earmuffs. Headband Force. Automation. NBR16076

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno (do inglês *Acrylonitrile Butadiene Styrene*)

CA – Certificado de Aprovação

CAD – Desenho Assistido por computador (do inglês *Computer Aided Design*)

Cgcre - Coordenação Geral de Acreditação

dB – Decibel

DEFA – Determinação da Força do Arco

EPI – Equipamento de Proteção Individual

I²C – *Circuito Inter-Integrado* (do inglês *Inter-integrated circuit*)

ICA – Comissão Internacional de Acústica (do inglês *International Commission for Acoustic*)

IDE – Ferramenta de Desenvolvimento Integrado (do inglês *Integrated Development Environment*)

INCE – Instituto de Engenharia de Controle de Ruído (do inglês *Institute of Noise Control Engineering*)

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia

LAEPI – Laboratório do EPI

LCD – Tela de Cristal Líquido (do inglês *Liquid Crystal Display*)

LVA – Laboratório de Acústica e Vibrações

MTE – Ministério do Trabalho

NR – Norma Regulamentadora

NRR – Nível de Redução de Ruído (do inglês *Noise Reduction Ratio*)

NRRsf – Nível de Redução de Ruído Colocação pelo Usuário (do inglês *Noise Reduction Ratio Subject Fit*)

RBC – Rede Brasileira de Calibração

SNR – Número Único de Avaliação (do inglês *Single Number Rating*)

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VI – Instrumento Virtual (do inglês *Virtual Instrument*)

SUMÁRIO

Lista de Abreviaturas e Siglas	7
Sumário	8
1 Introdução.....	10
1.1 A Empresa.....	12
1.2 O Problema	13
1.3 Objetivo Geral.....	16
1.4 Objetivos Específicos	16
1.5 Metodologia	16
1.6 Contexto no Curso.....	17
1.7 Plano de Apresentação	18
2 Fundamentação Teórica	20
2.1 Normas aplicadas.....	20
2.2 A Exposição e a Atenuação do Ruído com Protetores do tipo Concha	24
2.3 O Conforto de Protetores Auriculares do tipo Concha.....	28
2.4 O Processo de Determinação da Força do Arco	30
3 Projeto	34
3.1 Especificações Segundo Norma.....	35
3.2 Requisitos de sistema do Laboratório	35
3.3 Transdutores, Atuadores e Softwares de Desenvolvimento	36
3.3.1 Célula de Carga	37
3.3.2 Transdutor de Temperatura e Umidade	39
3.3.3 Servomotor.....	40
3.3.4 Mostrador LCD	42
3.3.5 Placa de Desenvolvimento Arduino.....	44
3.3.6 Softwares de Desenvolvimento	46
3.4 Prototipagem do Sistema	47
3.5 Considerações do Projeto	48
4 Atividades Desenvolvidas	49
4.1 Sistema Físico.....	52
4.2 Interface Física e Sistema de Medição.....	57
4.3 Software Desenvolvido	60
4.4 Considerações do Desenvolvimento	67
5 Testes e Resultados	68

6 Considerações Finais e Perpectivas	73
Referências	75
Apêndice A - Modelos 3D do Sistema Físico	78
Apêndice B – Diagrama de Blocos do Software DEFA	81
Apêndice C – Arquivo Gerado pelo Programa DEFA.....	86
Apêndice D – Diagrama de Circuito	87

1 INTRODUÇÃO

Protetores auriculares são equipamentos importantes na constante busca de soluções para a redução de ruído do ambiente de trabalho. Esse Equipamento de Proteção Individual (EPI) é tido como a última alternativa de atenuação entre a fonte do ruído e o receptor [1]. Em [1], o autor descreve que há três modos de atenuar ruído: no emissor, no caminho de transmissão entre o receptor e o emissor e diretamente no receptor. A preferência de intervenção é na ordem descrita. Apesar de não ser o método mais efetivo, o uso de EPI para o controle de exposição é o método mais prático e mais difundido quando a solução na fonte é economicamente e/ou tecnicamente inviável [2] [3].

No mercado, encontram-se dois tipos de protetores auriculares, os do tipo concha e os do tipo plugue. Os de tipo plugue, também conhecidos como protetores auriculares de inserção, são protetores que são introduzidos no canal auditivo, como pode ser observado na Figura 1. Nessa figura encontram-se dois tipos de protetores plugues diferentes: os moldáveis, que são feitos de espuma e moldam-se ao canal auditivo do usuário, e os pré-moldados, que são de silicone e vedam o canal auditivo com suas flanges. Os protetores auriculares do tipo concha, ou circum auriculares, sobrepõem toda a aurícula do usuário, como ilustra a Figura 2. Nesta figura pode-se observar dois tipos de protetores circum auriculares: os do tipo concha, que são abafadores interligados por um arco tensor, e os do tipo concha acoplado ao capacete de segurança, que tem o mesmo efeito que os do tipo concha, porém com outra proteção física (o capacete) necessária à alguns ambientes de trabalho. Para ambos, a atenuação é baseada em vedar o canal auditivo, impedir a transmissão do ruído através do material do protetor e impedir a vibração do protetor com o ruído [4]. Cabe aqui destacar que este trabalho foi realizado com protetores auriculares do tipo concha.



Figura 1: Protetores do tipo plugue: Moldável (esquerda) e Pré-moldado (direita). Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 2: Protetores do tipo Concha: Concha (esquerda) e Concha Acoplado a capacete de segurança (direita). Fonte: Arquivo pessoal.

Protetores auriculares do tipo concha possuem um arco flexível que exerce uma força de compressão na cabeça do usuário. A força do arco é normalmente relacionada com a atenuação de ruído do protetor auricular, como pode ser visto nos estudos de [2] e [5], por exemplo. Os autores afirmam que conforme aumenta a força de arco, a capacidade de atenuação também aumenta, como consequência natural do aumento de vedação entre protetor auricular e a lateral da cabeça (região circum aural).

Caso a exposição ao ruído não seja controlada de forma correta, o risco de perda auditiva em longo prazo é iminente. O ruído é um dos agentes agressores mais comuns no ambiente de trabalho e é importante que o uso do EPI seja feito de forma correta e contínua durante toda a jornada de trabalho [6]. O aumento da força de arco também está fortemente relacionado com o conforto do EPI. Segundo

pesquisas, quanto maior a compressão exercida pela força de arco, maior o desconforto o usuário sente, que implica na aceitação do protetor auricular no ambiente de trabalho e no uso correto e contínuo [7].

Portanto, para balancear entre conforto e atenuação, é preciso quantificar a força do arco. A norma brasileira prevê essa medição e também determina o método para o ensaio mecânico do protetor auricular [8].

Normalmente essa medição é feita de forma manual e é um processo repetitivo e demorado. O objetivo deste projeto é automatizar esse sistema de medição com base nas especificações da norma e da empresa, visando melhorar a alocação de tempo de colaboradores nessa tarefa e aumentar qualidade das medições.

1.1 A Empresa

O trabalho foi realizado na empresa NR Consultoria e Treinamento, fundada em 1998 pelo Professor Ph.D. Samir N.Y. Gerges, para desenvolver soluções na área de vibrações e acústica no âmbito comercial, industrial e residencial. Em 2008 foi criado o Laboratório do Equipamento de Proteção Individual (LAEPI), o laboratório que realiza os ensaios acústicos e mecânicos dos EPIs de empresas e fabricantes do ramo. A empresa está localizada em Florianópolis, Santa Catarina. Pode-se observar o logotipo da empresa na Figura 3.



Figura 3: Logotipo do LAEPI - Laboratório do EPI, em Florianópolis - SC.

Fonte: LAEPI¹.

¹ Disponível em: www.laepi.com.br. Acessado em: 23/08/18.

Hoje em dia o LAEPI é o único laboratório do Brasil acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre) do Instituto Nacional de Metrologia (Inmetro) credenciado pelo Ministério do Trabalho (MTE) para realizar ensaios de atenuação de ruído em protetores auriculares, além de oferecer outros serviços na área de acústica e vibrações. Dentre seus principais clientes, merecem destaque Dell, Tivit, Petrobras e Unilever.

O projeto aqui descrito foi alinhado com o setor de ensaio de protetores auriculares da empresa. Os fabricantes de protetores auriculares buscam o ensaio, para a obtenção do Certificado de Aprovação (CA), obrigatório na comercialização dos EPIs no Brasil. Outras empresas costumam fazer o ensaio por dois motivos: para determinar a vida útil de protetores auriculares ou para determinar o nível de atenuação caso o uso do protetor auricular seja conjugado com outro EPI, como por exemplo nos protetores auriculares utilizados em conjunto com capacete de segurança ou óculos de proteção. Determinar a vida útil dos protetores auriculares do tipo concha é importante para estabelecer um período de troca adequado nas empresas, economizando recursos e privando a empresa de ações judiciais. No caso do ensaio do protetor auricular conjugado com outro EPI, pode haver alteração da eficiência do protetor auricular, por exemplo, com o uso de óculos de proteção e protetor auricular simultaneamente, e é relevante determinar o grau de atenuação total para proteger de forma correta os trabalhadores.

Em todos os ensaios de protetores auriculares do tipo concha ou concha acoplado ao capacete de segurança realizados no LAEPI, é determinada a força de arco, como regulamenta a norma atual.

1.2 O Problema

A atual norma brasileira vigente, a NBR 16076 [8], determina que seja obrigatória a medição da força de arco em ensaios de protetores auriculares do tipo concha. O equipamento manual utilizado pelo LAEPI foi feito com base na norma brasileira NBR 16076 [8] e nas normas americanas ANSI S12.6-2016 [9] e ANSI S3.19-1974 [10], obedecendo aos critérios físicos da estrutura para medições. Na Figura 4 há uma foto do equipamento do laboratório, que foi desenvolvido pelo Prof. Gerges na década de 1990.

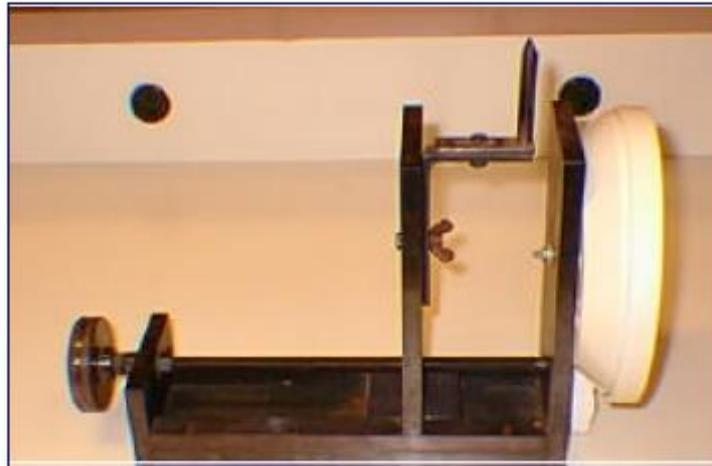


Figura 4: Equipamento manual para medição da força do arco. Fonte: Brandolt (2001).

O equipamento manual é composto por uma estrutura em aço, com superfícies planas para o contato do protetor auricular. Para a obtenção dos dados medidos, há uma balança em uma das superfícies e essa balança é calibrada periodicamente em laboratório da Rede Brasileira de Calibração (RBC). Os dados são lidos pelo operador responsável pelo ensaio e inseridos em uma planilha no computador de forma manual conforme o andamento da medição (ver mais do processo na seção 2.4).

Um ensaio demanda em média duas horas de trabalho. São cinco amostras de protetores auriculares analisadas por ensaio, medidos doze vezes durante dois minutos cada. Ainda podem ser incluídos os fatores humanos de distração, erro e necessidades fisiológicas, o que aumenta ainda mais o tempo do processo. Posto assim, os principais problemas do processo manual são:

- tempo do funcionário mal alocado;
- erros de medição;
- dificuldade de acesso aos dados.

Existem outros equipamentos que determinam a força do arco, alguns totalmente mecânicos, como ilustrado na norma Americana ANSI S3.19-1974 [10] (Figura 5), outros com leitura digital e interface com o computador, como o medidor de força do arco da *Michael & Associates Inc.* [11] (Figura 6). Não encontramos na literatura equipamentos que realizassem todo o processo de forma automatizada.

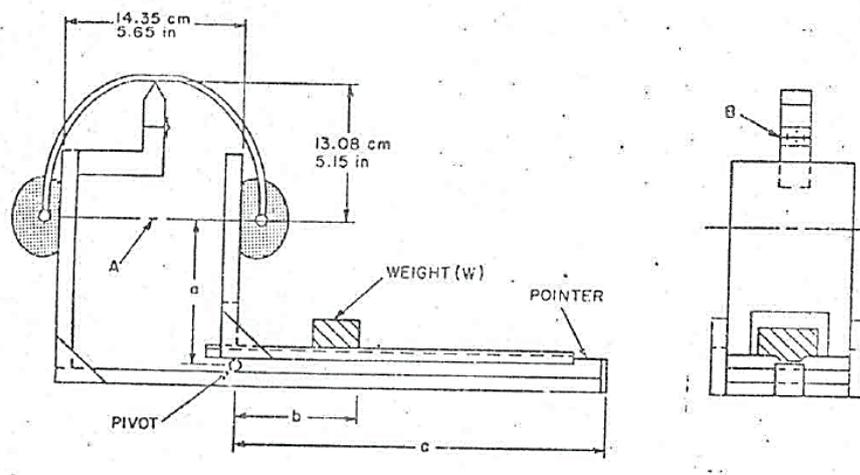


Figura 5: Equipamento de Medição Mecânico. Fonte: ANSI (1974).



Figura 6: Equipamento de Medição Digital. Fonte: Michael & Associates Inc. (2015) [11].

1.3 Objetivo Geral

O sistema manual do LAEPI foi desenvolvido há mais de 15 anos, e continua sendo utilizado na empresa. Por ser um sistema manual, apresenta alguns pontos negativos, como apontado na seção 1.2.

O objetivo geral do projeto aqui descrito é automatizar o processo de determinação da força do arco em ensaios de protetores auriculares. A solução projetada conta com uma parte física e uma parte de software, com uma interface para interação entre humano e máquina.

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto compreendem:

- estudar as pesquisas científicas no contexto de atenuação de ruído e conforto de protetores auditivos;
- atualizar e documentar desenhos do sistema físico do medidor da força do arco;
- instrumentar sistema físico com sensores e atuadores adequados;
- obter e processar dados do sistema físico no computador;
- desenvolver interface física para acompanhar leitura;
- desenvolver interface digital para controle do processo;
- armazenar dados processados de maneira padronizada.

1.5 Metodologia

Para atingir o objetivo de automatizar o processo de determinação da força do arco em protetores auriculares, primeiramente foram levantados os problemas que o processo manual apresentava. Foi feito um estudo do processo e uma revisão da literatura da área para criar familiaridade e entender a importância no contexto do mercado e da saúde.

As especificações para realização do projeto foram levantadas, tanto as especificações estabelecidas pela norma brasileira, NBR 16076 [8], quanto as especificações determinadas pelo LAEPI.

Posteriormente, foi buscada uma solução para o problema apresentado, projetando o mecanismo do sistema físico e selecionando os transdutores que atendessem aos critérios de medições.

Em seguida, a prototipagem foi desenvolvida com base na solução idealizada. Apenas no momento em que o protótipo já estava bem definido e com as funções bem determinadas, foi desenvolvido o sistema aqui apresentado.

Com o sistema em funcionamento, foram feitos diversos testes e revisões para o reparo de defeitos e introdução de melhorias do sistema.

Cabe aqui ressaltar que durante todo o projeto foram estipulados objetivos curtos e diretos, para estimular um crescimento constante do desenvolvimento. Esses objetivos foram definidos conjuntamente pelo autor e pelo supervisor do LAEPI. Foram realizados testes ao longo em cada etapa, para garantir a operação correta antes de implementar a próxima funcionalidade. Para cada etapa, houve o acompanhamento e aprovação do supervisor da equipe.

1.6 Contexto no Curso

Para o desenvolvimento e implementação do projeto de fim de curso, foram necessários diversos conhecimentos e conceitos estudados no curso de Engenharia de Controle e Automação – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Inserido em duas grandes áreas do curso, Informática Industrial e Automação da Manufatura, a solução teve envolvimento com instrumentação, programação de software e sistemas embarcados.

No contexto do curso, podem-se destacar algumas disciplinas que tiveram maior relevância em relação ao projeto desenvolvido:

- Circuitos Elétricos e Eletrônicos (EEL5106);
- Redes de Computadores para Automação (DAS5314);
- Instrumentação em Controle (DAS5151);
- Projeto Integrador (DAS5104);

- Metodologia para Desenvolvimento de Sistemas (DAS5312);
- Arquitetura e Programação de Sistemas Microcontrolados (DAS5332);
- Desenho Técnico (EGR5606).

Além das disciplinas ofertadas pelo curso, outras experiências extracurriculares adquiridas ao longo da graduação também contribuíram para a elaboração e a concretização do projeto.

1.7 Plano de Apresentação

Este documento apresenta um projeto de solução do problema de automação do processo de determinação da força do arco. Para melhor organização da leitura, o texto foi dividido em seis capítulos, contendo os assuntos de acústica e vibrações necessários à justificativa do problema, a elaboração do projeto, o desenvolvimento e as ferramentas utilizadas, além de um fechamento com os resultados obtidos e as considerações finais do autor.

No primeiro capítulo é apresentado o problema que se pretende resolver e seu contexto científico e mercadológico. Também é apresentada a empresa na qual o projeto foi desenvolvido, assim como um pouco de sua história e relevância na área que atua. Nesse capítulo os objetivos são expostos e é delineado o método utilizado em todas as etapas desenvolvidas do projeto.

No capítulo seguinte são descritos alguns conceitos relevantes para o entendimento do problema abordado na área de acústica e vibrações. No capítulo dois é explicado o que é atenuação de ruído de protetores auriculares e o que influencia na questão trabalhista, pesquisas sobre conforto em protetores auriculares do tipo concha, o procedimento padrão da medição de força do arco e todas as normas utilizadas no desenvolvimento e suas ligações.

O projeto é descrito no capítulo três. As especificações da norma e as especificações da empresa, o estudo dos sensores e atuadores compatíveis com a ideia e a parte de prototipação são descritos nesse capítulo. É exposto novamente o problema do processo, a solução idealizada e os resultados esperados.

No capítulo quatro são mostradas as atividades realizadas no desenvolvimento do projeto. Ele é dividido em três seções para melhor organização:

sistema físico, interface física, software desenvolvido. O capítulo mostra uma visão geral do funcionamento do sistema de medição, a modelagem das peças e a estrutura implementada, o mecanismo de reposicionamento, a medição dos sensores, a comunicação entre interface e computador e a lógica do processamento de dados.

O capítulo cinco é reservado para os ensaios realizados, contemplando uma análise dos dados obtidos durante os testes e uma discussão sobre a eficiência da solução.

O fechamento e as considerações finais por parte do autor são expostos no capítulo final. É discutido se os objetivos impostos foram atingidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é dedicado a contextualizar o leitor com os conceitos básicos necessários para o entendimento do problema e da solução apresentados posteriormente. Como o projeto restringe-se a protetores auriculares do tipo concha, os conceitos abordados também foram limitados a este tipo. Dessa forma, o texto permanece focado no problema central, apesar de que, muitas vezes, os conceitos possam ser análogos e existir a possibilidade de traçar-se um paralelo entre os protetores auriculares do tipo concha e plugue.

Em suma, este capítulo discute as normas em que o procedimento de determinação da força do arco adotado e o projeto são baseados. Aborda-se o funcionamento da atenuação do ruído em protetores auriculares e a sua importância na saúde. Discute-se, com base em pesquisas científicas, sobre o conforto de protetores auriculares e a relevância do conforto para a atenuação. Por último, é descrito o processo de determinação da força do arco propriamente dito e a ligação desta medida com a atenuação de ruído e com o conforto do usuário.

