

**MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL DE FALHA DE CABO DE AÇO
POR EMISSÃO ACÚSTICA**

WEVERSON MACHADO DE OLIVEIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2018

MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL DE FALHA DE CABO DE AÇO POR EMISSÃO ACÚSTICA

WEVERSON MACHADO DE OLIVEIRA

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. D.Sc. Angelus Giuseppe Pereira da Silva

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

O48

Oliveira, Weverson Machado de.

Monitoração em tempo real de falha de cabo de aço por emissão acústica /
Weverson Machado de Oliveira. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

92 f. : il.

Bibliografia: 90 - 92.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2018.

Orientador: Angelus Giuseppe Pereira da Silva.

Coorientador: Jose Augusto Pedro Lima.

1. Emissão Acústica. 2. Redes Neurais. 3. Frequências Dominantes. I. Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 620.11

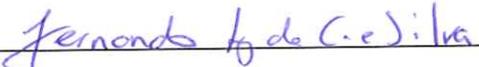
MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL DE FALHA DE CABO DE AÇO POR EMISSÃO ACÚSTICA

WEVERSON MACHADO DE OLIVEIRA

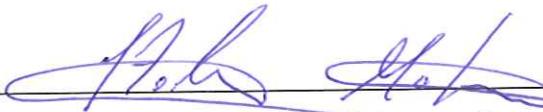
Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovada em 24 de Agosto de 2018.

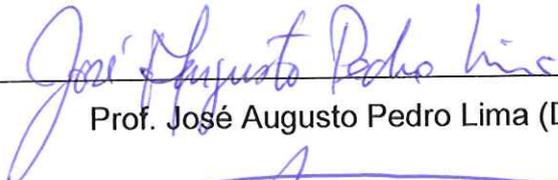
Comissão Examinadora:



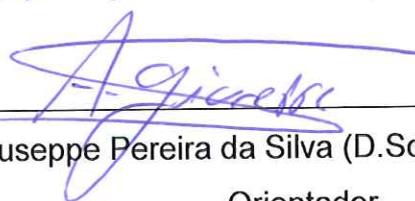
Prof. Fernando Luiz de C. e Silva (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – IFF



Prof. Ítalo de Oliveira Matias (D.Sc., Sistemas Computacionais) – UCAM



Prof. José Augusto Pedro Lima (D.Sc., Física) – UENF



Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva (D.Sc., Ciências Técnicas) – UENF
Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Hiram (*in memoriam*) e Rute, a Erika e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

“O conhecimento universal está disponível para qualquer pessoa que tenha o mínimo de afinidade espiritual e consciência para acessá-lo.”

E. Marabô

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiro lugar a Deus que me deu força e iluminou meu caminho durante esta caminhada.

Agradecimento especial a minha mãe Rute!

Ao meu pai Hiram (in memoriam), que não pode estar presente neste momento tão incrível da minha vida, mas se hoje consegui concluir a faculdade, devo tudo a ele. Seus ensinamentos e valores alimentaram minha alma e conduziram meus passos até aqui. Saudades eternas!

Agradeço a toda minha família, a Erika, aos meus irmãos, cunhados e cunhada, aos meus sobrinhos e sobrinha.

Ao meu orientador, Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva, pela amizade e confiança depositada e por todos seus ensinamentos.

Ao professor Ítalo Matias pela amizade, pelos ensinamentos e por seus conselhos e toda a disposição de ajudar.

Aos amigos e professores do Instituto Federal Fluminense.

Agradecimento especial a minha amiga Ianne Nogueira por toda sua paciência e ajuda na formatação deste trabalho.

Ao professor do IFF Fernando Carvalho, pelos conselhos e ajuda no laboratório.

A professora Márcia por todas as palavras de incentivo e por estar sempre de bem com a vida.

Ao prof. Eduardo Atem pela utilização de seu laboratório, pelo conhecimento passado em aula e também pelas dicas de melhoramento do suporte do cabo de aço.

Um agradecimento especial à professora Elaine Cristina, a professora Elaine Cristina Pereira, ao professor Luis Augusto Hernandez Terrones e ao professor Djalma Souza.

A toda banca examinadora, por aceitar o convite e todos os ensinamentos.

Agradecimento ao Professor José Augusto Pedro Lima (ZéGyver) pela amizade, pela horas e mais horas de dedicação a este trabalho, agradeço pelos risos (MP) e por tudo que o senhor tem feito! Deixo manifesto aqui minha gratidão eterna por compartilhar sua sabedoria, o seu tempo e sua experiência. E que sigam todos os projetos!

Agradeço à UENF por me proporcionar um ambiente criativo e amigável para os estudos. Sou grato a cada membro do corpo docente, à direção e a administração dessa instituição de ensino.

A todos que contribuíram para o resultado deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 – Objetivo	18
1.2 – Justificativa.....	19
1.3 – Ineditismo	19
1.4 – Organização do trabalho	19
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 – Cabos de Aço.....	21
2.1.1 – Torções	22
2.1.2 – Tipos de Alma e Construções	22
2.1.3 – Especificações	23
2.2 – Emissão Acústica (EA).....	24
2.3 – Análise de Fourier	27
2.4 – Redes Neurais.....	30
2.4.1 – História das Redes Neurais.....	31
2.4.2 – Neurônio Biológico	32
2.4.3 – Neurônio Artificial	33
2.4.4 – Função de Ativação e Função de Transferência	34
2.4.5 – Arquitetura de Rede	36
2.4.6 – Controle do Aprendizado.....	36
2.4.7 – Algoritmo de Aprendizado	37
2.5 – Linguagem de Programação Python	38
2.6 – Biblioteca PyAudio	38
2.7 – Biblioteca Numpy	38
2.8 – Biblioteca Matplotlib	39
2.9 – Biblioteca Json	39
2.10 – Piezoelectricidade	39
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 – Cabo de Aço do Experimento.....	42
3.2 – Módulo de Pré-Amplificação.....	44
3.3 – Pré-Amplificador Diferencial	45
3.4 – Captador Magnético	48
3.4.1 – Resposta do Captador Magnético	50
3.5 – Captador Piezoeletrico	51