2.1 Normas aplicadas

As Normas Regulamentadoras (NR) são expedidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) com o objetivo de garantir a segurança e saúde de trabalhadores brasileiros em empresas públicas ou privadas. A NR-6 é a norma que descreve o que pode ser considerado ou não um EPI [12]. Segundo o MTE, EPI é: “[...] todo dispositivo ou produto, de uso individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção de riscos suscetíveis de ameaçar a segurança e a saúde no trabalho” [12, p. 1]. No Anexo I da NR-6 há uma lista com todos os EPIs considerados pelo governo federal e no item C, que pode ser visto na Figura 7, são apresentados os EPIs para proteção auditiva.

C - EPI PARA PROTEÇÃO AUDITIVA	
C.1 - Protetor auditivo	
a)	protetor auditivo circum-auricular para proteção do sistema auditivo contra níveis de pressão sonora superiores ao estabelecido na NR-15, Anexos n.º 1 e 2;
b)	protetor auditivo de inserção para proteção do sistema auditivo contra níveis de pressão sonora superiores ao estabelecido na NR-15, Anexos n.º 1 e 2;
c)	protetor auditivo semi-auricular para proteção do sistema auditivo contra níveis de pressão sonora superiores ao estabelecido na NR-15, Anexos n.º 1 e 2.

Figura 7: EPI para proteção auditiva segundo a NR-6, Anexo I, Item C.

Fonte: MTE (2017) [12].

Para a regulamentação dos ensaios de equipamentos de proteção individuais listados na NR-6, foi decretada a Portaria 452 [13] MTE. Esse documento expõe os requisitos para aprovação de um EPI para comercialização, como os certificados que devem ser apresentados, as marcações do produto, e o procedimento dos ensaios adequados para cada tipo de EPI. No anexo II item C do documento, é descrito que os protetores auditivos devem passar por ensaios conforme a norma ANSI S12.6-2016 [9], pelo Método B (Método do Ouvido Real – Colocação pelo ouvinte), conforme Figura 8.

C - PROTEÇÃO AUDITIVA			
C.1. PROTETOR AUDITIVO	C.1.1. Circum-auricular; de inserção e semi-auricular para proteção contra níveis de pressão sonora superiores aos valores limites de exposição diária	ANSI.S.12.6/2008	Método B - Método do Ouvido Real - Colocação pelo Ouvinte.

Figura 8: Método de Ensaio para protetores auditivos segundo a Portaria 452. Fonte: MTE (2017) [13].

O procedimento para ensaios de protetores auditivos reconhecido pelo MTE é especificado na norma ANSI S12.6 [9]. Existe no Brasil a tradução literal desta norma, a NBR 16076 [8]. Primeiramente, a norma determina que a sala de testes deva ter o tempo de reverberação 1,6 s para cada sinal do ensaio e a uniformidade de pressão sonora para diversos pontos da sala limitados a uma diferença de 5 dB.

Os ruídos emitidos na sala reverberante durante o ensaio são divididos em 1/3 de bandas de oitava e devem ser pulsantes. Cada banda de oitava deve ter limites de pressão sonora, como mostrado na Figura 9, medida do ponto de referência da câmara.

Frequência	NPS em banda de oitava (valor de referência 20 μ Pa)
Hz	dB
31,5	57,0
63	43,0
125	29,0
250	21,0
500	16,0
1 000	13,0
2 000	14,0
4 000	11,0
8 000	14,0

Figura 9: Nível máximo de pressão sonora máxima para bandas de oitava no ponto de referência da sala. Fonte: ABNT (2016) [8].

O procedimento padrão para o ensaio com ouvido real colocado pelo ouvinte descrito na norma começa com a seleção do ouvinte, para garantir que ouvinte não tenha extrapolado o número máximo de ensaios, ou mesmo que esse tenha a sensibilidade mínima e máxima do limiar de audição dentro dos limites estabelecidos pela norma. Para cada protetor do tipo concha deve-se ensaiar com ao menos dez pessoas, já para os de tipo plugue deve-se ensaiar com pelo menos vinte ouvintes [8].

Com o ouvinte selecionado, é entregue o protetor e as instruções fora da câmara de testes. Segundo o método utilizado, o ouvinte deve ler e interpretar as instruções e em seguida posicionar o protetor no ouvido da forma que compreendeu a partir da leitura feita.

A seguir, o ouvinte retira o protetor e entra na sala. Aguarda 2 minutos em silêncio antes de o teste iniciar. Pode-se começar com limiar aberto (sem protetor) ou com limiar fechado (com protetor), sendo que há uma proporção de 50% para

cada modo de início. O procedimento conta com duas séries com duas medições cada, totalizando quatro medições por ensaio, como mostra a Figura 10.

Série	Metade dos ouvintes	Outra metade dos ouvintes
Série 1	Fechado, aberto	Aberto, fechado
Série 2	Fechado, aberto	Aberto, fechado

Figura 10: Séries de medições e proporção dos limiares. Fonte: ABNT (2016) [8].

É dada continuidade ao ensaio, sendo obtidos os valores dos limiares aberto e fechado de cada ouvinte para cada protetor. Posteriormente esses valores são utilizados no cálculo do NRRsf (NRR por colocação subjetiva, do inglês NRR *subject fit*), que é revisado brevemente na seção 2.2.

O procedimento de medição da força do arco é especificado na NBR 16076, capítulo 10. A seção 2.4 é específica para tratar deste processo (ver capítulo 2.4). Cabe aqui ressaltar que tanto os ensaios de atenuação de ruído quanto de determinação da força do arco não são do tipo passa ou não passa, mas geram, ao invés disso, os valores que o fabricante deve especificar na comercialização do protetor auricular.

Além das normas que o Ministério do Trabalho e Emprego estabelece, foram empregadas outras normas internacionais no desenvolvimento do projeto, para fins de referência. Como por exemplo a norma europeia EN 352-1 [14], que apresenta os ensaios (atenuação de ruído e mecânicos) que devem ser realizados na Europa e os valores apropriados para o EPI. Segundo a EN 352-1, a força de arco não deve ultrapassar 14 N de força, nem ser menor que 10 N. A norma EN 13819-1 [15] especifica os procedimentos de ensaio referentes à norma EN 352-1 [14]. O capítulo 4.4 desta norma descreve o procedimento de medição da força do arco e pode-se reparar que o procedimento é praticamente idêntico ao apresentado na norma brasileira. A norma americana ANSI S3.19-1974 [10] apresenta padrões para a construção da estrutura física do sistema de ensaio.

O projeto do aparato experimental para determinação da força do arco está atrelado aos requisitos que a norma impõe. Desta forma, é possível embasar o

sistema aqui desenvolvido para realizar medições de acordo com os requisitos técnicos exigidos pelo MTE.

2.2 A Exposição e a Atenuação do Ruído com Protetores do tipo Concha

É comum encontrar ambientes de trabalho com exposição a ruído em taxas significativas. Por volta de 16% das pessoas com perda auditiva no mundo tem a deficiência por origem ocupacional [16]. A exposição ao ruído em excesso pode causar pressão alta, estresse, dificuldades para dormir e perda auditiva irreversível. A Figura 11 mostra uma tabela da NR-15 que delimita a tolerância diária para exposição ao ruído. Acima destes limites o trabalho é considerado insalubre [17].

NÍVEL DE RUÍDO DB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Figura 11: Limite diário tolerância para ruído contínuo ou intermitente. Fonte: MTE (2015).

Para reduzir os níveis de exposição a ruído para dentro dos limites estipulados pelo Ministério do Trabalho e Emprego, pode-se atuar no emissor do ruído, no meio e no receptor (no trabalhador) [1]. O primeiro e mais recomendado é a redução de ruído no emissor, ou seja, na máquina ou processo que é a fonte do ruído (controle de ruído). Esta intervenção pode não ser a mais economicamente e/ou tecnicamente viável, mas é a mais efetiva, pois reduz a emissão de ruído no ambiente de trabalho. O segundo modo é a atenuação do ruído no meio (trajetória), ou seja, entre o emissor e o receptor, utilizando anteparos acusticamente isolados. E o último, mas o mais recorrente, é o uso de protetores auriculares individuais pelos trabalhadores.

Por ser uma intervenção de baixo custo e fácil implementação para a empresa, mas com eficácia na redução de danos no colaborador, o uso de protetores auriculares em ambientes de trabalho ruidosos é muito comum. É interessante entender como o protetor auricular funciona para interpretar melhor os efeitos na proteção que ele oferece.

Como pode ser observado na Figura 12, o protetor auricular do tipo concha é um equipamento que, quando posicionado corretamente, recobre toda a aurícula do usuário. Sua estrutura física é constituída de uma concha plástica que envolve um material de baixa densidade, geralmente espuma, com almofadas na área de contato com a cabeça, para conforto do usuário e vedação do ruído.

A redução da transmissão de ruído através do protetor auricular pode ser considerada por quatro vias [4]:

1. Vazamento de Ar – O protetor auricular deve cobrir toda a orelha, para uma vedação entre o protetor auricular e a lateral da cabeça. A força do arco pressiona as almofadas do protetor auricular contra a cabeça, melhorando a vedação. Má vedação pode prejudicar a atenuação em até 15 dB [4].
2. Vibração do Protetor Auricular – A concha pode vibrar com o ruído, comportando-se como um sistema massa mola. Esse efeito prejudica a atenuação de ruído de baixas frequências. Em protetores auriculares do tipo concha, o limite de atenuação é de 25 dB em 125 Hz.

3. Transmissão através do Material – O ruído pode ser transmitido através do material. Nos protetores auriculares do tipo concha, esse modo transmissão deve ser considerado, devido ao fato da concha ter uma grande área de superfície. Essa transmissão pode ser evitada com o uso de mais material ou de material mais denso.
4. Transmissão através do crânio – O protetor auricular é projetado para atenuar ruídos sonoros. Ruídos que são propagados por vibração do crânio têm grande efeito na propagação do ruído e são difíceis de serem atenuados.

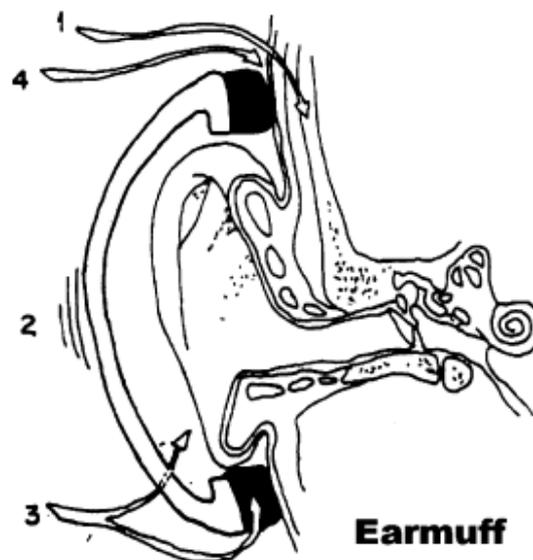


Figura 12: As quatro vias de transmissão de ruído através do protetor auricular. Fonte: BERGER (1980).

Segundo Brandolt (2001) [18], a norma atual determina que o ensaio de protetores auriculares deve ser baseado no SNR (Número Único de Avaliação, do inglês *Single Number Rating*), ou seja, o ensaio deve gerar um único valor calculado. O NRRsf é o resultado obtido do ensaio e tem a função de quantificar a redução de

ruído que o protetor auricular pode oferecer². Quanto maior este valor, maior a intensidade do ruído que o protetor auricular é capaz de atenuar.

Traçando um paralelo com o presente projeto, quanto maior a força de arco do protetor auricular, maior vai ser a pressão das almofadas na lateral da cabeça, desta forma, maior a vedação e maior o NRRsf (*Figura 13*). Neste ponto o cálculo da força de arco do protetor auricular é importante para diagnosticar, por exemplo, a causa de baixo NRRsf em protetores auriculares de alta qualidade.

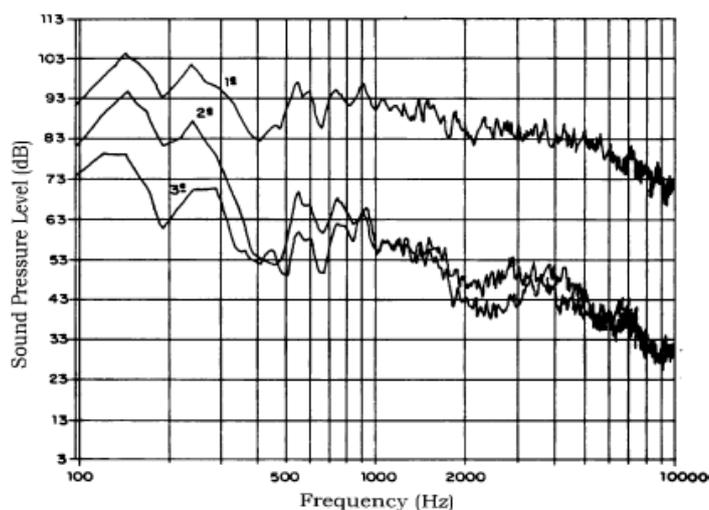


Figura 13 Atenuação do ruído conforme força do arco. Fonte: ZANNIN (2006).

No entanto, o aumento da força de arco, além de influenciar no aumento do NRRsf, proporciona um aumento no desconforto pelo uso do protetor auricular. O conforto é um fator essencial no uso correto e contínuo do EPI, conforme é descrito na seção 2.3.

² O NRRsf não tem um viés “passa ou não passa” para o MTE, tendo apenas carácter informativo para a comercialização do produto.

2.3 O Conforto de Protetores Auriculares do tipo Concha

Como apontado anteriormente, a exposição ao ruído em níveis elevados pode causar uma série de enfermidades, como estresse, pressão alta, problemas do sono e, em casos graves, perda auditiva permanente [16].

Para avaliar a capacidade de atenuação de um protetor auricular, foi estabelecida a medida de Nível de Redução de Ruído (NRR). O NRR é um valor calculado a partir de ensaios de protetores auriculares em laboratório, como determina a norma brasileira vigente NBR 16076 [8]. Em suma, quanto maior o valor do NRR de um determinado protetor auricular, maior a sua capacidade de atenuação de ruído.

Berger (1980) [4] mostra em seu estudo que o uso incorreto ou irregular de protetores auriculares prejudica o nível de atenuação que o EPI pode oferecer. Considerando um protetor auricular de NRR igual a 25, caso um trabalhador com carga horária de 8 horas diárias deixe de utilizá-lo durante 15 minutos, o NRR será reduzido para 20. Pode-se concluir, portanto, que o protetor auricular deve ser confortável o suficiente para que o trabalhador mantenha-o em uso durante todo o período que estiver exposto em sua jornada de trabalho.

Os principais fatores dos protetores auriculares que causam desconforto são a pressão na cabeça, o peso do equipamento e dificuldades na comunicação [1] e [6]. Além disso, a literatura demonstra que o treinamento dos usuários e o tempo de uso dos protetores auriculares também influenciam nessa percepção [1] e [6].

A força de arco está fortemente atrelada ao desconforto por pressão na lateral da cabeça (região circum aural). É possível observar este fato na Figura 14. Além disso, pode-se notar que forças de arco com valores inferiores a aproximadamente 10 N não causam tanto desconforto. Williams (2012) [5] também chega próximo a esse valor para força de arco, 11 N. Desta forma, Tomamos o valor de 10 N como uma referência para os futuros testes realizados neste projeto.

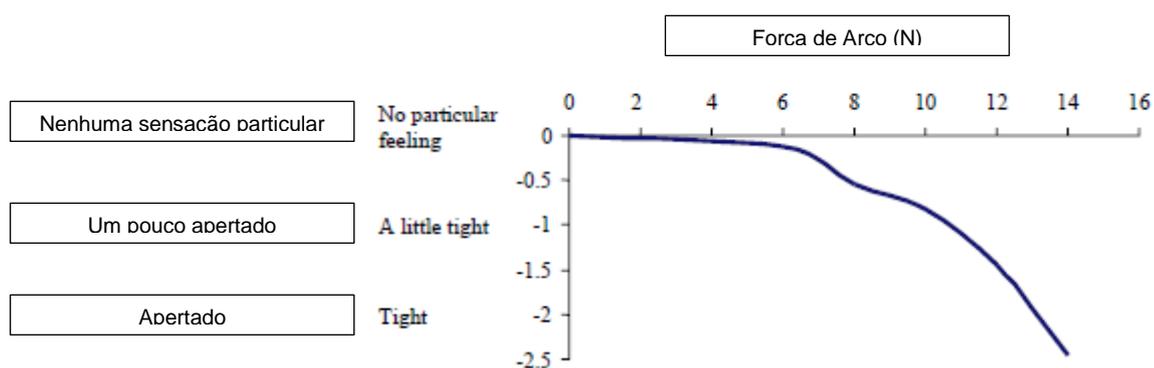
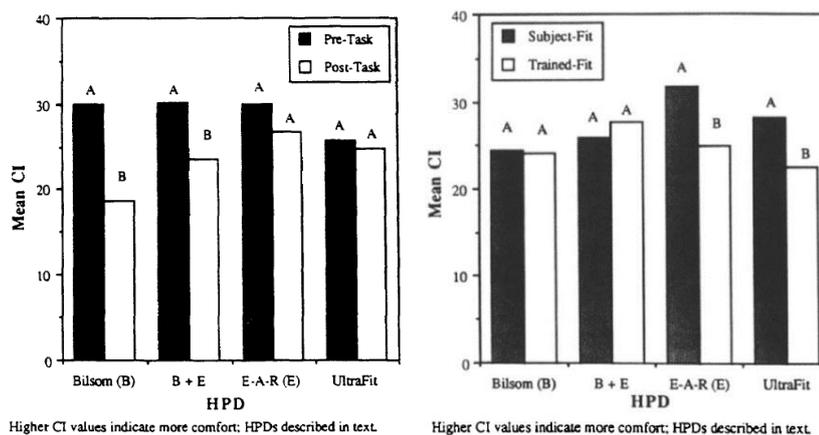


Figura 14: Relação de força do arco com sensação de desconforto. Fonte: Hsu (2003) [1].

Em relação ao peso do protetor auricular, por volta de 70% da massa total está localizada nas conchas. Um valor aproximado de 250 g por equipamento pode ser considerado uma referência de massa total [1]. Para a dificuldade em comunicação, existem no mercado protetores auriculares eletrônicos com rádio acoplados.

O uso prolongado do protetor auricular tende a tornar-se mais desconfortável, segundo estudos feitos de até 2 horas de uso [19]. O treinamento para o uso correto do protetor auricular também apresenta mudanças na percepção de conforto do usuário. Em especial para protetores auriculares do tipo plugue, o usuário aprende a inseri-lo corretamente (mais profundo no canal auditivo), o que resulta em um sentimento maior de desconforto. Para protetores auriculares do tipo concha, o treinamento não altera significativamente o conforto, mas pode aumentar a eficiência do EPI, pois o usuário aprende a posicioná-lo de forma a evitar vazamentos entre o protetor auricular e a lateral da cabeça. Além das questões de conforto, o treinamento auxilia o entendimento da importância do uso correto e contínuo do protetor auricular para a prevenção da saúde do trabalhador [6] e [19].

A Figura 15 ilustra uma avaliação de conforto de protetores auriculares pelo tempo de uso e pelo treinamento. É possível observar que o conforto é avaliado de forma mais negativa conforme o tempo de uso contínuo aumenta. Outro fato observado na imagem é que a maior parte dos protetores auriculares tem a sensação de conforto diminuída depois do treinamento.



Higher CI values indicate more comfort: HPDs described in text.

Higher CI values indicate more comfort: HPDs described in text.

Figura 15: Gráfico de avaliação de conforto pelo tempo de uso (esquerda) e pelo treinamento (direita). B é protetor do tipo concha, E é protetor plugue moldável, UltraFit é o protetor plugue pré-moldado e B+E é concha e plugue moldável ao mesmo tempo. Maiores valores de CI equivale maior o conforto. Fonte: Park e Casali (1991).

O conforto do protetor auricular está associado à aceitabilidade do trabalhador para usá-lo [7]. O desafio é garantir que o colaborador use corretamente o EPI durante toda sua jornada de trabalho. Por isso, o protetor auricular não deve ser escolhido somente pela atenuação de ruído, mas também pelo conforto que oferece ao usuário.

Como a força de arco está associada ao principal fator de desconforto descrito nas pesquisas citadas anteriormente, a determinação dessa grandeza pode auxiliar o fabricante a desenvolver produtos de maior qualidade e conforto.

2.4 O Processo de Determinação da Força do Arco

A força do arco está diretamente associada à atenuação de ruído e ao conforto de usuário. Para a atenuação de ruído, quanto maior for a força de arco, maior será a vedação do protetor auricular, portanto, maior será a atenuação que ele oferece. Em vista do conforto, quanto maior a força de arco, maior a pressão na lateral da cabeça, sendo assim, maior o desconforto do usuário. É possível perceber a relação de equilíbrio a que a força de arco está submetida, ponderando entre atenuação de ruído e conforto.

Atualmente a norma brasileira NBR16076 exige a medição da força do arco e os dados calculados devem ser reportados com caráter informativo. Além disso, a norma descreve que a determinação da força do arco deve ser feita antes do ensaio de atenuação de ruído. As medições devem ser realizadas em newtons e devem ter duração de (120 ± 5) segundos cada. É necessário coletar os valores de temperatura e umidade relativa do ar de cada medição. O procedimento realizado no LAEPI conta com cinco amostras de protetores auriculares por ensaio, medidos doze vezes cada.

Sobre a estrutura física, a norma descreve que é possível que o laboratório projete o seu próprio equipamento. Há algumas especificações que devem ser atendidas para tal: o equipamento deve possuir duas placas rígidas, planas e paralelas para ser acomodado o protetor auricular, a distância horizontal entre essas duas placas deve ser de (145 ± 1) mm e a distância vertical entre o topo do protetor auricular e a linha média das conchas deve ser de (130 ± 1) mm.

O LAEPI desenvolveu na década de 1990 um sistema físico para medição da força do arco com base na norma brasileira. Este equipamento pode ser visto na Figura 16. Em suma é um equipamento que contém uma célula de carga em uma das placas planas, onde são obtidos os dados de massa e esses valores são transformados em força. O dispositivo possui também regulagem de distância entre as placas e regulagem de altura vertical. Para a medição de temperatura e umidade relativa do ar, o laboratório usa um termo higrômetro à parte do dispositivo. Todos os transdutores do processo são calibrados bianualmente em laboratório da Rede Brasileira de Calibração (RBC).

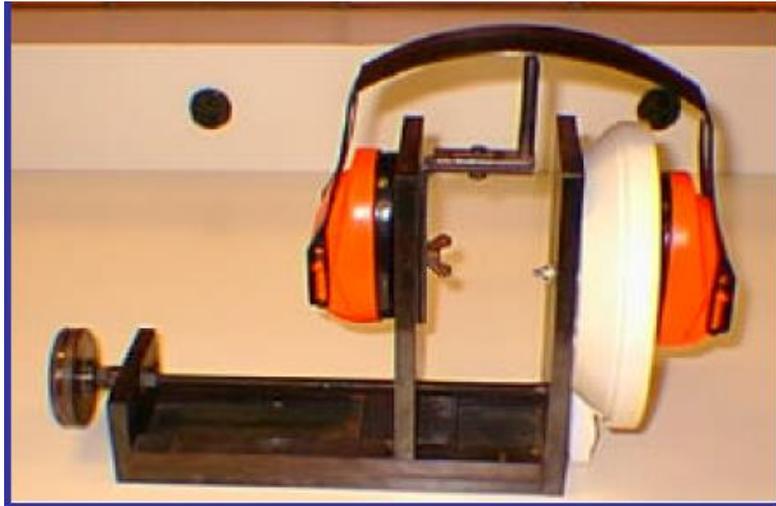


Figura 16: Medidor da força do arco LAEPI. Fonte: Brandolt (2001).

O processo de determinação da força do arco que é realizada no LAEPI pode ser descrito em seis passos:

1. o operador seleciona qual amostra do protetor auricular vai ser medido.
2. o operador posiciona corretamente a amostra no equipamento de medição.
3. aguarda-se 120 segundos e faz-se a leitura manual da força. Caso seja a primeira medição do protetor auricular, faz a leitura da temperatura e umidade relativa do ar.
4. é feito o registro dos dados obtidos em uma planilha Excel no computador, de forma manual. Sendo 12 medições por amostra, volta para o passo 2 para o reposicionamento do EPI. Caso já tenham sido realizadas todas as medições, segue-se para o passo seguinte.
5. Sendo 5 amostras por ensaio, volta-se para o passo 1 para a troca da amostra. Caso já tenham sido realizados os ensaios com as 5 amostras, prossegue-se para o passo seguinte.
6. Com os dados do ensaio obtidos e registrados no Excel, e posteriormente ao ensaio de atenuação de ruído, é gerado o relatório para o cliente.

O fluxograma da Figura 17 a seguir ilustra este processo.

Determinação da Força de Arco Manual

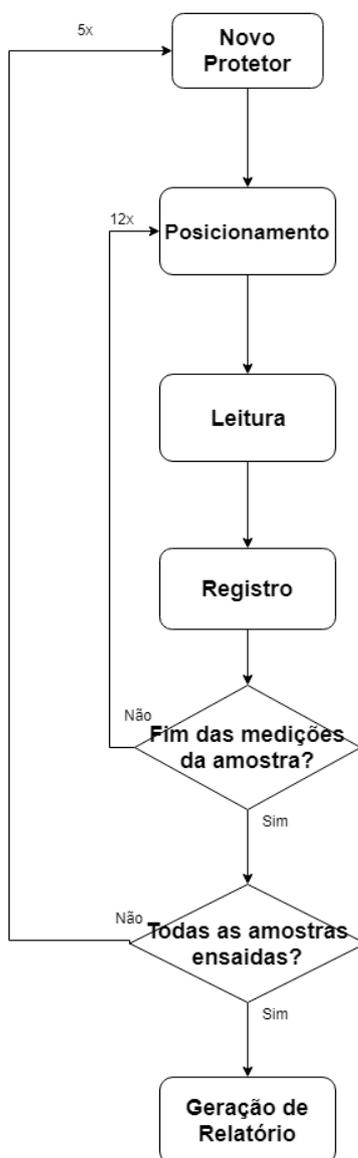


Figura 17: Processo de medição da força do arco no LAEPI, modo manual.

Fonte: Arquivo Pessoal.

É possível observar que o operador do ensaio está envolvido em todos os passos do processo. Além de demandar bastante tempo de mão de obra, o processo é bastante repetitivo. O procedimento também está sujeito a erros humanos, como registrar valores errados ou reposicionar a amostra de maneira incorreta.

3 PROJETO

A medição da força do arco deve seguir um procedimento determinado em norma. O processo atual de medição empregado na empresa tem pontos fracos associados ao procedimento manual, como foi discutido na seção 2.4. Desde baixa repetibilidade das medições, tempo do operador mal alocado e erros associados a transcrições de leitura, os problemas encontrados são todos referentes aos procedimentos suscetíveis a erros que são realizados pelo operador.

A automação do processo de determinação da força de arco tem o intuito de privar o operador de lidar com os procedimentos que não necessitam de decisões essenciais para o ensaio. Deve-se levar em conta nesta etapa limitações físicas e econômicas para a solução.

Observando a Figura 17 e o processo descrito na seção 2.4, os procedimentos que precisam de intervenção do operador são somente o primeiro e o último passo:

- “Nova Amostra” – Seleção da amostra e o primeiro posicionamento da mesma no sistema;
- “Geração de Relatório” – Onde são observados os dados obtidos para validação e, com os resultados do ensaio de atenuação de ruído, é gerado um relatório para o cliente.

Para o desenvolvimento do projeto, primeiramente é necessário obter os requisitos do sistema. Desta forma, pode-se dimensionar e enquadrar o projeto com as condições impostas pela norma e as necessidades requeridas pelo laboratório.

Além disso, foram levantados os componentes utilizados na implementação da solução. Cada componente foi brevemente discutido na seção 3.3.

A seção 3.4 é reservada para a prototipagem do sistema desenvolvido, descrevendo as etapas de testes dos componentes e a modelagem em 3D das novas peças.

3.1 Especificações Segundo Norma

A norma vigente no Brasil, a NBR 16076 [8], determina aspectos físicos e do procedimento de medição que o sistema desenvolvido deve atender. Essas questões foram debatidas com mais profundidade nas seções 2.1 e 2.4. Em suma, a norma determina que o sistema de medição de força do arco deve dispor de:

- placas planas para apoiar as conchas do protetor auricular;
- (145 ± 1) mm de distância horizontal, entre as placas planas;
- (130 ± 1) mm de distância vertical, entre o topo do protetor até a linha média das conchas;
- medição de força em newtons (N);
- medição da temperatura em grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$);
- medição da umidade relativa do ar (%UR);
- ciclo de medição de (120 ± 5) s.

3.2 Requisitos de sistema do Laboratório

Além dos requisitos que são necessários para o equipamento estar enquadrado dentro da norma vigente, foram levantadas as especificações que o laboratório considerou relevantes para o sistema. Essas características são referentes ao fluxo do processo e a como beneficiar o usuário na interação com o equipamento.

As especificações são:

- sistema de reposicionamento automático da amostra do protetor auricular;
- a superfície plana que faz a medição possa ser desacoplada da base (tornando-se uma célula de carga na horizontal) para que seja possível a calibração com massa padrão;
- possibilidade de medição em protetores auriculares do tipo concha acoplado (protetor auricular do tipo concha com capacete de proteção);

- interface física com mostrador digital para apresentar as leituras feitas enquanto elas são realizadas;
- botões na interface física que possibilitem fazer a tara e mudar o modo de exibição do mostrador de newtons para gramas;
- processamento no computador dos dados obtidos;
- comunicação do sistema de aquisição com computador via USB;
- interface virtual para controle de processo;
- registro de dados em arquivos padronizados.

Ainda nesta etapa, o LAEPI apresentou as faixas de medição que um processo de determinação da força do arco pode estar submetido. Estes dados foram acumulados de experiências prévias do próprio laboratório. São elas:

- Temperatura: (0 a 50) °C;
- Umidade relativa do ar: (0 a 100) %;
- Força: (0 a 5) N ou, aproximadamente, (0 a 0,5) kg.

Com as especificações e as faixas de medição determinadas, pode-se dimensionar o sistema de aquisição para o dispositivo e também definir os sensores e atuadores compatíveis com a solução desenvolvida. O levantamento dos componentes é descrito no próximo na seção 3.3.

3.3 Transdutores, Atuadores e Softwares de Desenvolvimento

Visando facilitar e organizar a leitura da descrição dos componentes definidos nesta etapa do projeto, esta seção foi dividida em seis subseções. Cada subseção tem o foco em um dos componentes que permitiram atingir as especificações determinadas anteriormente.

3.3.1 Célula de Carga

Para a medição da força do arco propriamente dita, é utilizado uma célula de carga com limite de medição de 5 kg. A célula de carga é uma peça de alumínio que possui um conjunto de extensômetros acoplados à estrutura, que convertem deformação mecânica em variação de resistência elétrica [20]. Na Figura 18 há uma foto do componente adquirido.

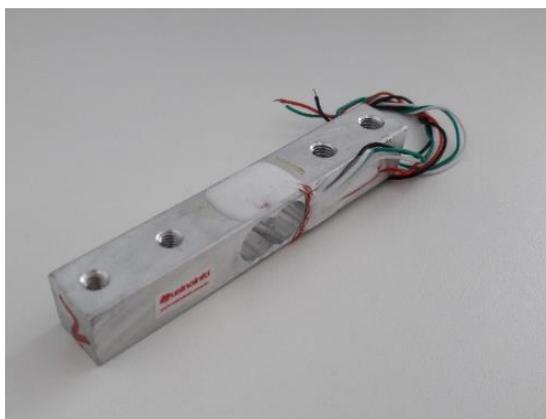


Figura 18: Célula de carga usada no projeto. Fonte: Acervo Pessoal.

Mais especificamente, o extensômetro aplicado no sistema é do tipo resistivo. Conforme a deformação ocorre em virtude de uma força, o extensômetro varia a resistência elétrica proporcionalmente. Na literatura é comum o uso da ponte *Wheatstone* para descobrir o valor de resistências elétricas desconhecidas. O circuito é formado por quatro resistências e uma tensão de alimentação, como sugere a Figura 19 [20].

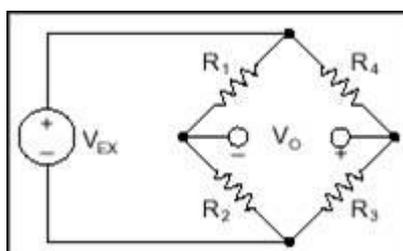


Figura 19: Ponte Wheatstone. Fonte: National Instruments³

³ Disponível em: <http://www.ni.com/tutorial/7138/pt/>. Acessado em: 04/09/2018.

Em geral, as células de carga já contêm os extensômetros ligados em um circuito ponte de *Wheatstone*, que é o caso do componente adquirido neste projeto. As especificações da célula de carga utilizada são:

- Carga Nominal: (0 a 5) kg;
- Sensibilidade: $(1.00 \pm 0.15) \frac{\text{mV}}{\text{V}}$;
- Tensão de alimentação: (3 a 12) V.

A carga nominal da célula de carga é de, aproximadamente, 50 N, portanto, atende à especificação de 5 N de operação. Outro ponto forte deste sensor foi a geometria da peça de alumínio, que estava mais próxima do esperado. A tensão de operação do dispositivo é de 5 V, sendo assim, a tensão nominal de saída é de 5 mV.

Pode-se notar pela sensibilidade do transdutor que a tensão de saída é muito baixa para a aplicação na plataforma de prototipagem. Portanto, é necessário amplificar este sinal para níveis compatíveis com a solução. Para isto foi utilizado o circuito HX711 [21].

O HX711 possui um conversor analógico para digital de 24 bits e é específico para aplicações de medições de força. Este circuito tem um fator de ganho de baixo ruído ajustável de 32, 64 e 128, com faixa dinâmica de ± 80 mV, ± 40 mV e ± 20 mV respectivamente. Para nossa aplicação, o ganho máximo de 128 é possível de ser utilizado, pois a tensão nominal da célula de carga é de 5 mV.

Foi adquirido um módulo baseado no HX711, como ilustrado na Figura 20. A vantagem deste circuito é a praticidade da implementação. Além de todas as funcionalidades descritas acima, este módulo ainda pode alimentar eletricamente a célula de carga em operação.

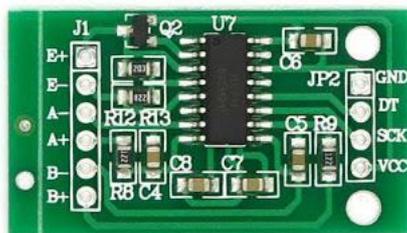


Figura 20: Módulo baseado no HX711. Fonte: Robson Eletrônico⁴

3.3.2 Transdutor de Temperatura e Umidade

Conforme visto nas seções 3.1 e 3.2, existe a necessidade de medir a temperatura e a umidade relativa do ar. As faixas dinâmicas para estas grandezas são de 0 °C a 50 °C e 0% a 100%, respectivamente. Para atender a estes requisitos foi empregado um sensor capaz de medir temperatura e umidade em um único componente.

Identificado como DHT22 ou AM2302, o módulo de medição é do tipo capacitivo e conta com saída digital de 8 bits [22]. Na Figura 21 é apresentada uma imagem que ilustra o componente utilizado.

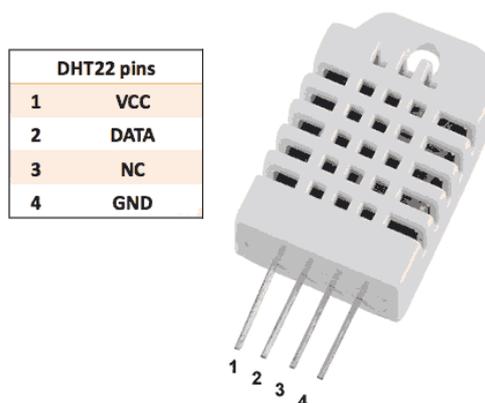


Figura 21: Sensor de temperatura e umidade DHT22. Fonte: Electro Schematics⁵

⁴ Disponível em: <https://robsoneletronico.blogspot.com/2017/08/hx711-conversor-analogico-digital-24.html>. Acessado em: 04/09/2018.

⁵ Disponível em: <https://www.electroschematics.com/11293/am2302-dht22-datasheet/>. Acessado em: 05/09/2018.

Este sensor é tido como de tamanho reduzido e de baixo consumo de energia, que são pontos positivos para aplicação no projeto. Suas especificações técnicas são descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de especificações do transdutor de temperatura e umidade

	Temperatura	Umidade
Tensão de Alimentação	3,3 V a 6 V (CC)	-
Faixa de Operação	-40 °C a +80 °C	0% a 100%
Erro de medição máximo	< $\pm 0,5$ °C	$\pm 2\%$
Sensibilidade	0,1 °C	0,1%
Repetibilidade	$\pm 0,2$ °C	$\pm 1\%$

Como é possível observar, o componente atende com folga os requisitos do sistema de determinação da força do arco. Além disso, o intervalo de medição é de dois segundos, ou seja, a saída é atualizada em um período curto de tempo quando comparado aos comportamentos dinâmicos esperados para a temperatura e umidade ambiente.

3.3.3 Servomotor

Para o mecanismo de reposicionamento automático do protetor auricular, foi necessário o uso de um motor elétrico capaz de suportar a força de arco a que o sistema vai estar submetido. A faixa dinâmica da força já foi estabelecida anteriormente, de 0 N a 5 N. Vale ressaltar, que o motor é o único atuador utilizado na solução desenvolvida.

O motor escolhido para a aplicação é do tipo servomotor. Este componente é caracterizado por conter internamente um circuito de controle e um motor corrente contínua com redução. O braço do motor é posicionado proporcionalmente à tensão do sinal de entrada, ou seja, a posição angular do eixo do servomotor é definida por um sinal de tensão. Por exemplo, variando o sinal de entrada do motor entre a tensão mínima e a máxima do atuador, o motor posiciona o seu eixo do ângulo mínimo ao ângulo máximo respectivamente [23].

O circuito de controle típico de um servomotor pode ser visto na Figura 22. Observa-se pela imagem que o circuito contém um amplificador operacional como comparador do sinal de controle com a saída, dois transistores de potência e um potenciômetro na realimentação ligado ao motor corrente contínua, atuando como um sensor de posição do eixo do motor [23].

O funcionamento do circuito é dado pela comparação do sinal de controle com o sinal da realimentação da posição do eixo do motor. Caso o sinal da realimentação seja maior que o sinal de controle (ou seja, o eixo está além da posição desejada), Q1 é ativado, trazendo o braço para a posição certa. Caso o sinal de realimentação seja menor (ou seja, o braço está antes da posição desejada), Q2 é ativado, avançando o braço do motor. Caso os dois sinais sejam iguais, o braço do motor está na posição correta, permanecendo em repouso.