3.6 – Ensaio Instron.....	53
3.6.1 – Ensaio Dinâmico (polia)	53
3.6.2 – Ensaio Manual (polia).....	55
3.6.3 – Ensaio Dinâmico (engate)	56
3.7 – Máquina Tracionadora.....	57
3.7.1 – Estrutura Principal	58
3.7.2 – Macaco Tracionador.....	59
3.7.3 – Motor Acionador do Macaco.....	60
3.7.3.1 – PWM (Pulse Width Modulation)	61
3.7.4 – Cabo de Acoplamento ao Macaco	62
3.7.5 – Engate Ancorador (EA)	63
3.7.6 – Suporte para o Captador Piezoelétrico	64
3.7.7 – Engate Tracionador.....	64
3.7.8 – Plataforma para Captador Magnético.....	65
3.7.9 – Emparelhador do Engate Tracionador	66
3.8 – Central de Análise	66
3.8.1 – Programa Realtime Analyser.....	68
3.8.2 – Determinação da Resposta de Frequência da Central de Análise	71
3.8.3 – Audacity	72
3.9 – Software de Processamento de Sinais.....	73
3.9.1 – sound-spectrum_wmo_captura_FFT1	73
3.9.2 – Plotagem6_wmo_selecao_VF1	77
3.9.3 – sound-spectrum_wmo_captura_Falso_FFT1	78
3.9.4 – NeuralNetwork_Treinamento1.....	79
3.9.5 – NeuralNetwork_Treinamento_full.....	81
3.9.6 – sound-spectrum_wmo_Sem_captura_FFT1	82
3.9.7 – sound-spectrum_wmo_tempo_real1	82
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	86
CAPÍTULO 6 – TRABALHOS FUTUROS.....	88
6.1 – Melhoramentos nos Softwares de Processamento de Sinal	88
6.2 - Melhoramentos no Hardware Mecânico.....	88
6.3 – Melhoramentos no Hardware Eletrônico	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cabo de aço (CableMax, 2010).	21
Figura 2.2 - (a) Torção à esquerda. (b) Torção à direita (CableMax, 2010).	22
Figura 2.3 - Cabo de aço e sua alma ou núcleo (Cabopec, 2018).	23
Figura 2.4 - Tipos de cabos de aço e cordoalhas (CableMax, 2010).	24
Figura 2.5 - Características de um sinal de emissão acústica (Soares e Moura, 2007).	25
Figura 2.6 - Parâmetros para caracterização dos sinais (Bandeira <i>et al.</i> , 2010).	26
Figura 2.7 - O espectro e as formas de onda (Lazzarini, 1998 apud Fuzati Violinos, 2018).	28
Figura 2.8 - TF de um pulso triangular (Turmero, 2018).	29
Figura 2.9 - Análise de Fourier (The SciDAVis Handbook, 2018).	30
Figura 2.10 - Rede Neural Multicamada (Haykin, 2001).	31
Figura 2.11 - Neurônio Biológico (Haykin, 2001).	33
Figura 2.12 - Representação de um Neurônio Artificial (Haykin, 2001).	34
Figura 2.13 - Funções de transferência (Kovács, 1996).	35
Figura 2.14 - Problema não linearmente separável (DevMedia, 2013).	37
Figura 2.15 - a) Efeito piezelétrico direto, b) Efeito piezelétrico inverso (Falconi, 2010).	40
Figura 2.16 - Representação das cargas elétricas aprisionadas nos polímeros celulares após carregamento elétrico e deformação das cavidades pela aplicação de uma pressão externa - nesse caso, o som (Assagra, 2015).	41
Figura 3.1 - Cabo de aço do experimento e suas pernas.	43
Figura 3.2 - Arames da perna do cabo de aço.	43
Figura 3.3 - Rolo de cabo de aço utilizado nos experimentos.	44
Figura 3.4 - Módulo de pré-amplificação.	44
Figura 3.5 - Esquema elétrico do pré-amplificador diferencial.	45
Figura 3.6 - Componentes do pré-amplificador em uma placa de circuito impresso universal.	46
Figura 3.7 - Circuito para o captador piezoeletrico.	47
Figura 3.8 - Medição da força eletromotriz pelo multímetro.	48
Figura 3.9 – Configuração básica de um captador magnético.	48
Figura 3.10 - Captador Hambucker.	50

Figura 3.11 - Resposta no domínio da frequência do estímulo impulsivo.	50
Figura 3.12 - Resposta no domínio do tempo resultante do estímulo impulsivo.	51
Figura 3.13 - Piezoelétrico.....	51
Figura 3.14 - Resposta no domínio da frequência do estímulo impulsivo.	52
Figura 3.15 – Resposta no domínio do tempo do estímulo impulsivo.	52
Figura 3.16 - Roldana soldada a um grampo para fixação do cabo de aço.	53
Figura 3.17 - Ensaio do cabo de aço feito em uma máquina INSTRON mostrando o cabo preso (imagem esquerda) e seu rompimento (imagem direita).	54
Figura 3.18 - Resultado do ensaio.	54
Figura 3.19 - Resultado da tração versus deslocamento captado pelo programa Real Time Analyser.	55
Figura 3.20 - Resultado da frequência versus tração captada pelo programa Real Time Analyser.	56
Figura 3.21 - Resultado da tração versus deslocamento captado pelo programa Real Time Analyser.	57
Figura 3.22 - Máquina Tracionadora – Estrutura principal.	59
Figura 3.23 - Macaco automotivo.	60
Figura 3.24 - Motor com sua caixa de redução.	60
Figura 3.25 - PWM, fontes e chave de comutação.....	61
Figura 3.26 - Circuito liga-desliga.	61
Figura 3.27 - Largura de pulso.	62
Figura 3.28 - Cabo de acoplamento.	63
Figura 3.29 - Engate ancorador.....	63
Figura 3.30 - Suporte para o captador piezoelétrico.	64
Figura 3.31 - Engate tracionador.....	65
Figura 3.32 - Plataforma para captador magnético.	65
Figura 3.33 - Emparelhador do engate tracionador.....	66
Figura 3.34 - Central de análise.	67
Figura 3.35 - Misturador modelo MXS 8S da WATTSOM.	67
Figura 3.36 - Tela do módulo FFT no Modo power spectrum.....	68
Figura 3.37 - Tela do módulo FFT no Modo espectrograma.	69
Figura 3.38 - Módulo do power spectrum.....	69
Figura 3.39 - Limite de banda útil do sistema.....	72
Figura 3.40 - Tela do programa Audacity.	72