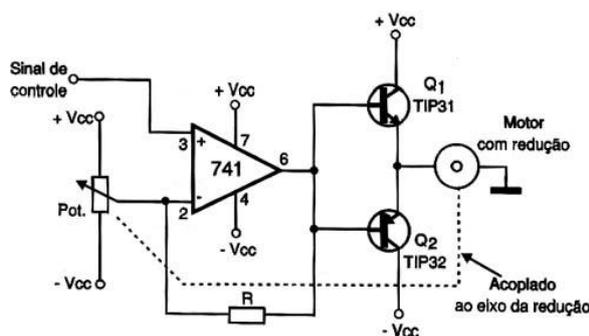


Figura 22: Circuito de controle de servomotores. Fonte: Braga (2012).

O ganho do comparador influencia no tempo de assentamento do sistema. Caso muito baixo, o motor vai demorar até chegar na posição correta. Caso o ganho seja elevado, o sistema pode passar da posição correta, causando oscilação no posicionamento do braço.

Foi adquirido o servomotor da marca Tower Pro, o MG 996R [24], como pode ser visto na Figura 23. Segundo o fabricante, é um motor de alto torque, apesar de trabalhar com baixa tensão. A tensão de operação pode variar de 4,8 V a 6,6 V, variando também a eficiência do motor, com consumo de corrente nominal de 2,5 A. O torque máximo em 4,8 V é de 9,4 kg.cm, ou 0,92 N.m, quando massa sujeita a gravidade. Já em 6 V, o torque máximo é de 11 kg/cm, ou 1,07 N.m, quando massa sujeita a gravidade. A velocidade de operação também aumenta conforme a tensão, entre 315,8 %/s (em 4,8 V) e 400 %/s (em 6 V).



Figura 23: Servomotor MG 996R. Fonte: Tower Pro⁶

3.3.4 Mostrador LCD

Um dos requisitos impostos pelo laboratório é o desenvolvimento de uma interface física com mostrador digital para o acompanhamento das leituras durante o processo. O mostrador escolhido é uma tela de cristal líquido (LCD, do inglês *Liquid Crystal Display*). Por não haver limitações de medidas tão amarradas para a interface, um mostrador de quatro linhas com vinte caracteres cada (LCD 20x4) foi utilizado para facilitar a disposição das informações no mostrador, considerando que três grandezas são medidas e apresentadas durante o processo. Vale ressaltar que uma tela monocromática é suficiente para a aplicação. A Figura 24 ilustra o componente adquirido.



Figura 24: Tela LCD 20x4. Fonte: Vida de Silício⁷

⁶ Disponível em: wiki.eprolabs.com/index.php?title=Servo_Motor_Metal_gear_MG996R. Acessado em: 05/09/2018.

Segundo as especificações do componente, a tensão de operação é de 5 V. O documento de especificações também contém as instruções e a ordem de acionamento dos pinos para a escrita dos caracteres corretamente [25].

O problema encontrado para a utilização da tela LCD escolhido foi a quantidade de pinos necessários para seu funcionamento. Para um sistema embarcado, a quantidade de pinos é um ponto a ser levado em consideração, pois em geral há uma quantidade limitada de saídas digitais. Para contornar esse problema, foi empregado o módulo LCD *Inter-integrated circuit* (I2C).

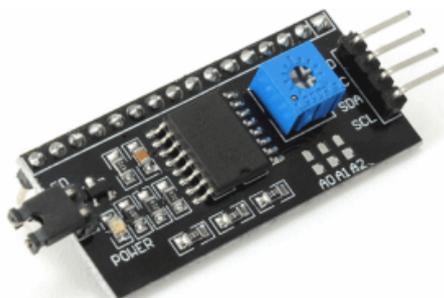


Figura 25: Módulo de adaptação LCD I2C. Fonte: Vida de Silício⁸

Baseado no protocolo de comunicação I2C, o módulo reduz o número de pinos necessários para conexão do LCD a dois de comunicação e outros dois de alimentação. A comunicação I2C foi criada em 1992 pela empresa Phillips, passando por diversas versões até os dias atuais. Com intuito melhorar a eficiência da comunicação entre dispositivos, o barramento foi projetado para ter apenas dois fios, um denominado *Serial Data Line* (SDA) e o outro de *Serial Clock Line* (SCL). Operando na topologia mestre-escravo, a comunicação pode ser estabelecida numa taxa de transmissão de 400 kbit/s até 3,4 Mbit/s. Cada dispositivo do barramento recebe, via software, um endereço único de 10 bits [26].

Com este conjunto de tela LCD e módulo de comunicação I2C pode-se atender ao requisito de monitoramento durante o processo na interface física. Além

⁷ Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/display-lcd-20x4-16x2-adaptador-i2c/>. Acessado em: 06/09/2018.

⁸ Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/display-lcd-20x4-16x2-adaptador-i2c/>. Acessado em: 06/09/2018.

disso, o módulo permite uma economia no número de portas utilizadas pelo microcontrolador sem prejudicar a utilização da tela LCD.

3.3.5 Placa de Desenvolvimento Arduino

Com objetivo de realizar as leituras dos transdutores descritos acima e servir de interface física para acompanhamento do operador durante o processo, foi utilizada uma placa de desenvolvimento Arduino. Este dispositivo é conhecido por sua facilidade de implementação e apresenta um custo financeiro baixo [27].

No mercado atual existem diversas plataformas de prototipagem disponíveis. Foi determinado o desenvolvimento no Arduino Duemilanove, pois é uma plataforma que encontrava-se disponível para desenvolvimento no LAEPI e apresenta especificações adequadas para o projeto. As especificações do componente podem ser vistas na Figura 26.

Microcontroller	ATmega168
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	16 KB (ATmega168) or 32 KB (ATmega328) of which 2 KB used by bootloader
SRAM	1 KB (ATmega168) or 2 KB (ATmega328)
EEPROM	512 bytes (ATmega168) or 1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

Figura 26: Arduino Duemilanove especificações. Fonte: Cytron⁹

⁹ Disponível em: <https://tutorial.cytron.io/2011/08/11/arduino-tutorial/>. Acessado em: 10/09/2018.

Observando a Figura 26 é possível avaliar que a placa de desenvolvimento pode ser utilizada no projeto. A quantidade de pinos tanto analógicos quanto digitais são suficientes para a implementação de todos os sensores e atuadores do sistema. A tensão e corrente de operação são compatíveis com os transdutores utilizados, logo o Arduino pode alimentar eletricamente de forma direta estes componentes. Além disso, o Arduino Duemilanove possui dois pinos de interrupção do sistema. A placa de desenvolvimento Arduino pode ser vista na Figura 27.



Figura 27: Arduino Duemilanove. Fonte: Sparkfun (2014).

Outra característica marcante do Arduino é seu software programável via serial USB. Através do Sistema de Desenvolvimento Integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) do Arduino pode-se desenvolver a rotina que o controlador vai executar durante a operação: verificação de estados de variáveis, leitura de sensores analógicos ou digitais e envio e recebimento de dados via serial são algumas das funcionalidades que podem ser implementadas através da programação do software. A linguagem de programação é uma forma adaptada de C++ para a plataforma.

O sistema de medição do projeto foi baseado nos sensores descritos acima e na plataforma de prototipagem Arduino, com os sensores coletando os dados e o Arduino os enviando para o computador por via serial. Para a interface de acompanhamento do operador, a tela LCD apresenta os dados que o Arduino coleta e formata. Botões foram implementados para intervenção do operador em momentos requisitados, como fazer tara e mudar a leitura de newtons para grama.

3.3.6 Softwares de Desenvolvimento

Além dos transdutores e atuadores adquiridos para a solução desenvolvida, há partes do projeto que foram elaborados em programas de computador. Para a montagem do sistema físico, houve a necessidade de criação de peças novas, para atender aos requisitos estipulados. Para o processamento de dados no computador e a interface virtual com o operador, foi preciso o desenvolvimento de um software específico para a aplicação.

A ferramenta escolhida para elaboração de peças e mecanismos foi o SolidWorks. Sendo uma ferramenta CAD 3D criada no ano de 1995 pela empresa francesa *Dassault Systèmes*, foi bem aceita pelo mercado pela facilidade de uso e por apresentar novas versões periodicamente.

O SolidWorks possibilita ao usuário criar, a partir de desenhos 2D, sólidos em 3D de geometrias complexas. Em suma, o SolidWorks é um software que possibilita os engenheiros o desenvolvimento de peças e protótipos de maneira ágil [28].

Para o desenvolvimento do software que processa os dados no computador, foi utilizada a ferramenta LabVIEW. Baseado em linguagem de programação gráfica, o LabVIEW é dedicado para fazer medições, para analisar os dados, e para disponibilizar os resultados para o usuário. Desenvolvido pela empresa *National Instruments*, possui conectividade com produtos de instrumentação da mesma, além de permitir integração entre diversos sistemas operacionais diferentes.

A plataforma é dividida em duas partes: o diagrama de blocos e painel frontal. A janela do diagrama de blocos é onde a rotina e o fluxo de dados são programados, já o painel frontal é onde o usuário pode interagir com o processo e analisar os resultados obtidos. As duas partes são conectadas entre si, por exemplo, se for disposto um botão no painel frontal, este será instanciado também no diagrama de blocos, para a programação de sua função. Cada rotina do programa é denominada de *Virtual Instrument (VI)*. O LabVIEW permite criar camadas de programação para as rotinas de forma hierarquizada, ou seja, permite criar uma rotina principal que pode chamar rotinas secundárias (subVIs) para execução [29].

Com essas duas ferramentas é possível, portanto, modelar peças novas para o sistema físico do projeto e desenvolver um programa de processamento dos

dados obtidos, com uma interface virtual de acompanhamento e interação do operador. Imagens da aplicação das ferramentas no projeto podem ser vistas no Apêndice A, para exemplos do SolidWorks, e Apêndice B, para exemplos do LabVIEW.

3.4 Prototipagem do Sistema

Com os componentes necessários para o desenvolvimento da solução já estudados e adquiridos, foram realizados testes dos transdutores e atuadores individualmente, para checagem de funcionamento, condicionamento dos sinais e integração com a placa de desenvolvimento Arduino.

Nesta etapa também foi testada a comunicação serial via USB entre o Arduino e o computador, com programas básicos da plataforma de desenvolvimento LabVIEW.

Havia a necessidade de alterações de partes do sistema físico para a solução desenvolvida atender as especificações requisitadas. Por exemplo, foram desenvolvidas as peças para o posicionamento correto da célula de carga e houve a elaboração do mecanismo que transforma o movimento angular do motor em movimento retilíneo para realizar o reposicionamento do protetor auricular (um mecanismo do tipo biela-manivela).

Para o armazenamento correto do sistema de medição e para adequar a interface física com o usuário, foi feito um modelo em 3D do painel com as medidas e os furos adequados, além de um design específico para a aplicação.

Os modelos descritos nessa seção estão apresentados em detalhes no Apêndice A.

As partes foram modeladas e, uma vez aprovadas, foram confeccionadas sob medida para o projeto. As peças do sistema físico foram usinadas em alumínio. Já as peças para a interface física foram impressas em 3D, utilizando o material Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS, do inglês *Acrylonitrile Butadiene Styrene*).

A etapa de prototipagem possibilitou avaliar a viabilidade do projeto em termos de compatibilidade do sistema, estado de funcionamento dos componentes e condicionamento correto dos sensores e atuadores.

3.5 Considerações do Projeto

Neste capítulo foram descritos os passos iniciais do desenvolvimento do projeto.

Inicialmente foram relatados em quais pontos a automação intervém, segundo o procedimento descrito na seção 2.4. Em seguida, para entender mais a fundo o problema e alcançar uma solução mais completa, foram levantados os requisitos segundo as normas e segundo o laboratório. A descrição dos componentes utilizados é feita na seção 3.3, mostrando as especificações de todos os transdutores e do atuador utilizado no projeto. Por último, há uma seção que destaca a prototipagem do sistema.

Todas as etapas foram importantes para concepção e elaboração do sistema desenvolvido, além de permitir a análise de viabilidade do projeto.

Os próximos capítulos mostram o desenvolvimento do projeto e os resultados alcançados.

4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

A determinação da força do arco é um processo fundamental para o estudo e aprovação para comercialização de protetores auriculares no Brasil. Inicialmente, o procedimento realizado no LAEPI era de forma manual, e, conforme discutido anteriormente, haviam alguns pontos que poderiam ser aprimorados por um sistema automatizado. O processo manual é repetitivo e demorado, características que utilizam a mão-de-obra de forma indevida.

Resumidamente, o sistema deve ser capaz de medir a força que a haste do protetor auricular exerce, além da temperatura e umidade do ambiente, ao longo de 12 medições de 120 segundos cada. Esses dados devem ser processados no computador e, ao fim, deve ser gerado um arquivo com os dados prontos para serem referenciados no relatório do ensaio.

A Figura 28 a seguir mostra o sistema completo desenvolvido em operação:



Figura 28: Sistema desenvolvido em operação. Fonte: Acervo pessoal.

O processo automático de determinação da força do arco pode ser descrito nos seguintes passos:

1. primeiramente é feita a seleção do protetor auricular a ser ensaiado. No total, são necessárias cinco amostras. Nesta etapa é gerada a ordem de serviço do protetor auricular, para organização interna da empresa;
2. caso seja necessário, é feita a regulagem de altura e largura do sistema físico, para adequar a medição conforme a norma vigente. Na seção 4.1 é descrito mais profundamente o desenvolvimento do sistema físico;
3. são feitas todas as conexões do sistema. Tanto do sistema físico com a interface, quanto da interface com o computador, além da alimentação do motor com uma fonte externa;
4. neste momento, o sistema já inicia as medições instantâneas. Estas medições são exibidas na tela LCD da interface física. Desta forma não é obrigatório o uso do software de computador para fazer medições rápidas e que não necessitam o processamento e armazenamento que o programa proporciona;
5. a interface física também possibilita alterar a unidade de medição de força e fazer a tara. A unidade padrão de medição é newtons, mas há a possibilidade de visualizar em grama. O botão de tara também pausa o envio de dados pela serial. A interface física possui uma explicação mais aprofundada na seção 4.2;
6. com a parte física disposta corretamente, deve-se iniciar e configurar o software denominado DEFA. Na configuração do programa pode-se escolher entre modo manual ou automático e devem ser preenchidos os campos de dados do ensaio. Só assim o programa permite prosseguir para a medição propriamente dita. Nesta etapa também é escolhido o modo de reposicionamento do sistema, manual ou automático;
7. a medição é feita em 5 amostras de protetores auriculares. Para cada amostra são feitas 12 medições. Cada medição dura em média 120 segundos, sendo realizadas 120 leituras ao longo deste período. O reposicionamento é necessário entre todas as medições e pode ser

- realizado pelo motor, caso escolhido automático, ou pelo operador, caso escolhido manual;
8. ao final de cada medição, o operador pode escolher entre continuar a medição para a próxima amostra ou finalizar o ensaio. Caso opte por dar continuidade ao ensaio, o operador deve trocar de protetor no sistema físico, tanto no modo manual quanto no modo automático;
 9. ao fim da medição, é gerado um arquivo contendo os dados obtidos já processados. Este arquivo é padronizado pela empresa e contém os dados a serem referenciados no relatório entregue ao cliente. No Apêndice C – Arquivo Gerado pelo Programa DEFA, pode-se observar o arquivo gerado pelo programa e mais sobre o software desenvolvido, o processamento realizado sobre os dados obtidos e o gerenciamento das informações coletadas pode ser visto na seção 4.3.

Para melhor demonstração do processo descrito acima, foi gravado um vídeo demonstrativo do processo de determinação da força do arco em protetores auriculares. Este vídeo explica o funcionamento básico do sistema e demonstra o procedimento de medição. O conteúdo extra pode ser acessado pelo *QR code* na Figura 29 ou pelo link nas notas de rodapé:



Figura 29: QR code do vídeo demonstrativo do processo automatizado¹⁰.

Fonte: Acervo Pessoal.

¹⁰ Link: www.youtube.com/watch?v=Eaaanugt16s&feature=youtu.be

Observando o diagrama da Figura 30, pode-se analisar o fluxo de informação do sistema mais especificamente. O Arduino, presente na interface física, coleta todos os dados medidos pelos sensores do sistema. Os dados são formatados para serem exibidos na tela de LCD e enviados via porta serial para o computador. O Arduino recebe via serial o sinal de reposição do protetor auricular e envia ao servomotor o comando para ativar a rotina de reposicionamento. No computador, o software programado recebe via porta serial os dados e os processa, então exibe as informações no painel virtual na tela do PC. Ao final das medições, o software armazena de forma padronizada os dados processados pelo sistema em um arquivo “.dat”.

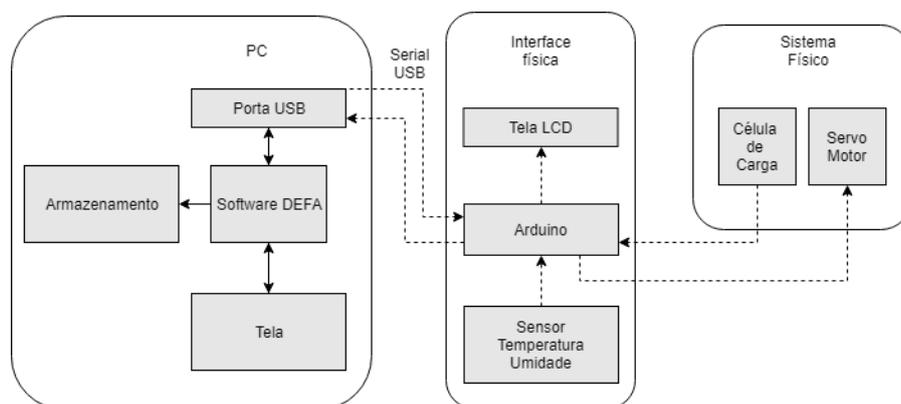


Figura 30: Fluxo de informações do sistema automático de medição da força do arco. Fonte: Acervo pessoal.

O projeto desenvolvido foi dividido em três subsistemas, para melhor leitura e entendimento: o sistema físico, interface física e software. Cada um destes subsistemas é aprofundado individualmente nas seções a seguir.

4.1 Sistema Físico

O sistema físico tem o objetivo de posicionar o protetor auricular de forma adequada, permitindo a medição da força do arco conforme a norma brasileira vigente. A estrutura é similar ao sistema de medição manual, porém possui uma

célula de carga e um sistema de reposicionamento automático acoplado a estrutura. A Figura 31 a seguir mostra o sistema físico desenvolvido.

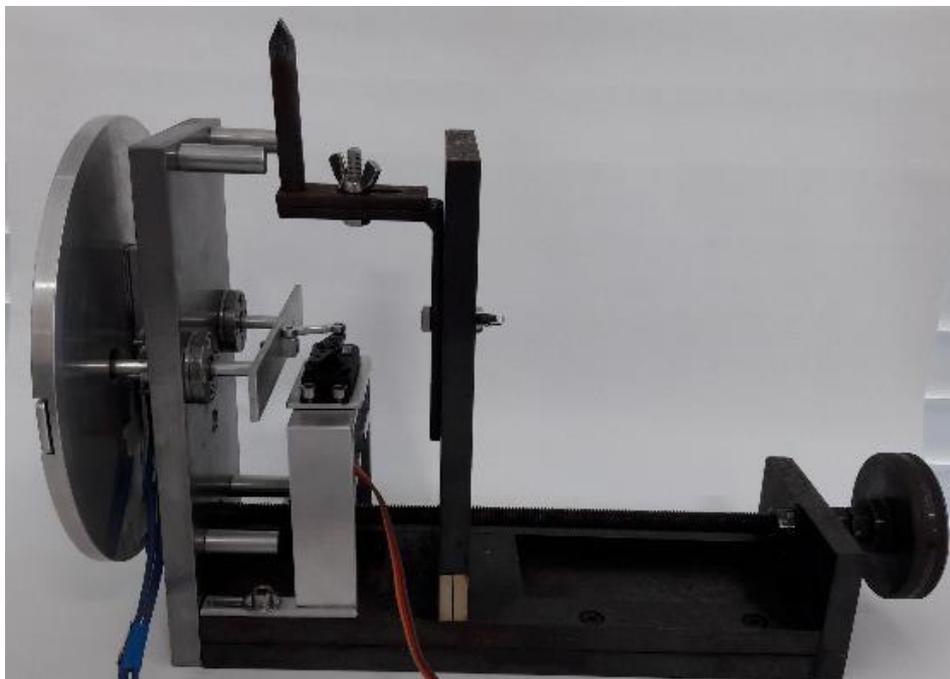


Figura 31: Sistema físico. Fonte: Acervo pessoal.