Figura 3.41 - Inicialização da stream de audio.....	74
Figura 3.42 - Listagem dos dispositivos de entrada e saída do computador.....	75
Figura 3.43 - Geração da FFT dos canais esquerdo e direito.	75
Figura 3.44 - Tela de captura dos sinais de entrada (sound-spectrum_wmo_captura_FFT1).	76
Figura 3.45 - Trecho do código utilizando para armazenar as FFT em arquivos para posterior processamento pela rede neural.	76
Figura 3.46 - Diretório de armazenamento das amostras da FFT capturadas em tempo real.	77
Figura 3.47 - Tela de seleção dos sinais de entrada.....	78
Figura 3.48 - Arquivos original ilustrando algumas amostras de negativo e um positivo.	79
Figura 3.49 - Arquivos com sinais somente negativos.	79
Figura 3.50 - Treinamento de uma rede neural (NeuralNetwork_Treinamento1).....	80
Figura 3.51 - Arquivo de entrada da RN.....	80
Figura 3.52 - Sistema de arquivos utilizando pelo NeuralNetwork_Treinamento_full.	81
Figura 3.53 - Em (A) o conteúdo do diretório true e em (B) do false.	82
Figura 4.1 - Sinalização.....	83
Figura 4.2 - Cabo inspecionado.	84
Figura 4.3 - Extremidade.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de Materiais.	47
Tabela 2 - Parâmetros do Analisador FFT.	70
Tabela 3 - Parâmetros do Osciloscópio.	71
Tabela 4 – Exemplos de ensaios.	85

LISTA DE ABREVIATURAS

AA – Alma Aço

AACI – Alma Aço de Cabo Independente

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AF – Alma de Fibra

CA – Central de Análise

CAM – Cabo de acoplamento ao Macaco

CC – Célula de Carga

EA – Emissão Acústica

EAN – Engate de Ancoragem

EET – Emparelhador do Engate Tracionador

END – Ensaio Não Destrutivo

ETR – Engate Tracionador

FFT – Fast Fourier Transform

FT – Fourier Transform

ISSO – International Organization for Standardization

JSON - JavaScript Object Notation

MAM – Motor Acionador do Macaco

MT – Máquina de Tensionamento

MTR – Macaco Tracionador

PCM – Plataforma para Captador Magnético

RN - Rede Neurais

RNA – Rede Neurais Artificiais

SCP – Suporte do Captador Piezoelétrico

SPR – Sinal de pré-ruptura

SO – Sistema Operacional

TF – Transformada de Fourier

Resumo da tese apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL DE FALHA DE CABO DE AÇO POR EMISSÃO ACÚSTICA

Weverson Machado de Oliveira

24 de Agosto de 2018

Orientador: Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um aparato capaz de tensionar um cabo de aço, captar e processar suas emissões acústicas, gerando assim, amostras para o treinamento de uma rede neural. Esta rede neural identifica e sinaliza, em tempo real, a ruptura de arames no cabo de aço. Todo este aparato é composto por três partes distintas: a Máquina de Tracionamento, uma central de análise e o Software de Reconhecimento. A Máquina de Tracionamento efetua o tensionamento dos cabos de aço até que ocorra alguma ruptura em seus arames; a central de análise recebe e processa os sinais acústicos detectados pelos captadores; o Software de Reconhecimento faz a análise em tempo real das rupturas. Após vários treinamentos das redes neurais pode se concluir que a eficiência do sistema mostrou-se dependente da qualidade das amostras positivas e negativas. Também ficou evidenciado um fenômeno, que antes do rompimento do cabo são geradas duas frequências dominantes em torno de 4kHz e 8kHz.

Palavras-chave: Emissão Acústica, Redes Neurais, Frequências Dominantes

Abstract of thesis presented to CCT-UENF as a part of the requirements for the degree of Doctor of Science in Engineering and Materials Science.

MONITORING IN REAL TIME OF STEEL CABLE FAILURE BY ACOUSTIC EMISSION

Weverson Machado de Oliveira

August 24, 2018

Advisor: Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva

This work presents the development of an apparatus capable to tension a steel cable, capturing and processing its acoustic emissions, thus generating samples for the training of a neural network. This neural network identifies and signals, in real time, the breaking of wires in the steel cable. This whole apparatus is composed of three distinct parts: the Tension Machine, an analysis center and the Recognition Software. The Traction Machine tensions the steel cables until there is a break in their wires; the analysis center receives and processes the acoustic signals detected by the sensors; the Recognition Software performs the real-time analysis of the ruptures. After several training of the neural networks it can be concluded that the efficiency of the system was dependent on the quality of the positive and negative samples. It was also evidenced a phenomenon, that before the cable breakdown two dominant frequencies were generated around 4kHz and 8kHz.

Key words: Acoustic Emission, Neural Networks, Dominant Frequencies

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Cabos de aço são largamente aplicados em tarefas tais como movimentação (horizontal e vertical) de cargas, amarração, sustentação e ancoragem. Os cabos são construídos com grande variedade de configurações para atender às diferentes aplicações. Quando em serviço, operam em diversos ambientes e estão sujeitos a vários mecanismos de degradação.

Os cabos estão sujeitos à falha em decorrência de corrosão, excesso de carga, lubrificação deficiente, presença de esforços mecânicos de tipo e intensidade além daquelas especificadas, entre outras causas. Alguns desses mecanismos degradam o cabo gradualmente, fazendo com que a resistência mecânica efetiva seja reduzida, sem que seja perceptivo por quem gerencia seu uso.

A corrosão atinge alguns arames mais do que a outros; o atrito entre os arames é maior entre alguns arames do que em outros. Ambos os mecanismos causam perda de espessura dos arames cumulativamente. Isso pode provocar a ruptura apenas dos arames mais comprometidos, levando ao sobre carregamento dos arames restantes. Inspeções periódicas são necessárias para averiguar a integridade dos cabos e promover as necessárias e eventuais medidas corretivas, porém isto não impede que falhas ocorram nos intervalos entre as inspeções.