Conforme a norma exige, o sistema físico possui duas placas planas para o posicionamento do protetor auricular. Na placa plana externa do sistema a célula de carga está acoplada de forma que seja possível medir a força que o arco do protetor auricular exerce sobre a cabeça humana. Além disso, a placa plana externa possui um rebaixo, cujo propósito é encaixar o sistema de reposicionamento automático. A célula de carga tem um cabo para conexão com a interface física.

Para o ajuste horizontal, há uma barra roscada que desloca a placa plana interna, alterando a distância entre as placas. Já para a regulagem vertical, o pino de apoio pode ser ajustado com o conjunto parafuso e porca borboleta da peça. O sistema físico pode ser observado em detalhes na Figura 32.

Medições de protetores auriculares do tipo concha acoplado a capacetes de segurança exigem um ajuste vertical muito maior que os protetores auriculares do tipo concha usuais. Por este motivo foi projetado um expansor de alcance do pino de apoio do sistema físico, como mostra a Figura 33. Esta peça tem o objetivo de elevar o ponto de apoio sem haver a necessidade de alterar o ajuste no conjunto parafuso

e porca borboleta. Desta forma o ajuste grosso de altura é feito rapidamente e ainda permite um ajuste fino, caso necessário.

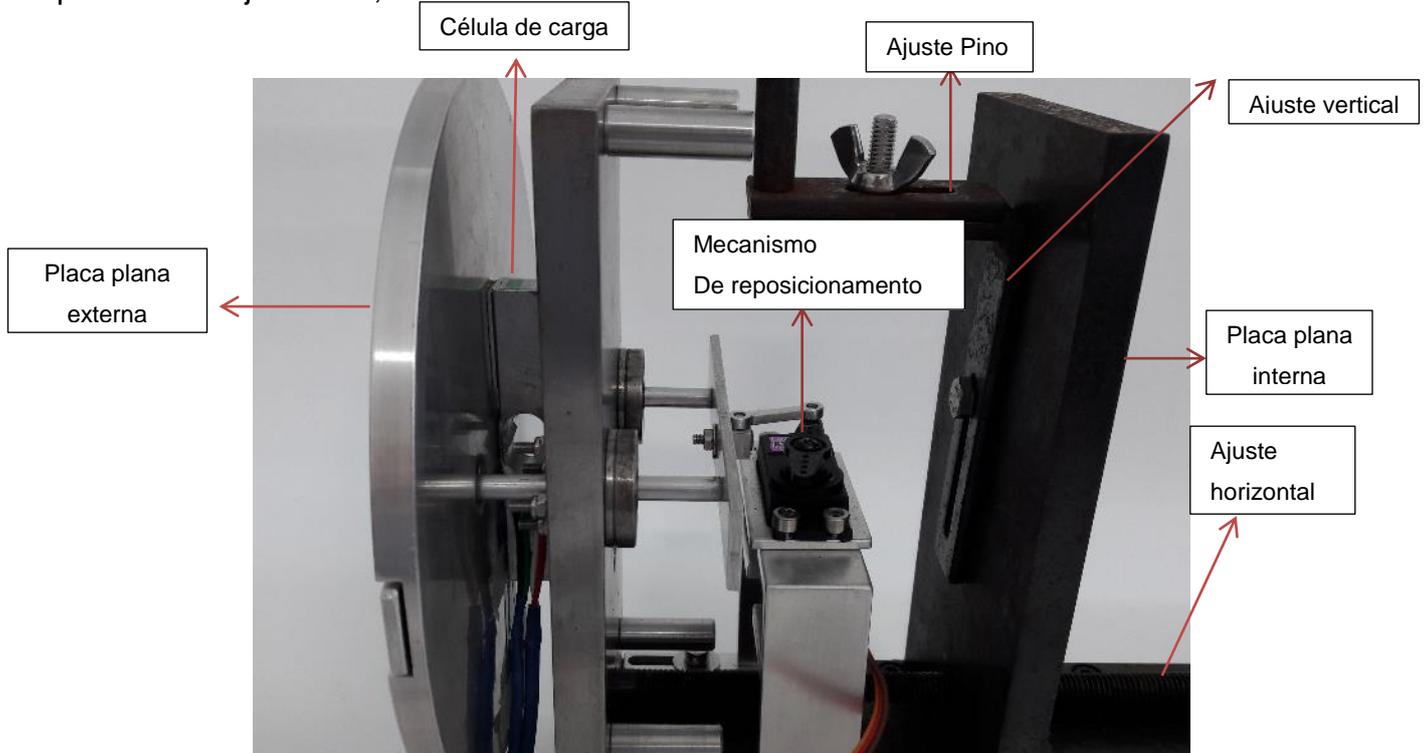


Figura 32: Detalhes do sistema físico. Fonte: Acervo pessoal.

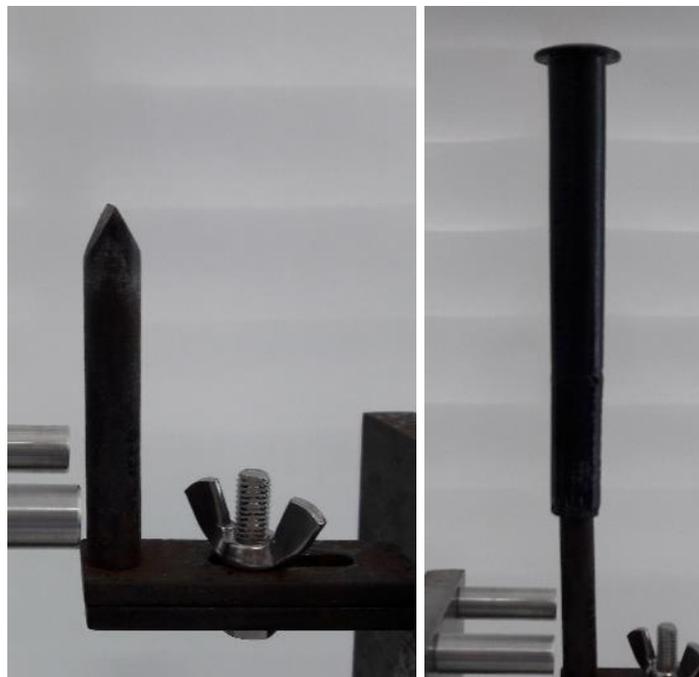


Figura 33: Pino guia para protetores do tipo concha (à esquerda) e, com expansor, para concha acoplado (à direita). Fonte: Acervo pessoal.

O sistema de reposicionamento automático é baseado em um servomotor, como descrito anteriormente neste documento. Para instalar o motor na altura correta e mantê-lo fixo junto ao sistema físico, foi elaborada uma estrutura de sustentação. Esta estrutura permite um ajuste de distância entre o motor e as placas planas.

É necessário transformar o movimento angular do motor em movimento retilíneo para o deslocamento do protetor auricular. Para tanto, foi desenvolvido um mecanismo do tipo Biela Manivela, como pode ser visto na Figura 34. O servomotor está acoplado a um apoio que efetivamente empurra a concha do protetor auricular durante o reposicionamento. O braço do servomotor comporta-se como a manivela (com ângulo limitado entre 0° e 180°), a peça que interliga o motor com o apoio é a biela e o apoio pode ser compreendido como o pistão que realiza o movimento retilíneo desejado. A Figura 35 e a Figura 36 mostram o sistema de reposicionamento desenvolvido.

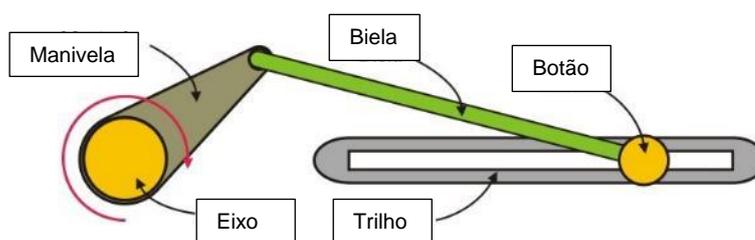


Figura 34: Sistema de transmissão Biela Manivela. Fonte: 358 Maquinas¹¹

¹¹ Disponível em: <https://sites.google.com/site/358maquinas/transmission-por-mecanismo-de-biela-manivela>. Acessado em: 22/09/2018.

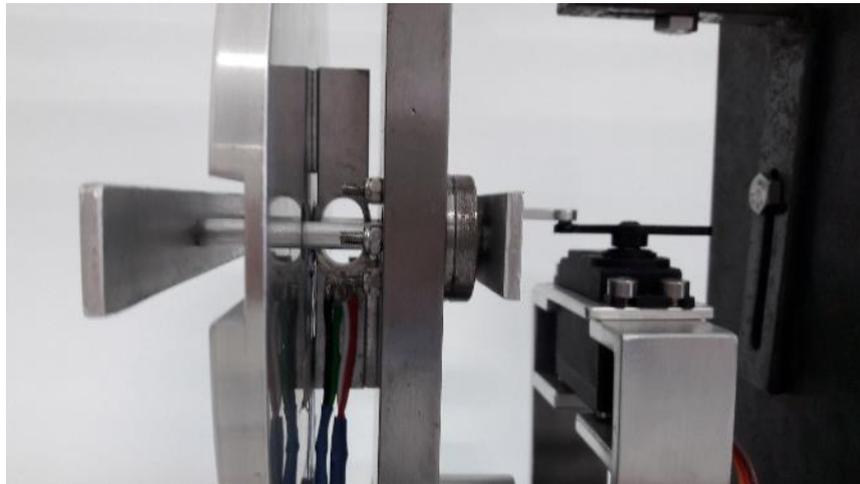


Figura 35: Mecanismo de reposicionamento com motor ativado. Fonte: Acervo pessoal.



Figura 36: Acoplamento entre motor e sistema de reposicionamento. Fonte: Acervo pessoal.

O sistema físico, portanto, tem a função de acomodar o protetor auricular para as medições da força do arco, além de possuir o mecanismo de reposicionamento automático. Tanto a célula de carga quanto o servomotor presentes no sistema, são conectados à interface física para a troca de dados com o microcontrolador.

4.2 Interface Física e Sistema de Medição

Para possuir uma forma de acompanhamento durante o processo de ensaio, foi projetada a interface física. Além disso, este subsistema ainda comporta internamente o sistema de medição propriamente dito, com microcontrolador e o sensor de temperatura e umidade também está localizado dentro da interface, posicionado em uma abertura apropriada na estrutura. A Figura 37 e a Figura 38 são fotos da interface física desenvolvida. A primeira imagem é uma visão externa, a segunda uma visão interna do subsistema.



Figura 37: Interface física em operação. Fonte: Acervo pessoal.

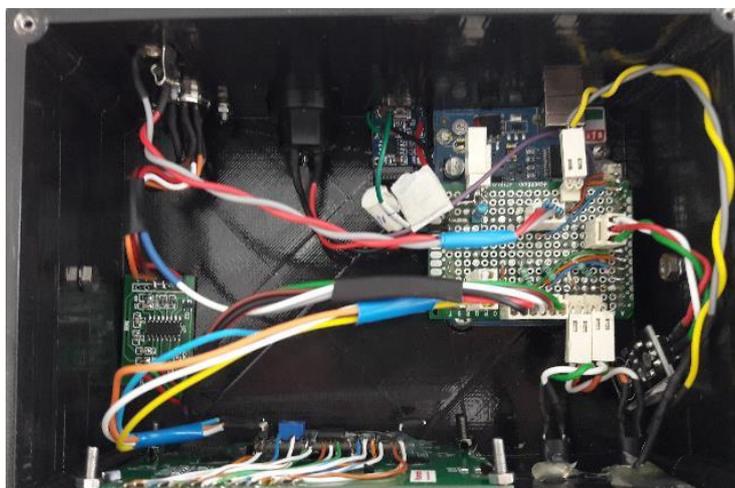


Figura 38: Organização interna da interface. Componentes implementados de forma modular. Fonte: Acervo pessoal.

Como pode ser observado na Figura 38, a interface física foi elaborada utilizando componentes modulares, ou seja, os componentes conectados ao Arduino são desacopláveis para revisão ou até mesmo substituição, se necessário. Os componentes externos à interface são conectados através de cabos, de forma que a interface se torna um objeto independente do conjunto completo.

A alimentação elétrica da interface física é feita pelo cabo USB, que também é a via de comunicação serial. A entrada USB do computador fornece 5 V e 0,5 A, suficiente para energizar o Arduino e os componentes conectados a ele. Para o motor, a alimentação é fornecida por uma fonte externa de 5 V e 2,5 A. A fonte também é conectada à interface física, que, por sua vez, envia a tensão ao motor.

Conforme descrito na introdução do capítulo 4, o fluxo de informações na interface física é constante. Este subsistema tem o objetivo de receber dados de todos os sensores implementados, além de enviar os sinais de ativação da rotina do servomotor. Desta forma, o Arduino possui conexão com todos os componentes do projeto. O Apêndice apresenta o diagrama de circuito do sistema.

Foi desenvolvida uma rotina no Arduino para programar a leitura dos sensores, fazer a comunicação serial com o computador e a atualizar a tela LCD. Em suma, a leitura das medições e o envio de dados formatados pela porta serial são periódicos, exceto caso o operador ativar o modo “em espera”, que será detalhado posteriormente.

O programa do Arduino pode ser dividido, grosso modo, em duas rotinas distintas: a rotina de coleta de dados e envio serial, e a rotina de recebimento de mensagens via serial.

Para a rotina de coleta de dados e envio serial tem-se a lógica:

1. programa confere se foi selecionado pelo operador o modo “em espera” ou não. Essa seleção é feita através dos botões da interface física. Caso o modo “em espera” esteja habilitado, o Arduino aguarda uma mudança de estado. Caso esteja operante, programa prossegue;
2. é realizada a coleta das leituras de temperatura e de umidade no início do ciclo;

3. verifica-se se a célula de carga está conectada à interface física, caso não esteja é indicado no LCD que o sensor está desligado. Caso contrário, é feita a leitura da força;
4. em seguida, são formatados os três dados coletados (força, temperatura e umidade) em uma *string* apropriada. No total, a *string* pode ter até 18 bytes, podendo ter variações, como por exemplo, se a força for negativa haverá um byte a mais do que o usual. Logo após, é feito o envio da string via porta serial;
5. o programa atualiza a tela LCD com os novos dados adquiridos;
6. conforme a unidade que o operador escolheu visualizar (escolha feita através dos botões da interface física), é feita a conversão da força para newtons ou para a massa equivalente (em grama) que teria o peso igual à força medida;
7. volta para o começo da rotina.

Para a rotina de recebimento de mensagens via serial é dado:

1. podem ser recebidos via porta serial duas mensagens distintas: Mensagem para realizar tara ou para efetuar o reposicionamento o protetor. Outras mensagens são descartadas pelo programa;
2. caso seja recebida uma mensagem de reposicionamento: o Arduino envia um comando que ativa o motor para a posição de operação, afastando a concha do protetor auricular da placa plana. Em seguida é feito a tara programaticamente e o motor volta para a posição de repouso, reposicionando o protetor auricular no dispositivo. Ao final, o programa envia uma mensagem de confirmação de fim de operação e volta para a rotina padrão;
3. caso seja recebida uma mensagem de tara: é executada a função de tara e em seguida é enviada uma mensagem de confirmação de fim de operação. Enfim, o programa volta para a rotina padrão.

Conforme descrito anteriormente, a interface física possui dois botões. O botão da esquerda altera a visualização da grandeza da célula de carga, ou seja, converte de newtons para gramas ou vice-versa. Já o botão da direita tem a função de realizar tara de forma manual. Além disso, o botão da direita pausa a transmissão

de dados via serial por tempo indeterminado, até o operador pressionar o mesmo botão novamente, saindo do modo “em espera”. A Figura 39 demonstra os efeitos das funções dos botões na tela LCD, além de mostrar a mensagem quando a célula de carga está desconectada.



Figura 39: Casos de tela da interface física. Sem sensor de força conectado (a), no modo espera (b), em operação com visualização em Newtons (c) e em operação com visualização em gramas (d). Fonte: Acervo pessoal.

O sistema de medição recebe os dados de todos os sensores do sistema. Além disso, a interface física envia os dados para o computador, onde serão devidamente processados e armazenados. A seção 4.3 é reservada para a discussão sobre o software desenvolvido e suas funcionalidades.

4.3 Software Desenvolvido

Os subsistemas descritos até a presente seção já possuem a capacidade de realizar as medições da força do arco. No entanto, a automação do processo exige a utilização de um software de computador. Denominado DEFA (sigla para Determinação da Força do Arco), o software desenvolvido em *LabVIEW* tem o objetivo de automatizar todas as tarefas envolvidas no processo, como: determinar o início e o término das medições, contabilizar as amostras ensaiadas, receber e

processar as medições realizadas pelo sistema físico, organizar e armazenar os dados processados de forma padronizada, além de possuir a interface virtual com o usuário.

O diagrama da Figura 40 ilustra o fluxo de informações do programa desenvolvido. Nota-se que inicialmente o software aguarda os dados necessários do ensaio, momento no qual também é determinado o modo de operação do sistema, manual ou automático. Na próxima etapa, o programa faz a leitura de dados recebidos por serial USB durante o tempo de medição estabelecido (sendo o padrão 120 s).