As inspeções mais comuns feitas em cabos de aço são as inspeções visuais e as inspeções por meio de corrente induzida. As de primeiro tipo são capazes de detectar rupturas aparentes de pernas e arames na parte exterior do cabo, além da necessidade de interceder na lubrificação do cabo. São capazes ainda de apontar torções do cabo ou dobraduras que podem alterar sua resistência nominal. Porém, não conseguem detectar rupturas de pernas e arames internos. A inspeção eletromagnética é capaz de apontar a existência de arames rompidos e sua localização. Essas técnicas são complementares e podem garantir a integridade dos cabos em um futuro próximo, a partir da data de cada inspeção, mas são incapazes de apontar a integridade durante o serviço.

Os danos causados por falha de cabo de aço dependem de sua aplicação, mas podem ser enormes e envolver tanto perdas materiais, quanto humanas. O mo-

nitoramento em tempo real da integridade de cabos de aço pode se justificar por isso.

Alguns mecanismos de falhas de materiais geram alguma emissão acústica que podem ser utilizadas para sua detecção. Auscultando continuamente um cabo de aço, poder-se-ia, por exemplo, detectar a ruptura de arames individuais ou de conjuntos de arames de um cabo de aço. Um alerta do evento poderia ser emitido para que as devidas medidas fossem adotadas a fim de evitar uma falha mais grave.

Este trabalho se propõe a desenvolver um sistema que ausculte em tempo real as emissões acústicas que se propaguem ao longo de um cabo de aço, analise-as e reconheça aquelas que sejam características de rupturas de arames. O sistema envolve o desenvolvimento não apenas do hardware que capture os sinais acústicos e os registre e processe, mas também o software que os analise e reconheça, além de controlar os diversos componentes de hardware. O objetivo é que o sistema consiga emitir alertas sempre que uma ruptura de cabo seja detectada, permitindo que as necessárias medidas sejam tomadas para evitar a ruptura completa do cabo.

1.1 – Objetivo

O objetivo principal é desenvolver uma técnica de monitoração realtime de cabos de aço, baseada em emissão acústica, capaz de detectar em tempo real a ruptura de arames individuais e de alertar o operador destes acontecimentos.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver aparato experimental para romper cabos de aço de modo controlado a fim de gerar emissões acústicas provocadas por rupturas.
- Registrar as emissões acústicas geradas pelas rupturas de arames de cabos de aço.
- Processar as emissões acústicas capturadas por meio de filtros e amplificadores e convertê-las para que elas possam ser adequadas ao formato para comparação de reconhecimento.
- Apresentar as emissões acústicas no domínio da frequência (FFT).
- Desenvolver uma rede neural, treiná-la para reconhecer emissões acústicas de ruptura de arames em cabos de aço e testá-la.

- Integrar todas as partes do projeto em um conjunto capaz de registrar emissões acústicas em um cabo tensionado, processar os sinais e reconhecer em tempo real a ruptura de seus arames.

1.2 – Justificativa

A ruptura de cabos de aço durante operações de carga pode ter como consequência prejuízo material, representado pelo dano causado à carga movimentada e outros materiais atingidos, interrupção do fluxo de trabalho, danos ambientais, dependendo da natureza da carga movimentada, e risco à força de trabalho. A falha em cabos de aço pode ocorrer com a ruptura sucessiva de arames individuais e escapar de inspeções regulares, sejam elas visuais ou eletromagnéticas. A existência de uma técnica de monitoração em tempo real é desejável, pois esta detecta a ocorrência de falha da integridade do cabo à medida que ocorrem, entre as inspeções regulares, permitindo que se intervenha para assegurar a segurança da operação quando for realmente necessário.

1.3 – Ineditismo

O ineditismo do projeto reside em explorar um aparente nicho na técnica de emissão acústica. Em que pese a complexidade do reconhecimento de emissões geradas por defeitos estruturais, a ruptura de arames em cabos de aço apresenta características que podem facilitar a aplicação da técnica. Quais sejam: emissão intensa de sinal (ruptura) e uso de cabo como guia de onda, o que impede a perda de sinal por espalhamento volumétrico ou superficial da emissão. O trabalho se propõe a desenvolver tecnologia para detecção, processamento e reconhecimento de sinal de ruptura de arames de cabos de aço em tempo real com uso de componentes de desenvolvimento próprio.

1.4 – Organização do trabalho

Além desta Introdução, esse trabalho se divide nos seguintes capítulos:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Este capítulo descreve o embasamento teórico dos assuntos principais deste trabalho que são os cabos de aço, as Emissões Acústicas, as Redes Neurais e a Transformada de Fourier.

Capítulo 3 – Metodologia: Este capítulo apresenta as ferramentas e tecnologias utilizadas no desenvolvimento deste projeto. São descritas as etapas de construção da Máquina de Tractionamento, da Central de Análise e a confecção do Software de Processamento.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: Este capítulo apresenta como foram realizados os ensaios assim como as inspeções dos cabos de aço; também mostra que, antes da ruptura de alguma perna do cabo de aço, sinais característicos são gerados.

Capítulo 5 e 6 – Conclusão e Melhoramentos Futuros: Estes capítulos apresentam a conclusão do projeto e propostas para melhoramentos futuros tanto do hardware como do software.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Cabos de Aço

O cabo de aço, como o conhecemos hoje, foi inventado pelo alemão Wilhelm August Julius Albert em 1834, tendo, portanto mais de 180 anos. Ele teve seu “boom” de aplicação durante as guerras mundiais, quando eram utilizados para prender as minas e bombas aquáticas no fundo do mar. Foram utilizados mais de 28 mil quilômetros de cabos de aço para este fim.

O cabo de aço é um “tipo de corda” constituída por dois ou mais arames de aço enrolados lado a lado e ligados, ou torcidos e entrelaçados formando um único conjunto (Figura 2.1). Nos dias de hoje, o aço é o material utilizado na fabricação deste produto, mas no início de sua fabricação o ferro forjado era utilizado.

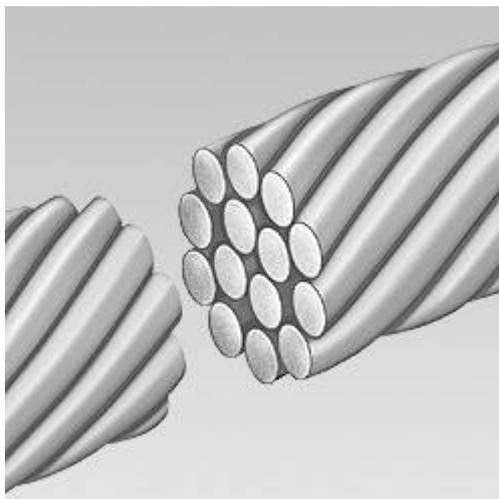


Figura 2.1 - Cabo de aço (CableMax, 2010).

Historicamente, o cabo de aço evoluiu das correntes de aço. Uma de suas primeiras aplicações foi na substituição das correntes das minas de carvão. O aumento de profundidade das minas acarretava no aumento do comprimento das correntes. O peso das mesmas tornava-se tão grande que seu uso era impraticável. Teve então Wilhelm Albert a ideia de trançar arames. Isso, resultou em menos peso e com alta resistência.

A flexibilidade e a alta resistência atribuída aos cabos de aço fazem com que se tornem parte essencial da funcionalidade de guindastes, elevadores, gruas e etc.

2.1.1 – Torções

A torção do cabo de aço é o modo de dizer em que sentido os arames foram torcidos durante sua fabricação: Esquerda (Figura 2.2– (a)) ou direita (Figura 2.2– (b)).



Figura 2.2 - (a) Torção à esquerda. (b) Torção à direita (CableMax, 2010).

Além do sentido em que o cabo foi torcido, a torção pode ser regular ou lang. No caso de torção regular os arames que formam as pernas são torcidos em sentido oposto à torção das pernas. Este tipo de torção torna o cabo de aço mais manuseável e com boa resistência ao desgaste pela fricção das pernas internas. No cabo de aço de torção lang, os arames que formam as pernas são torcidos no mesmo sentido da torção das pernas. Este tipo de torção torna o cabo de aço mais flexível e resistente à abrasão. Porém, os cabos de aço de torção lang estão mais sujeitos a amassamentos e deformações.

2.1.2 – Tipos de Alma e Construções

O cabo de aço é formado por fios de aço, obtidos por um processo de conformação, chamado de trefilação. Um conjunto desses fios forma uma perna. Essa é apenas uma parte do cabo, pois o conjunto de pernas é novamente trançado em volta de uma alma, formando então o cabo final (Figura 2.3). A alma do cabo tem a finalidade de permitir maior flexibilidade ao cabo, além de reter o lubrificante; ao ser traçado, o cabo aperta esse miolo que atua como um coxim.

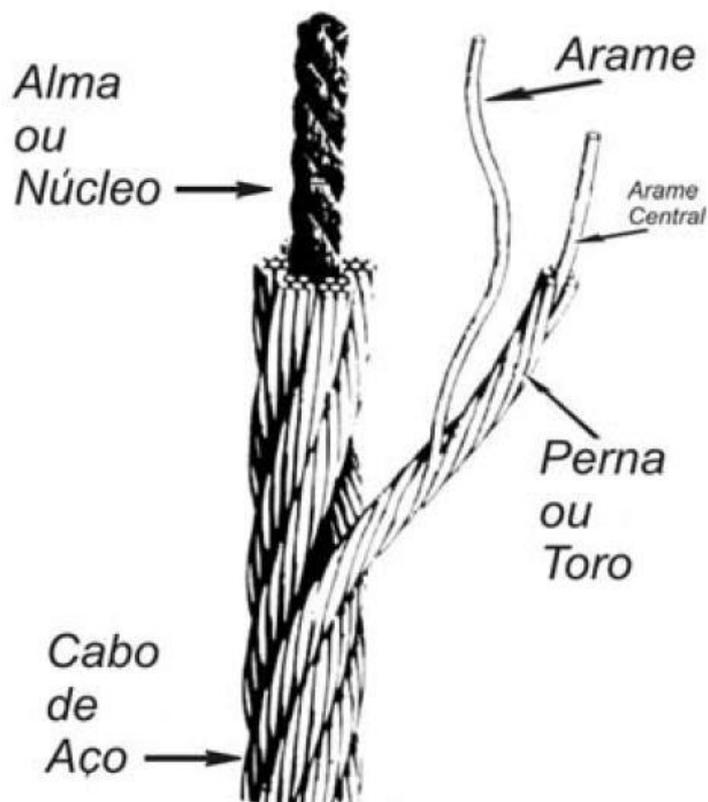


Figura 2.3 - Cabo de aço e sua alma ou núcleo (Cabopec, 2018).

Esta alma pode ser de fibra natural, tais como sisal, rami, cânhamo ou juta, chamada de AF ou de fibra sintética, geralmente de polipropileno, chamada AFA. A alma pode ser ainda de aço e denominada AA se for constituída de uma perna, ou AACI se a alma for constituída de outro cabo independente. Esta última é a variação mais utilizada, pois combina as características de flexibilidade e resistência à tração.

2.1.3 – Especificações

No mercado, oito tipos de construções das pernas de um cabo de aço, além de cordoalhas, podem ser encontrados. São elas: 6x7, 6x19, 6x25, 6x36, 6x37, 6x41, 8x19 e 19x7 (Figura 2.4).