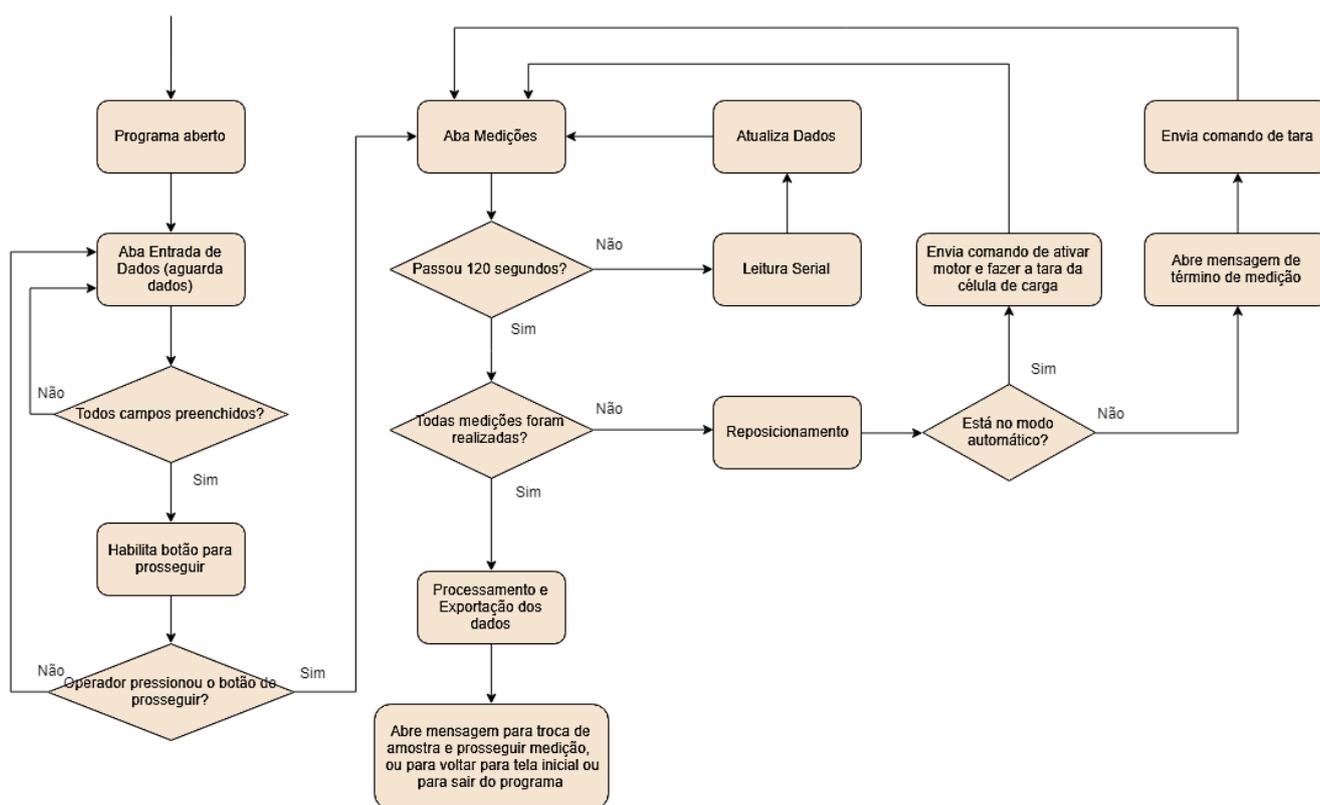


Figura 40: Fluxograma de Dados do Software. Fonte: Acervo Pessoal.

Do ponto de vista do operador, quando o programa é executado, a tela de entrada de dados é exibida, como é visto na Figura 41. Nesta tela é possível observar e preencher informações do ensaio. A área de “Configuração de Aquisição” já é preenchida com os dados padrões: o número de Medições por amostra é 12, o tempo de medição é 120 segundos e o total de amostra é 5. O espaço “Ensaio” possui campos que devem ser preenchidos com os dados da medição em

andamento: o nome do operador, a ordem de serviço para controle da empresa, o modelo do protetor auditivo ensaiado e o número da amostra. Caso seja um ensaio que já tenha sido realizado antes, o programa faz o autopreenchimento dos campos de “Ensaio” com base na ordem de serviço.



Figura 41: Entrada de dados incompleta do DEFA. Fonte: Acervo pessoal.

Somente quando todos os campos foram preenchidos que o sistema permite o início das medições da força de arco. Na Figura 42 é possível de observar o sistema com os dados preenchido e pronto para prosseguir. Neste momento também é possível optar entre o modo manual ou o modo automático no botão “Motor Off/On”. No modo manual o reposicionamento do protetor auricular é feita manualmente pelo operador, enquanto no modo automático o motor faz o reposicionamento.

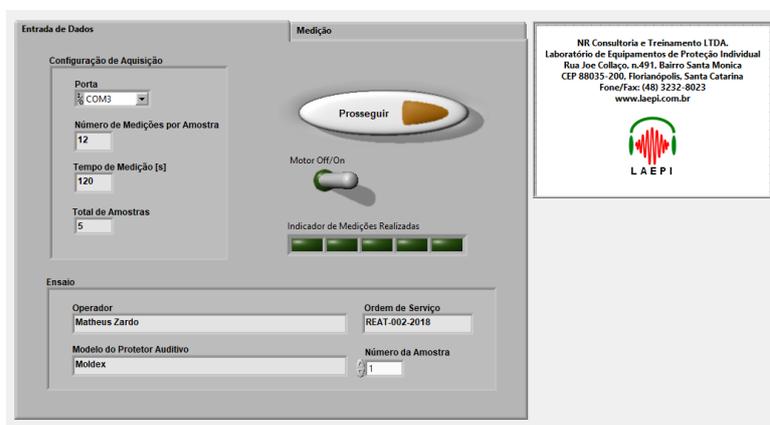


Figura 42: Entrada de dados preenchido do DEFA. Fonte: Acervo Pessoal.

Quando o operador prossegue com o ensaio, o programa muda a aba exibida para a tela de Medição. Nesta tela pode-se acompanhar as médias atualizadas a cada segundo da temperatura, umidade e força, além do gráfico da força de arco medida (Figura 43). Também são exibidas três caixas para acompanhamento do processo de ensaio pelo operador: Medições (tempo de medição), Número de Medições e número da amostra.

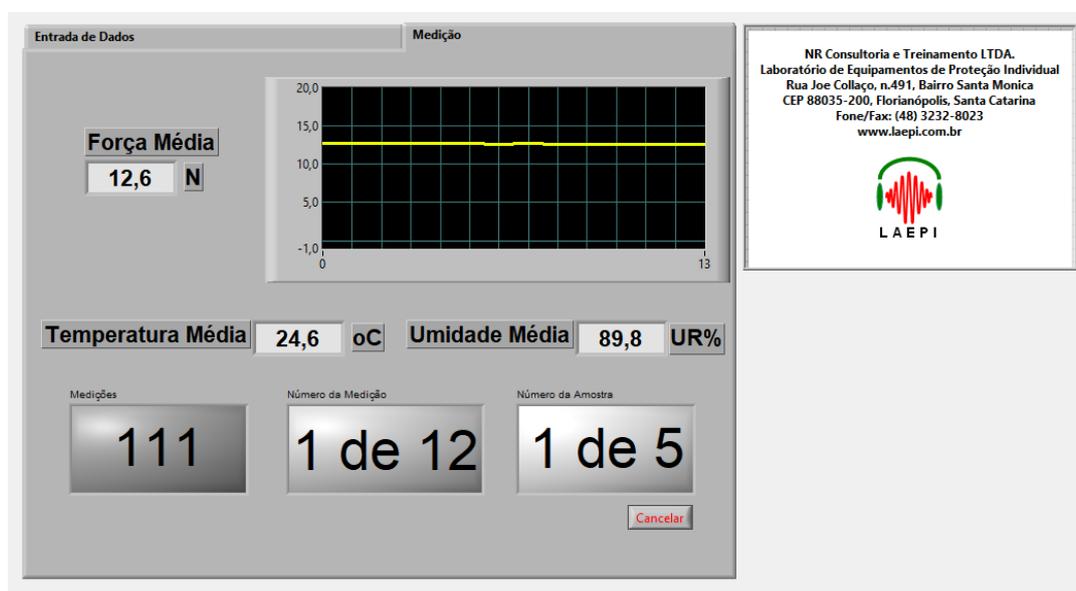


Figura 43: Tela de Medição do software DEFA. Fonte: Acervo Pessoal.

Quando realizadas as 12 medições do ensaio com 120 segundos cada, os dados são processados automaticamente e formatados para exportação do arquivo. O documento gerado é padronizado pela empresa com extensão “.dat” e é salvo no servidor local. O Apêndice C demonstra o formato do arquivo gerado pelo programa.

Ao fim, uma mensagem surge para o operador informando o fim do ensaio da amostra. O programa oferece três opções: continuar o ensaio com a próxima amostra (para dar continuidade ao ensaio com o mesmo modelo), voltar à tela de entrada de dados (caso mude o operador ou o modelo do protetor auricular ensaiado, por exemplo) ou sair do programa (se já tiver finalizado o processo). A Figura 44 apresenta a mensagem que o operador visualiza.

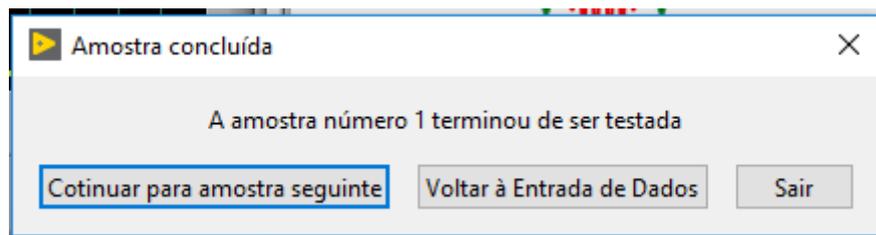


Figura 44: Mensagem de conclusão de medição de amostra no DEFA.

Fonte: Acervo pessoal.

Até o presente momento foi descrito como o operador interage com o DEFA. Podemos analisar de forma mais específica o diagrama de blocos, para entender a engenharia da solução. O processo executado pelo programa pode ser dividido em cinco etapas. Os dois primeiros são para inicialização e atribuição dos parâmetros do programa. As outras três etapas realizam o processamento e armazenamento dos dados, as quais serão explicadas a seguir.

Na terceira etapa, o DEFA exibe a tela de configuração de dados, que foi descrita anteriormente. O programa permanece conferindo os campos através de um evento *timeout*, ou seja, periodicamente confere se o estado de preenchimento do campo é verdadeiro ou falso. Quando todos os campos foram preenchidos, é habilitado o botão que prossegue o processo de medição.

Em paralelo, é executada uma rotina que realiza o autopreenchimento dos campos de ensaio, caso a ordem de serviço seja identificada. Isso ocorre através de um evento de entrada de dados no LabVIEW. Assim que o usuário preenche o campo da ordem de serviço, o programa verifica a existência de algum arquivo no servidor com o mesmo nome, logo, se já foi efetuado algum ensaio equivalente. O programa lê o arquivo e copia os dados do ensaio para os campos apropriados.

A quarta etapa é reservada para à coleta de medições via USB e ao processamento dos dados obtidos. Assim que o usuário prossegue para a medição de dados do DEFA, o programa entra em um laço com número de repetições igual ao número de medições estabelecido (com o padrão de 12 medições). A primeira função do laço é a de reposicionamento do protetor auricular, que pode ser dividido em dois tipos:

- manual: mostra uma mensagem de aviso de reposição ao usuário, para retirar o protetor auricular do sistema físico. Posteriormente, envia

uma mensagem via serial ao Arduino para fazer a tara, espera uma mensagem de confirmação do Arduino que a tara foi realizada¹². Finalmente, avisa o usuário, através de uma mensagem na tela, que o protetor auricular pode ser reposicionado;

- automático: envia uma mensagem via serial ao Arduino para ativar a rotina do servomotor¹³. Como descrito no capítulo anterior, a rotina do motor já faz a tara da célula de carga quando a posição do braço robótico está na posição de operação, ou seja, com o protetor auricular afastado da placa plana. O software DEFA aguarda, então, a mensagem de confirmação do Arduino que a rotina foi realizada para prosseguir com as medições.

Com a reposição do protetor auditivo feita, o programa entra em outro laço, este com o número de repetições igual ao tempo total de medição, o padrão é de 120 segundos com 5 segundos de segurança referente à estabilidade das leituras.

Como discutido anteriormente, a mensagem recebida pelo software contém as três grandezas medidas (temperatura, umidade e força), em uma *string* concatenada. O software DEFA separa os dados da mensagem e adiciona cada valor em um *array* específico. Assim que o dado é salvo, o programa faz a média do *array* e o resultado é posto em um segundo *array*, o *array* de médias. A Figura 45 ilustra como as médias são salvas no DEFA.

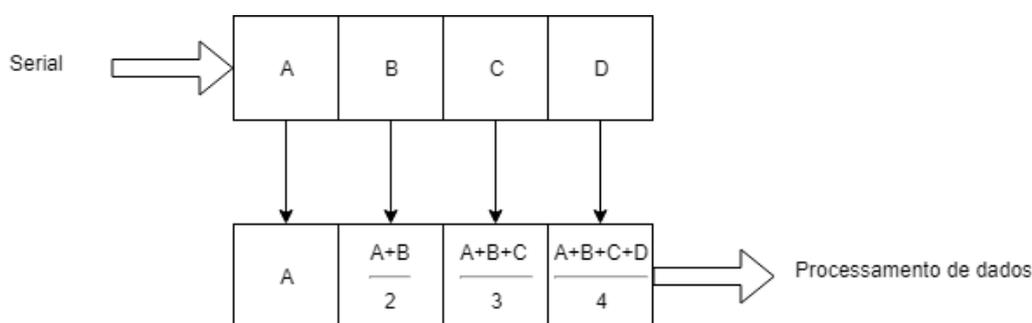


Figura 45: Array de dados (acima) e array de médias (abaixo) do software DEFA. Fonte: Acervo pessoal.

¹² Foi desenvolvida uma lógica de *timeout no envio da mensagem*. Caso sejam perdidas durante a transmissão, as mensagens são reenviadas à interface física.

¹³ Idem.

Quando finalizada as 120 leituras de uma medição, o programa prossegue para o processamento dos dados obtidos. Primeiramente o software exclui as cinco primeiras leituras da medição, para garantir que as leituras apresentavam estabilidade. Em seguida é feita a média de cada “array de médias” para as três grandezas lidas, resumindo assim 120 leituras em uma. Essa média é salva em outro array, o “array de resultados”.

Deste ponto o programa volta para a seção de reposicionamento. Caso o software já tenha realizado as 12 medições, é feita a média do “array de resultados” para temperatura e umidade, resumindo assim 12 valores em um. Ao final do ensaio do protetor, os dados ficam na forma:

- 12 dados de força;
- 1 dado de temperatura;
- 1 dado de umidade relativa do ar.

A última etapa do processo realiza para a exportação do arquivo com os dados processados, no formato apresentado acima. Há uma rotina de busca com base na ordem de serviço que procura diretórios de mesmo nome no servidor, rotina que é usada também na parte de autopreenchimento. Caso a rotina não encontre nenhum diretório nomeado com a ordem de serviço, significa que é uma nova medição e será gerado um novo arquivo. Caso a rotina encontre um diretório compatível, o arquivo é aberto no programa para ser preenchido com os novos dados obtidos.

O “array de resultados” da força e o resultado da temperatura e umidade são convertidos para *strings*. Em seguida, são posicionados em uma matriz de acordo com o padrão estabelecido pela empresa. A matriz é exportada no diretório padronizado para um arquivo “.dat” como uma planilha, de forma que possa ser facilmente aberta por programas como Excel.

Ao final, o programa apresenta ao usuário a mensagem de término de medição, como ilustra a Figura 44 descrita anteriormente.

O Apêndice B apresenta os diagramas de bloco do software desenvolvido.

4.4 Considerações do Desenvolvimento

No capítulo 4 foi feita a descrição do desenvolvimento do projeto de automação. Primeiramente foi demonstrado o sistema completo e como ele funciona. Em seguida, as explicações dos três subsistemas foram apresentadas individualmente.

O sistema físico é dedicado a posicionar o protetor auricular conforme a norma prevê e realizar as medições de força através da célula de carga. Além disso, este subsistema contém o mecanismo de reposicionamento automático elaborado para a solução.

A interface física possibilita a medição de todos os transdutores utilizados no sistema, e aciona o servomotor para realizar o reposicionamento automático do protetor auricular. A comunicação serial com o computador é outra função importante que a interface física possui, de forma que os dados possam ser transmitidos ao software para processamento.

O software DEFA automatiza o processo de determinação da força do arco, recebendo os dados medidos pela interface física e processando-os para os valores que serão dispostos no relatório gerado posteriormente. Além disso, é responsável pela interface virtual com o usuário, que possibilita o controle do processo automatizado. Outra característica do software é a organização dos dados gerados em arquivos padronizados conforme requisição do LAEPI.

Foram realizados testes no sistema, com o objetivo de verificar se o sistema alcança os requisitos estipulados e levantar possíveis pontos de aprimoramento. A discussão dos resultados dos testes é apresentada no capítulo 5.

5 TESTES E RESULTADOS

Com o desenvolvimento concluído, houve a necessidade da realização de testes do sistema. O teste realizado tem diversas finalidades, entre elas: quantificar o desempenho do sistema, demonstrar que os requisitos foram contemplados, testar a usabilidade das interfaces e testar a robustez do sistema. Outro objetivo importante dos testes foi a busca de erros no programa.

Foram submetidos aos testes três dos processos de determinação da força do arco disponíveis no LAEPI. Apresenta-se na Figura 46 os dois sistemas testados:

- o sistema manual antigo;
- o sistema desenvolvido no modo manual;
- o sistema desenvolvido no modo automático.



Figura 46: Sistema desenvolvido (à esquerda) e sistema manual (à direita).

Fonte: Acervo pessoal.

O sistema antigo foi usado como referência para fins de comparação com os resultados obtidos com o sistema desenvolvido. É importante salientar que o sistema desenvolvido não foi calibrado em laboratório RBC antes da realização dos testes,

como a norma vigente prevê. Por este motivo, os resultados obtidos nos testes não poderiam ser usados em relatórios oficiais e os valores observados podem apresentar erros sistemáticos na leitura.

Foram realizados quatro testes para cada processo selecionado, com o mesmo protetor auricular do tipo concha. O primeiro teste contemplou a obtenção dos valores de uma única medição, a fim de comparar entre os processos a coesão dos valores de uma mesma amostra. O segundo teste é o teste de repetibilidade: foram feitas 12 medições de força para comparação entre as medições, a fim de verificar se os valores se repetem de forma aproximada. Já o terceiro teste destinou-se a avaliar o tempo que leva para o sistema realizar uma medição. No quarto teste, foi calculado o tempo que leva para o sistema realizar as 12 medições de uma amostra, levando em consideração o tempo de reposicionamento, sendo manual ou automático. Além disso, foram observados aspectos de usabilidade para a discussão dos resultados obtidos.

Os testes foram realizados pelo autor do documento e os resultados podem ser conferidos na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos Testes

TESTE	Sist. Antigo	Sist. Desenvolvido Manual	Sist. Desenvolvido Automático
Valores Medidos:			
• Temperatura (°C)	• 24,6	• 24,4	• 26,5
• Umidade (%)	• 78,0	• 87,7	• 80,4
• Força (N)	• 10,36	• 11,50	• 11,28
Repetibilidade: (N)			
• Medição 1	• 10,34	• 12,44	• 11,86
• Medição 2	• 10,38	• 11,65	• 11,73
• Medição 3	• 10,41	• 11,64	• 11,66
• Medição 4	• 10,31	• 12,59	• 11,68
• Medição 5	• 10,34	• 12,48	• 11,44

• Medição 6	• 10,33	• 11,49	• 11,31
• Medição 7	• 10,85	• 12,51	• 11,28
• Medição 8	• 10,45	• 12,61	• 11,32
• Medição 9	• 10,32	• 11,71	• 11,24
• Medição 10	• 10,42	• 11,87	• 11,27
• Medição 11	• 10,40	• 11,58	• 11,32
• Medição 12	• 10,10	• 11,59	• 11,31
Média (N)	10,3875	12,01333	11,4517
Desvio Padrão (N)	0,170727	0,463177	0,217834
Tempo de 1 medição	02 min e 12 s	02 min e 24 s	02 min e 08 s
Tempo de 12 medições (reposicion.) (min.)	26 min e 06 s	26 min e 48 s	25 min e 25 s

Houve problemas nos testes realizados com o sistema manual antigo da empresa. Por se tratar de uma célula de carga desenvolvida para uma aplicação diferente da utilizada, o sistema desligava quando a força permanecia constante por certo período de tempo, que era menor que dois minutos. Desta forma, as medições do sistema antigo não foram feitas por dois minutos cada, conforme a norma estabelece.

Pelos dados obtidos é possível perceber que os três sistemas alcançam valores aproximados nas medições. O sistema desenvolvido, que não está calibrado, possivelmente contém erros sistemáticos nas medições, o que não deve ocorrer com o sistema antigo que já está calibrado.