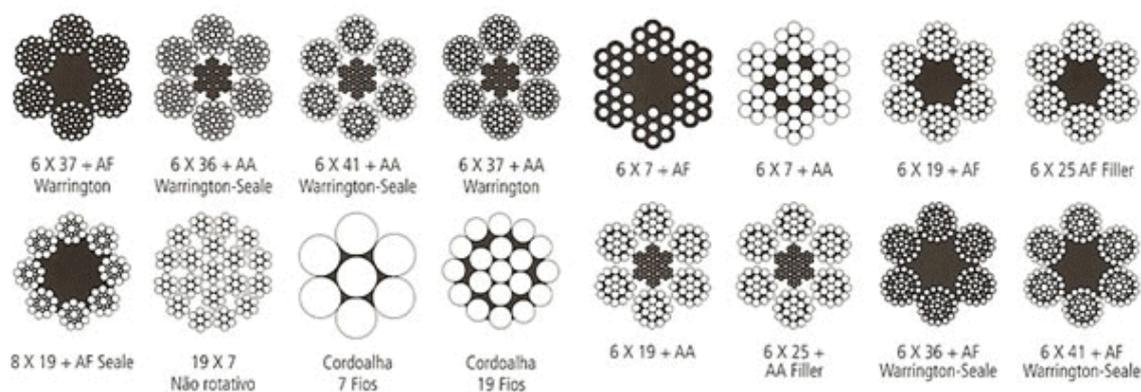


Figura 2.4 - Tipos de cabos de aço e cordoalhas (CableMax, 2010).

O primeiro número indica a quantidade de pernas, o segundo a quantidade de arames em cada perna e o último, expresso em letras, o tipo do cabo ou alma.

2.2 – Emissão Acústica (EA)

Segundo Ravindra *et al.* (1997) apud Weingaertner *et al.* (2011), “a emissão acústica pode ser definida como a propagação de uma onda elástica transiente, gerada por uma rápida liberação de energia de uma fonte (ou fontes) localizada em um material submetido a um estado de tensão”. De acordo com os autores, essa liberação de energia está relacionada à repentina distribuição de tensões internas dos materiais, que são essas fontes de energia. Como consequência, uma onda de tensão é propagada pelo material (Weingaertner *et al.*, 2011).

Esta é uma das definições mais completas encontradas na literatura. Outros autores também definiram o que seria este fenômeno, mas apesar da aparente diferença, muitos seguiram o mesmo caminho. Uma ressalva a respeito desta definição é o fato de que quando um determinado material é submetido a uma tensão, ele pode dar origem à propagação de sinal. Mas para que a medida de EA possa ser feita de forma contínua, este estado de tensão deve ser variável ao longo do período.

Fontes de emissão acústica incluem os mecanismos de deformação e fratura, tais como: crescimento de trincas, movimento de discordâncias, maclação, deslocamento de contornos de grão, fratura e de coesão de inclusões (Miller e McIntire, 1987).

Em contraste com a maioria dos métodos complementares de ensaios não destrutivos, os sinais detectados de emissão acústica são gerados pelo objeto em teste, mediante a aplicação de um estímulo, sendo assim possível a detecção da

dinâmica do processo de degradação da integridade estrutural (Miller e McIntire, 1987).

A emissão acústica permite a detecção e localização de descontinuidades ativas no material, ou seja, as descontinuidades que submetidas às condições normais de operação promovem a degradação localizada da estrutura do material e o crescimento das mesmas até a falha do equipamento.

As principais fontes de sinais de EA estão associadas à fratura dos grãos, fratura do elemento ligante dos grãos, trinca nos grãos, impacto elástico sobre a peça, remoção de cavaco, quebra de cavaco, rachaduras e indução térmica de mudanças estruturais (Karpuschewiski, 2001 apud Schühli, 2007).

Uma região do material que contenha uma descontinuidade pode ser vista como uma área de concentração de tensões. Quando o nível de tensão concentrada na ponta desta descontinuidade atinge um valor de tensão igual ou superior à tensão de escoamento do material, ocorre a liberação de ondas elásticas transientes (sons de alta frequência) que se propagam em forma de energia ou emissões acústicas. O fenômeno da EA ocorre quando uma descontinuidade no material é submetida a uma solicitação mecânica ou térmica.

O princípio da técnica de EA está no fato de que o crescimento de descontinuidades, causadas por um campo localizado de tensões, libera ondas elásticas transientes, de natureza mecânica, que viajam pelo material e são captadas pelos sensores (transdutores), que transformam esta oscilação mecânica em um sinal elétrico, que é amplificado e parametrizado pelo sistema de EA (Soares e Moura, 2007). A Figura 2.5 ilustra o princípio de funcionamento da técnica.

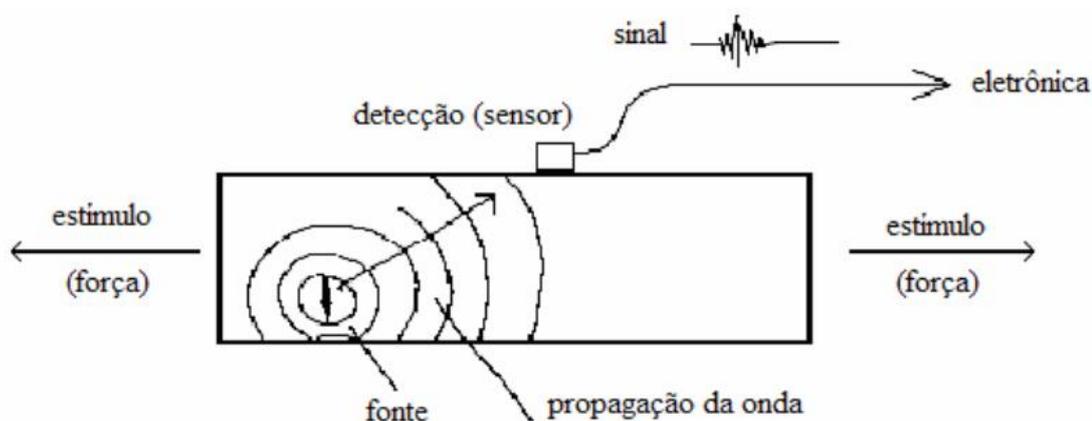


Figura 2.5 - Características de um sinal de emissão acústica (Soares e Moura, 2007).

Os sensores utilizados industrialmente para a detecção de sinais de emissão acústica são do tipo piezoelétricos. Os sensores piezoelétricos são mais utilizados por apresentarem frequência de ressonância e banda larga em frequência. O fenômeno da piezoelectricidade, que confere o nome ao tipo de sensor, permite a geração de polarização elétrica, resultante de uma solicitação mecânica ocorrida no material e o efeito reverso (Krautkrämer e Krautkrämer, 1977).

Os sensores piezoelétricos transformam os sinais transientes em sinais elétricos, que são transmitidos através de cabos até uma unidade de processamento de sinais. Nesta unidade de processamento o sinal é digitalizado e caracterizado.

Os principais parâmetros para caracterização destes sinais são (Figura 2.6):

- **Amplitude máxima:** É o pico de tensão do sinal, expresso em decibéis (dB), referente a $1\mu\text{V}$;
- **Número de contagens:** É o número de vezes que a amplitude do sinal excede um limite de referência adotado;
- **Energia:** área medida sob um envelope do sinal retificado, em coordenadas de amplitude x tempo. Este parâmetro, da forma como é obtido, é adimensional;
- **Duração:** Intervalo de tempo entre a primeira e a última vez que o sinal cruza o limite de referência;
- **Frequência média:** Relação entre o número de contagem e duração;
- **Tempo de subida:** intervalo de tempo entre a primeira vez que o sinal cruza o limite de referência e o momento em que ocorre o pico de contagem.

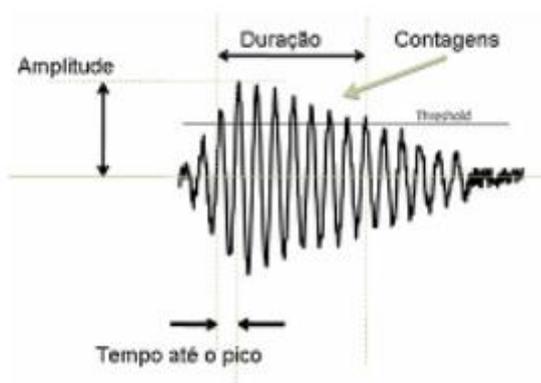


Figura 2.6 - Parâmetros para caracterização dos sinais (Bandeira *et al.*, 2010).

Como as outras técnicas de inspeção preditiva, o custo que se pode evitar pela falha de um equipamento é difícil de mensurar, pois envolve reparos, trocas de equipamentos, novas instalações além de prejuízo por tempo de interrupção, etc.

Devido às características particulares das técnicas de EA, alguns benefícios podem ser citados, como:

- Rapidez no diagnóstico;
- Redução dos custos e dos tempos de paradas para inspeções;
- A detecção e análise de defeitos são feitas em tempo real
- Ensaios realizados de forma simples.

2.3 – Análise de Fourier

Quando a abordagem de qualquer problema envolve a análise de sinais, certamente irá requerer o uso de uma ferramenta matemática de grande valia, a Análise de Fourier. Basicamente, o teorema de Fourier ou representação por meio de série trigonométrica de Fourier estabelece que uma dada função temporal genérica $f(t)$, pode ser decomposta ou representada pela soma de várias funções seno e cosseno. Matematicamente significa que uma dada função no tempo pode ser descrita por sua série de Fourier como segue:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sen n\omega t). \quad (2.1)$$

Assim a função $f(t)$ passa a ser representada no domínio da frequência, onde A_0 representa a amplitude do termo de frequência $\omega = 0$, ou seja, é um termo constante ou dito componente “DC”. A_n e B_n são as amplitudes dos componentes cossenoidais e senoidais respectivamente e a “n” só pode ser atribuído números inteiros. Significa dizer que na função $f(t)$, que representa um dado sinal, só estarão presentes os múltiplos inteiros de uma frequência fundamental que é indexada por $n = 1$. Às frequências múltiplas dessa frequência fundamental se dá o nome de harmônicas. A Figura 2.7 mostra um exemplo clássico da representação de um sinal ou função periódica denominada dente de serra.

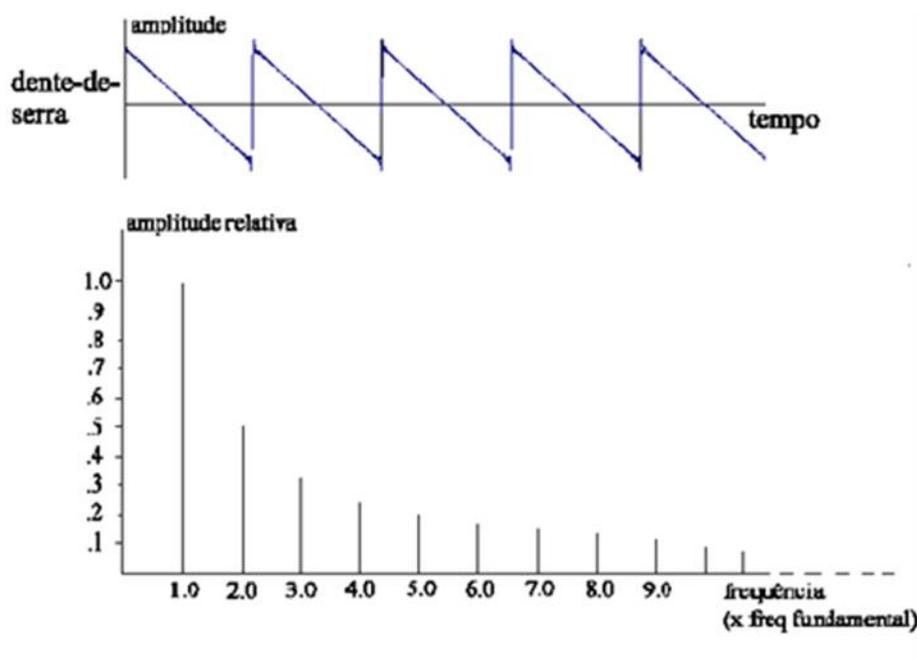


Figura 2.7 - O espectro e as formas de onda (Lazarini, 1998 apud Fuzati Violinos, 2018).

É importante observar que esse tipo de análise só é aplicável quando a função $f(t)$ é periódica, e que dependendo do tipo de função e sob determinadas condições, o coeficiente A_n ou B_n pode ser igual a zero, e que n pode assumir apenas determinados valores inteiros. Desta feita, a função temporal dente de serra pode ser representada por um gráfico de amplitude versus frequência que é denominado espectro de frequências. Nele as amplitudes que correspondem aos valores de A_n para $n = 1, 2, 3, \dots$, são representadas por linhas verticais presentes exclusivamente nos valores de frequência que são múltiplos inteiros da frequência fundamental. Esse tipo de espectro, caracterizado por linhas verticais apenas em frequências específicas, denomina-se espectro discreto (Lathi, 1968).