A repetibilidade em todos os três sistemas é satisfatória. O sistema desenvolvido no modo manual tem o maior desvio padrão, aproximadamente 0,46 N,

ou seja, a pior repetibilidade. Porém, os valores das medições permanecem satisfatórios, segundo o LAEPI.

O tempo para uma medição é aproximado para os três sistemas. Já o tempo de 12 medições de uma amostra, que contempla o reposicionamento entre as medições, apresenta um tempo razoável entre os modos de operação dos sistemas testados. Para o sistema antigo, considerou-se que cada medição leva dois minutos, apesar da balança não permanecer ligada durante todo esse tempo, como discutido anteriormente. Outro problema do sistema antigo é que muitas medições podem ser perdidas, caso a balança desligue sem o valor da força ter sido anotado.

Outro ponto avaliado foi a usabilidade do sistema. Para o sistema antigo, a atenção do operador ao processo deve ser constante. Por ser um processo repetitivo, acaba sendo cansativo. Por ocorrer perdas de medições, o tempo de medição pode aumentar ainda mais. Além disso, constatou-se que o procedimento antigo não está conforme a norma prevê, com medições de 120 s.

O sistema desenvolvido no modo manual apresenta uma segurança maior para o operador. A cada fim de medição um sinal sonoro é emitido para avisar o operador que a medição foi finalizada, para assim ser feito o reposicionamento manual.

Para o sistema desenvolvido no modo automático, é apresentada uma solução prática para o operador. Depois de o sistema configurado, tanto as medições quanto o reposicionamento são feitos automaticamente, assim como a exportação dos dados processados. Desta forma, o operador está isento de intervenções durante o processo de medição da amostra.

Foi realizado um ensaio de robustez para o sistema desenvolvido, operando no modo automático. O teste consistiu em realizar 10 vezes mais medições que o padrão determinado, ou seja, realizar 120 medições consecutivas. A intenção do procedimento é verificar se o sistema apresenta falhas em caso de uso prolongado. Para este teste o sistema não apresentou problemas, mesmo depois de permanecer em operação por aproximadamente quatro horas.

Ao longo de todos os testes, não foram encontrados erros no programa que comprometessem as medições.

Em termos gerais, os ensaios realizados foram bem-sucedidos. Foi possível analisar a qualidade das medições feitas e o tempo do processo estimado. Com a

análise, pode-se concluir que o sistema desenvolvido tem uma boa repetibilidade de medições, possui um desempenho satisfatório e está adequado à norma vigente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Este documento apresenta as etapas do projeto de automação do processo de determinação da força arco em protetores auriculares, desenvolvido como projeto de fim de curso de Engenharia de Controle e Automação. Todo o projeto foi realizado tomando com base os requisitos impostos em normas, que regulamentam esse tipo de ensaio e os requisitos de usabilidade do sistema desejados pelo LAEPI.

A partir dos resultados dos testes realizados com o sistema desenvolvido, é possível concluir que o objetivo geral estabelecido para o projeto foi atingido. A automação do processo funciona, o sistema atende aos requisitos da norma e os resultados obtidos são satisfatórios para aplicação na rotina da empresa.

Ao fim do projeto, pode-se observar uma melhora no processo de medição da força do arco em protetores auriculares. O tempo que o sistema leva para ensaiar uma amostra foi reduzido em alguns minutos, mas o maior impacto foi o fato de o colaborador poder realizar outras atividades durante as medições. Antes do sistema automático, apenas dois ensaios de determinação da força do arco poderiam ocupar meio período de trabalho do operador. Agora, com o novo sistema, o tempo de ensaio permanece praticamente o mesmo, já que o tempo das medições é estabelecido em norma e responsável por praticamente toda a duração do ensaio, porém o colaborador pode realizar outras atividades enquanto o processo é executado.

Além disso, a organização dos dados também foi aprimorada, pois o programa possibilita que os dados sejam salvos diretamente no servidor no formato padronizado pela empresa. A automação da organização dos dados também contribui para diminuir a probabilidade de ocorrência de erros, visto que antes esse processo era realizado pelo operador de forma manual.

Apesar de o sistema desenvolvido ser totalmente automático, ele permite a realização de ensaios personalizados, por exemplo, ensaio com apenas a interface física e o sistema físico, com o operador observando a tela LCD (sem o critério da norma). A opção de escolha entre modo manual e modo automático também permite que o sistema continue a ser empregado mesmo que algum componente de automação, como o servomotor, falhe.

Houve um grande aprendizado, por parte do autor, especialmente nas áreas de acústica, mecânica, eletrônica e automação. Além do aprendizado, merece

destaque a formação que foi adquirida pela possibilidade de experienciar o desenvolvimento do início ao fim de um projeto de automação de processo.

Apesar de o sistema desenvolvido estar funcional e atender aos requisitos, durante o seu desenvolvimento foram observados alguns pontos que podem ser aprimorados:

- desenvolvimento de um sistema de realimentação da posição final da peça de suporte do protetor auricular, de forma que a distância entre a peça e a placa plana seja mais exata durante a medição (posição de repouso do motor);
- confecção de uma peça mais larga de suporte do protetor auricular durante o reposicionamento, para o protetor ficar melhor equilibrado;
- confecção de uma placa de circuito impresso para o sistema de aquisição, para aumentar a robustez da placa eletrônica;
- calibração do sistema em laboratório da RBC.

Além do aprimoramento destes pontos, o autor espera que o sistema desenvolvido seja incluído no fluxo de trabalho do laboratório como o equipamento principal de medição da força do arco. Como descrito anteriormente, nenhuma pesquisa ou projeto de automação desse processo foram encontrados. Desta forma, espera-se que o desenvolvimento do projeto aqui descrito tenha respaldo na comunidade científica da área. Espera-se também o desenvolvimento de outros projetos na área de acústica e vibração no contexto de controle e automação, área de grande afinidade do autor.

REFERÊNCIAS

- [1] HSU, Yeh-liang et al. Comfort evaluation of hearing protection. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Amsterdam, v. 33, n. 6, p.543-551, jun. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2004.01.001>.
- [2] ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta; GERGES, Samir N.y.. Effects of cup, cushion, headband force, and foam lining on the attenuation of an earmuff. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Amsterdam, v. 36, n. 2, p.165-170, fev. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2005.09.004>.
- [3] GERGES, Samir N.Y.. Earmuff comfort. **Applied Acoustics**, [Amsterdam, v. 73, n. 10, p.1003-1012, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.04.015>.
- [4] BERGER, Elliot H.. Hearing Protector Performance: How they work - and - what goes wrong in the real world. **Earlog Series**, Indianapolis, v. 5, p.1-4,1980.
- [5] WILLIAMS, W.; SEETO, M.; DILLON, H.. The mechanical properties of earmuffs. **Institute of Noise Control Engineering**, Reston, p.29-35, fev. 2012.
- [6] SVIECH, Patricia Schiniski et al. The evaluation of comfort of the personal hearing protection devices as an intervention of hearing loss prevention. **Cefac**, Perdizes, p.1325-1337, out. 2013.
- [7] CASALI, John G.; GRENNELL, James F.. Noise-attenuating earmuff comfort: A brief review and investigation of band-force, cushion, and wearing-time effects. **Applied Acoustic**, Virginia, v. 29, p.117-138, out. 1990.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16076**: Equipamento de proteção individual - Protetores Auditivos - Medição de atenuação de ruído com métodos de orelha real. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 35 p.
- [9] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **S12.6-2016**: Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors. New York: Asa, 1974.
- [10] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **S3.19.-1974**: Method for the measurement of real-ear protection of hearing protectors and physical attenuation of earmuffs. New York: Asa, 1974. 15 p.
- [11] MICHAEL & ASSOCIATES, INC. (Estados Unidos). **Muff-type HPD Force Measurement System**. 2015. Disponível em: <<http://www.michaelassociates.com/products/muff-type-hpd-force-measurement-system/#content-content-inner>>. Acesso em: 27 ago. 2018.
- [12] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 6**: Equipamento de Proteção Individual- EPI. Brasília: MTE, 2017. 8 p.

- [13] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **PORTARIA 452**: Portaria 452. Brasília: MTE, 2017. 16 p.
- [14] EUROPEAN STANDARTS. **EN 352-1**: Hearing Protectors - General Requirements. Reino Unido, 2002.
- [15] EUROPEAN STANDARTS. **EN 13819-1**: Hearing Protectors - Testing. Reino Unido: Bruxelas, 2003. 45 p.
- [16] NELSON, Deborah Imel et al. The global burden of occupational noise-induced hearing loss. **American Journal of Industrial Medicine**, [s.l.], v. 48, n. 6, p.446-458, 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ajim.20223>.
- [17] MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 15**: Atividade e Operações Insalubres. Brasília: MTE, 2015.
- [18] BRANDOLT, Paulo Ricardo de Mendonça. **Análise das Características Acústico/Mecânico dos Protetores Auditivos**. 2001. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, CTC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [19] PARK, Min-yong; CASALI, John G.. An Empirical Study of Comfort Afforded by Various Hearing Protection Devices: Laboratory versus Field Results. **Applied Acoustic**, Virginia, v. 34, p.151-179, mar. 1991.
- [20] NATIONAL INSTRUMENTS. **Medições de carga: Guia prático**. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/tutorial/7138/pt/>>. Acesso em: 04 set. 2018.
- [21] AVIA (China). **HX711**: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. 2016. Disponível em: <https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711_english-1022875.pdf>. Acesso em: 04 set. 2018.
- [22] AOSONG ELECTRONICS (China). **Digital-output relative humidity & temperature sensor/module**. 2016. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2018.
- [23] BRAGA, Newton C.. **Como funcionam os servos meec066a**. 2012. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5164-mec066a>>. Acesso em: 06 set. 2018.
- [24] TOWERPRO (Taiwan). **MG996R Robot servo 180° Rotation**. 2014. Disponível em: <<http://www.towerpro.com.tw/product/mg995-robot-servo-180-rotation/>>. Acesso em: 05 set. 2018.
- [25] SHENZHEN EONE ELECTRONICS (China). **Specification For LCD Module 2004A**. 2007. Disponível em: <https://www.beta-estore.com/download/rk/RK-10290_410.pdf>. Acesso em: 06 set. 2018.

[26] NEWTON C. BRAGA (Brasil). **Conheça o Barramento I2C**. 2016. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/microcontrolador/143-tecnologia/12085-conheca-o-barramento-i2c-mic098>>. Acesso em: 06 set. 2018.

[27] SPARKFUN (Estados Unidos). **What is an Arduino?** 2014. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino#re>>. Acesso em: 10 set. 2018.

[28] REIS, Cleber. **O que é SolidWorks?** 2017. Disponível em: <<https://www.plataformacad.com/o-que-e-solidworks/>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

[29] TRAVIS, Jeffy; KRING, Jim. **Introduction to Graphical Programming with LabVIEW**. 2006. Disponível em: <<http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=662895&seqNum=3>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

APÊNDICE A - MODELOS 3D DO SISTEMA FÍSICO

Este apêndice apresenta os modelos 3D das peças elaboradas para o projeto. Na Figura 47 é possível de observar todas as peças modeladas em *SolidWorks* do sistema físico, montadas em uma estrutura. Cada modelo possui uma cor específica, para melhor observação, e na própria imagem é descrito o nome de cada componente. Na Figura 48 há duas vistas, lateral e superior, do modelo.

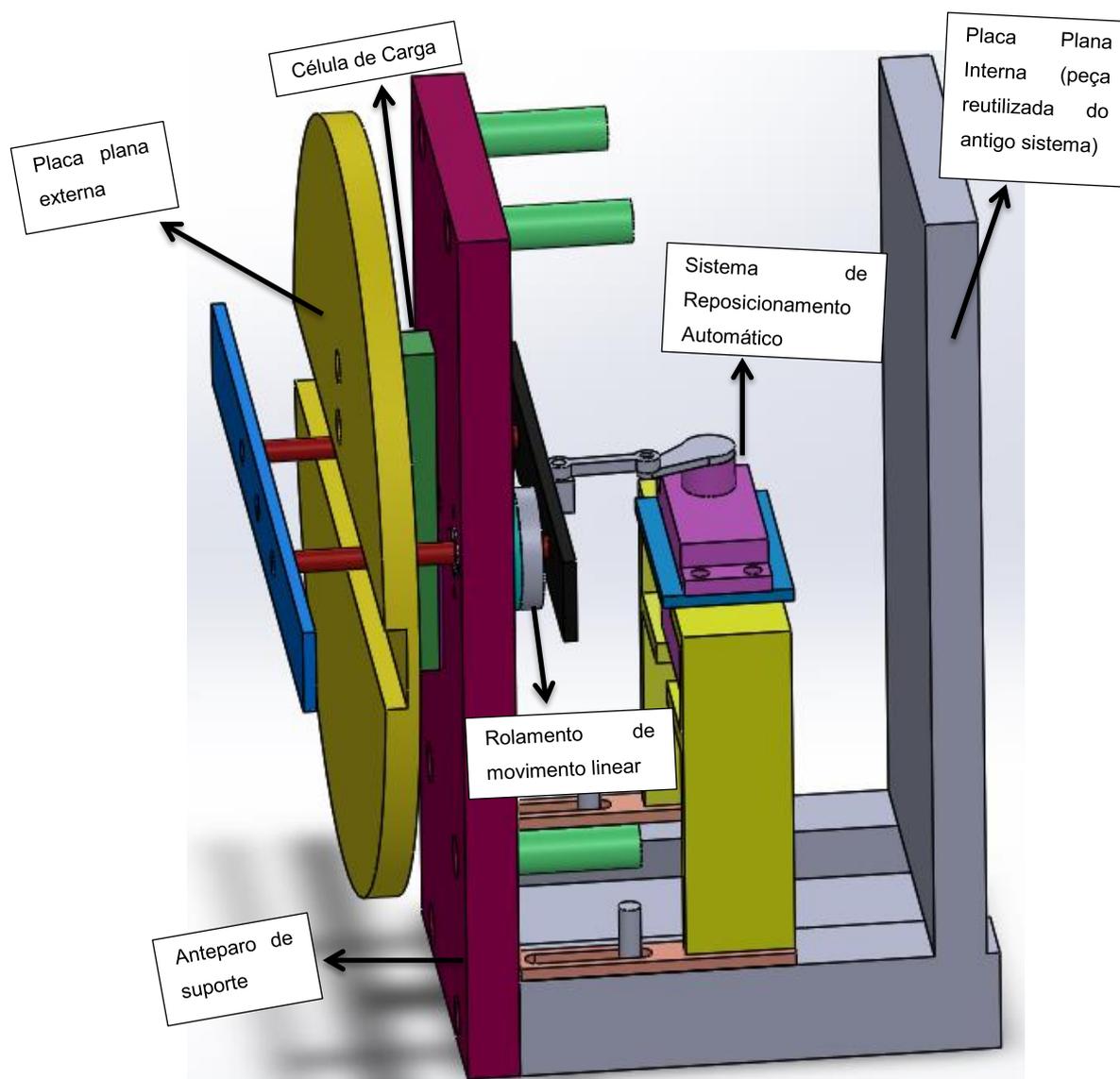


Figura 47: Peças novas do sistema físico. Fonte: Acervo pessoal.

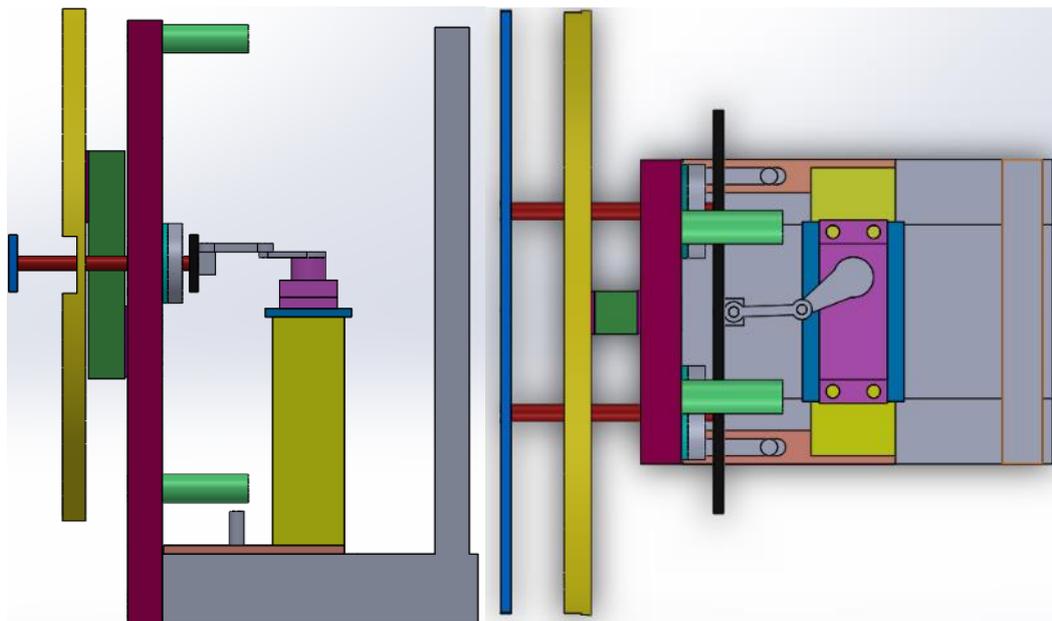


Figura 48: Peças do sistema físico: vista lateral (à esquerda) e vista de cima (à direita). Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 49 e a Figura 50 mostra o mecanismo de reposicionamento automático desenvolvido. A Figura 50 mostra peças que suportam o protetor auricular durante o reposicionamento. É possível observar a projeção do sistema de reposicionamento automático em funcionamento na Figura 48.

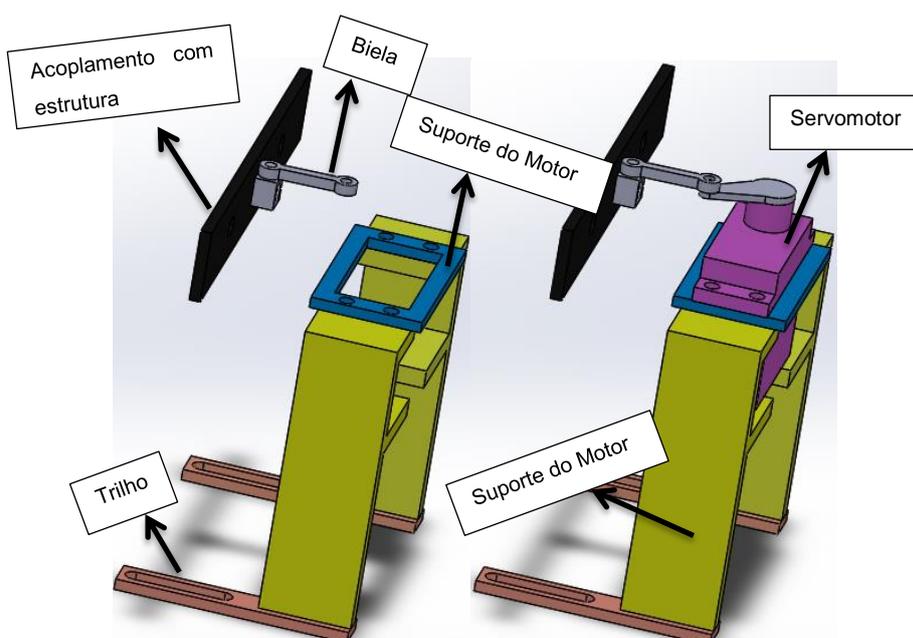


Figura 49: Modelo do mecanismo do tipo Biela-Manivela desenvolvido para o reposicionamento automático do protetor auditivo. Fonte: Acervo Pessoal.

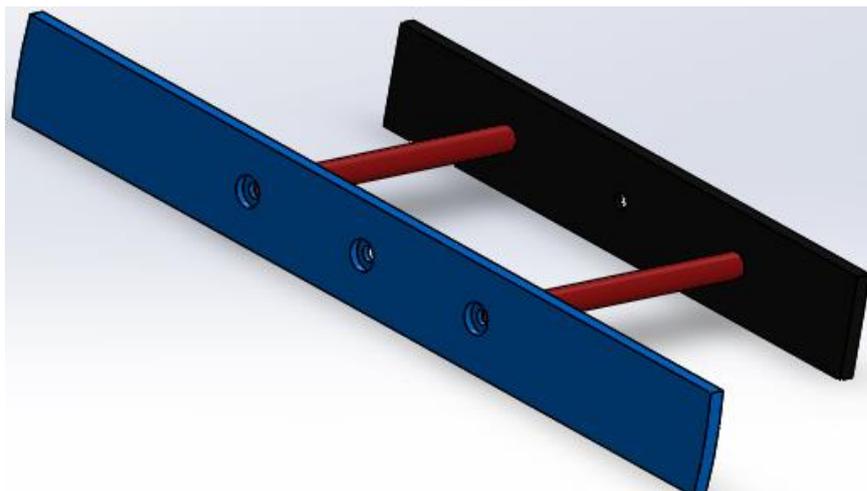


Figura 50: Peça de suporte do protetor durante reposicionamento. Fonte: Acervo Pessoal.

A Figura 51 apresenta o modelo 3D da interface física desenvolvida.

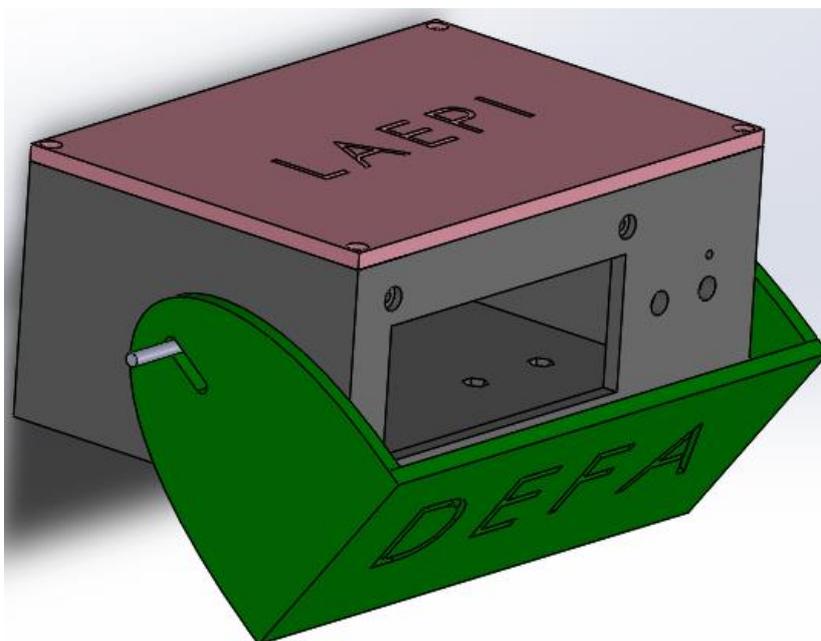


Figura 51: Modelo 3D da interface física do sistema. Fonte: Acervo Pessoal.

A Figura 54 demonstra o diagrama de blocos da aquisição de dados via serial. Neste diagrama pode-se observar o laço que determina a quantidade de medições lidas, a leitura da *string* via serial e a atualização dos dados na tela.

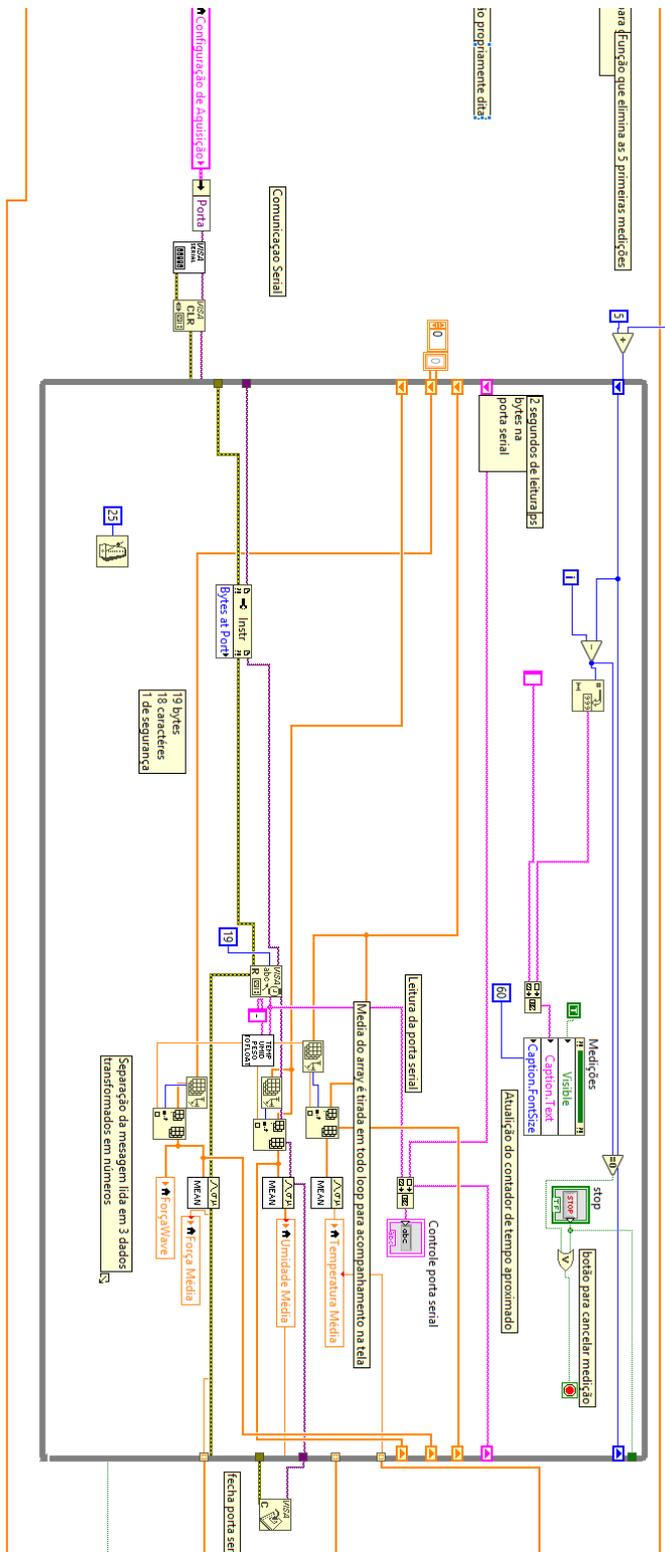


Figura 54: Medições via serial. Fonte: Acervo pessoal.

A parte de processamento de dados após a medição ter sido concluída é exibida na Figura 55. Na seção 4.3 é discutido a lógica do processamento e os dados gerados.

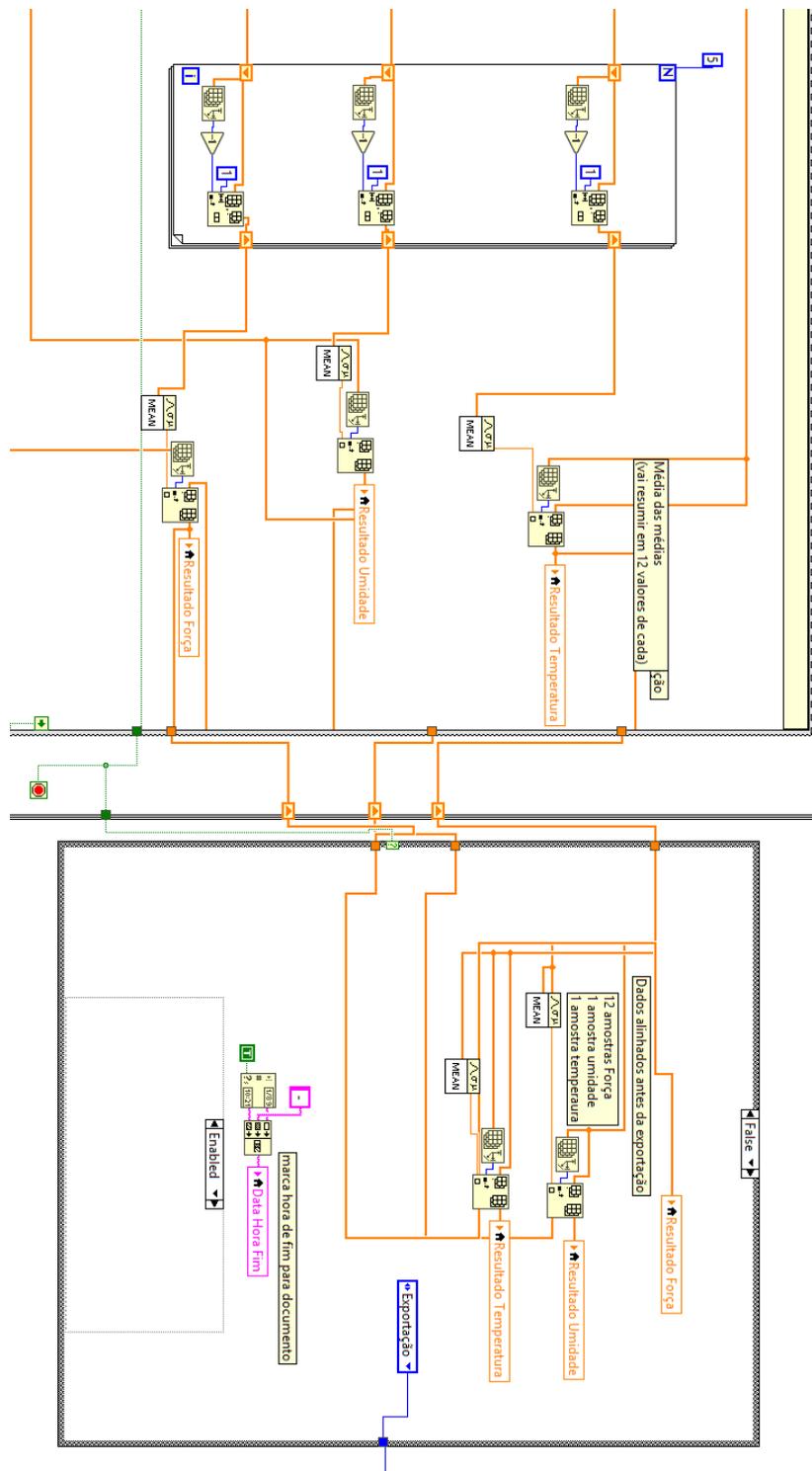


Figura 55: Processamento de dados. Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 56 ilustra a exportação de dados do programa. Pela imagem pode-se notar que os dados processados são convertidos em *strings* e dispostos em uma matriz, para então serem salvos no computador.

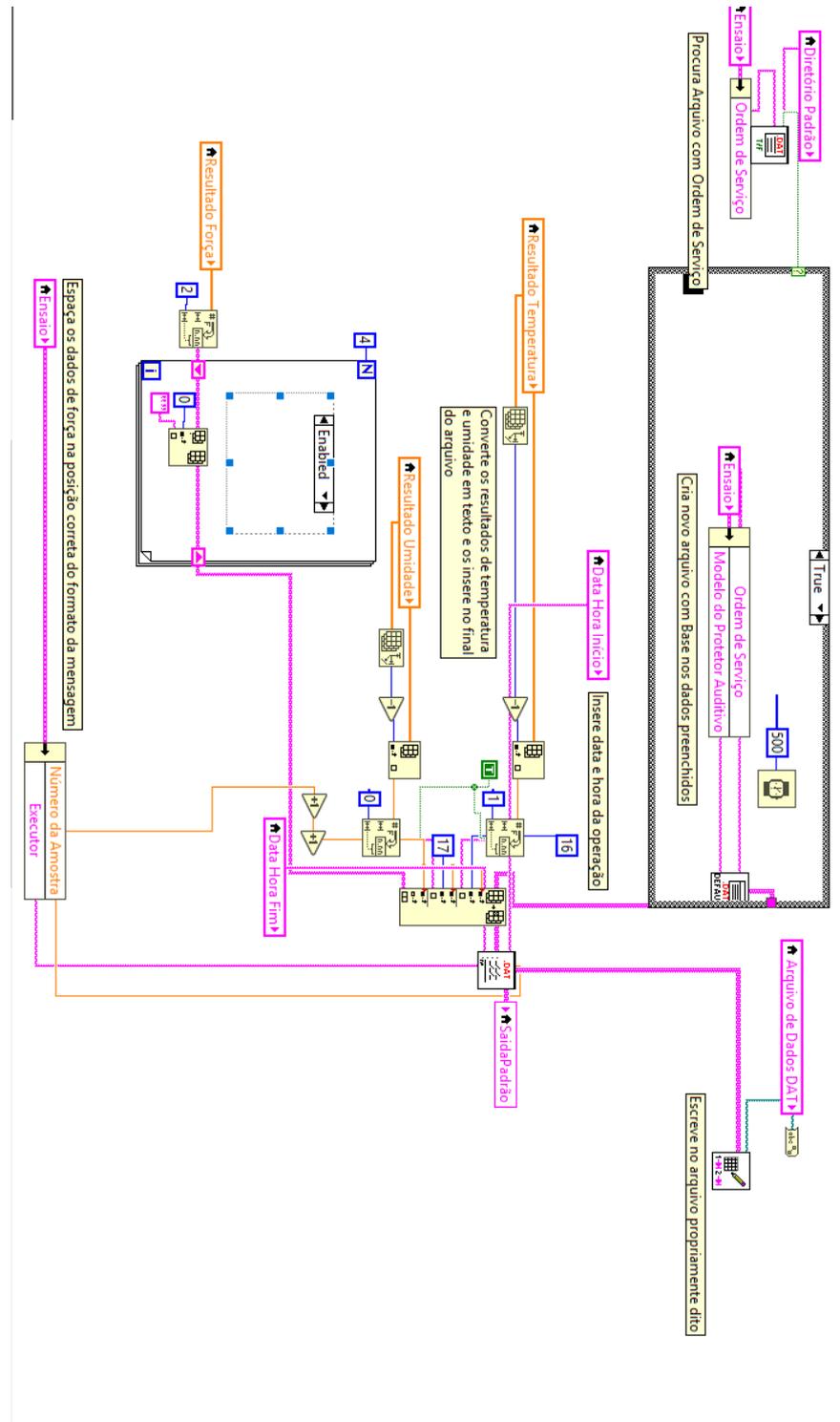


Figura 56: Exportação de dados. Fonte: Acervo pessoal.

APÊNDICE C – ARQUIVO GERADO PELO PROGRAMA DEFA

A Figura 57 ilustra o formato do arquivo gerado pelo programa.

Ordem de Serviço:	123456789	Modelo do Protetor Auditivo:	Moldex	Numero da Amostra	1	Executor	Matheus	Data e Hora Inicio	09/08/2018 - 09:16:36	Data e Hora Final	09/08/2018 - 09:19:37	1	9,42	2	9,52	3	9,55	4	9,4	5	9,49	6	9,4	7	9,52	8	9,38	9	9,4	10	9,52	11	9,49	12	9,59	Media	19,2	Unidade	30
				2	Matheus	09/07/2018 - 08:46:18	09/07/2018 - 08:47:18	9,52	9,59	9,4	9,42	9,55	9,6	9,57	9,33	9,38	9,38	9,57	9,54	9,44	9,44	9,57	9,54	9,44	9,57	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	20,7	41				
				3	Matheus	26/03/2018 - 08:37:34	26/03/2018 - 08:38:28	9,55	9,45	9,56	9,42	9,56	9,48	9,56	9,48	9,52	9,44	9,54	9,54	9,54	9,54	9,53	9,53	9,54	9,53	9,53	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	20,7	41				
				4	Felippe	22/03/2018 - 10:24:15	22/03/2018 - 10:25:09	9,69	9,5	9,54	9,54	9,56	9,48	9,57	9,54	9,34	9,34	9,58	9,61	9,44	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	26,4	45					

Figura 57: Arquivo ".dat" gerado pelo programa DEFA com os dados obtidos do ensaio.

APÊNDICE D – DIAGRAMA DE CIRCUITO

Este apêndice mostra o diagrama de circuito do sistema de medição. Como explicado na seção 4.2, o sistema é modular e na Figura 58 é possível observar as conexões entre os componentes e as entradas do Arduino.

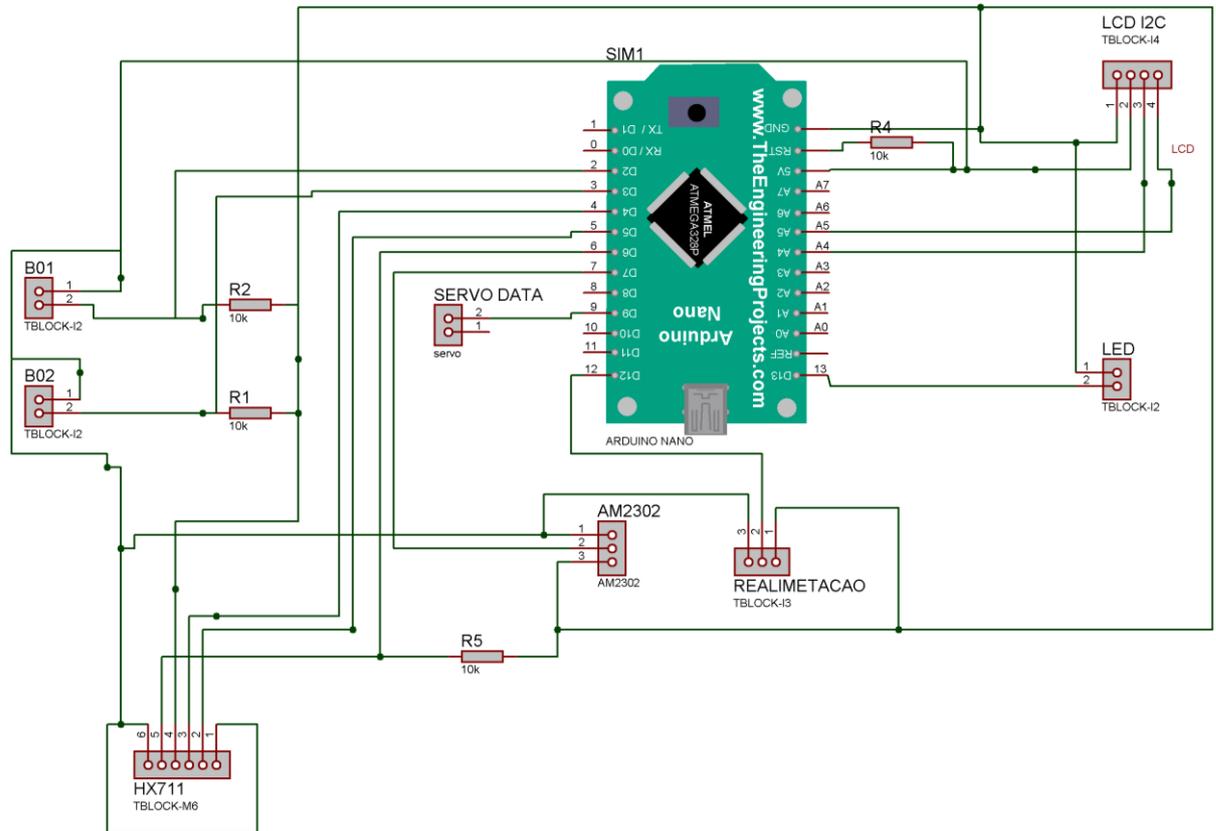


Figura 58: Diagrama de circuito do Arduino.