Como foi relatado anteriormente, embora a expansão em séries de Fourier seja uma ferramenta útil na análise de sinais, possui limitações. A Transformada de Fourier (FT) surgiu a partir da série de Fourier para um caso limite. Ela possui a capacidade de analisar matematicamente um sinal estacionário ou dinâmico, periódico ou não no domínio do tempo e representá-lo através do seu espectro de frequências. Portanto, com a aplicação da FT, é possível obter o espectro de frequências de sinais tipo pulso, ou seja, um sinal de natureza tipicamente transitória e não periódica. A principal diferença agora consiste em que a TF de tais sinais resulta em funções contínuas no domínio da frequência e, portanto as componentes de frequên-

cias ocupam faixas ou regiões contínuas do espectro. Um exemplo da TF de um pulso triangular pode ser visto na Figura 2.8.

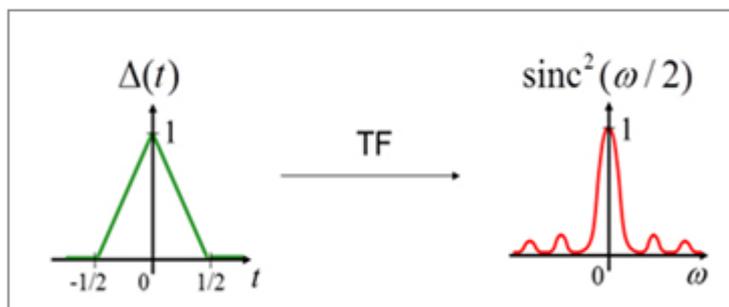


Figura 2.8 - TF de um pulso triangular (Turmero, 2018).

Para aplicações computacionais utiliza-se a transformada rápida de Fourier (FFT) que é um algoritmo que calcula o espectro de frequências dos dados obtidos a partir de um sinal ou uma forma de onda no tempo. As séries temporais e a análise espectral por FFT são as técnicas de processamento de sinais mais comumente usadas na detecção de falhas transitórias de materiais. Contudo, as limitações estão na produção de boas soluções no domínio da frequência e fracas soluções no domínio do tempo devido à perda de algumas informações do sinal na transição tempo-frequência. Por isso, são usadas no processamento de sinais aleatórios estáveis (Li, 1998).

A Figura 2.9 ilustra no gráfico inferior o sinal original no domínio do tempo e no gráfico superior o espectro de frequências deste sinal, demonstrando que o sinal original é a combinação de algumas frequências bem definidas, mas não necessariamente harmônicas. O nome harmônicas só se aplica para relações de frequências que são múltiplas inteiras entre si. Quando se quer dizer que o espectro de um determinado sinal tem muitas componentes de frequência não se deve empregar o termo “muitas harmônicas”. O termo correto a ser utilizado é “muitas parciais”. Apenas as parciais que possuírem relações múltiplas inteiras entre si podem ser chamados de harmônicas.

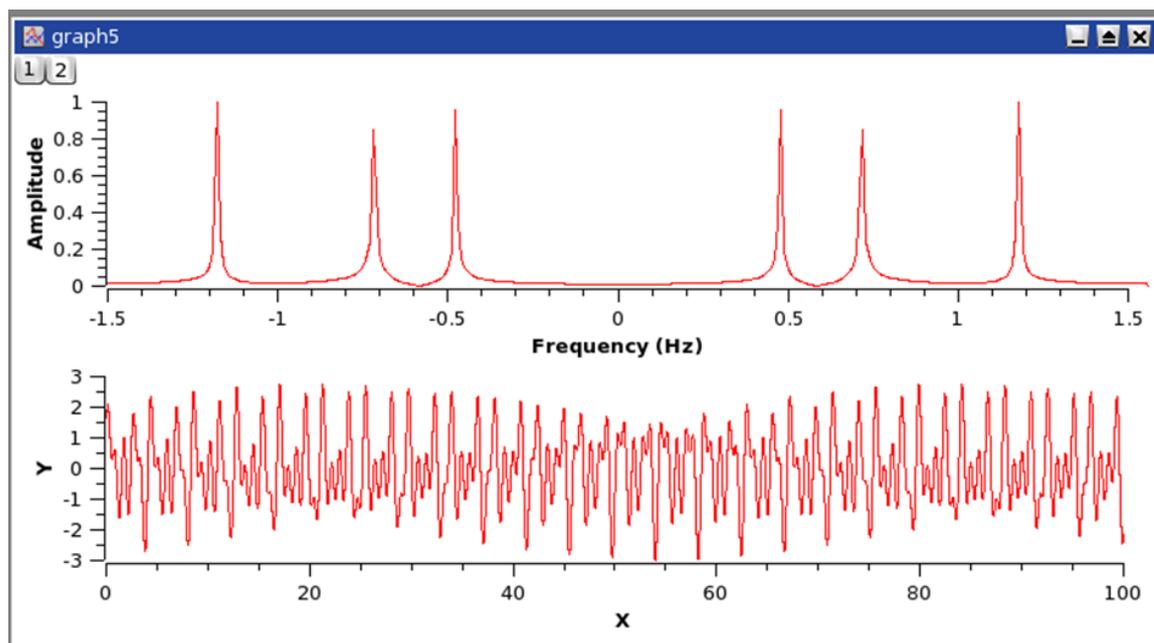


Figura 2.9 - Análise de Fourier (The SciDAVis Handbook, 2018).

2.4 – Redes Neurais

Redes Neurais Artificiais (RNA) são modelos computacionais baseados no sistema nervoso dos seres vivos que tentam emular sua forma inteligente de processar informações. Na área da informática as RNAs são, provavelmente, a mais antiga técnica de Inteligência Artificial em uso. Esta técnica pode ser definida como a interligação de unidades de processamento, denominados neurônios artificiais, que podem conter um grande número de interconexões denominadas sinapses artificiais. A Figura 2.10 exibe um esquema de uma rede neural multicamada em que são exibidas as camadas de entrada, as camadas intermediárias, ou ocultas, e as camadas de saída. Também mostra as interligações entre elas.

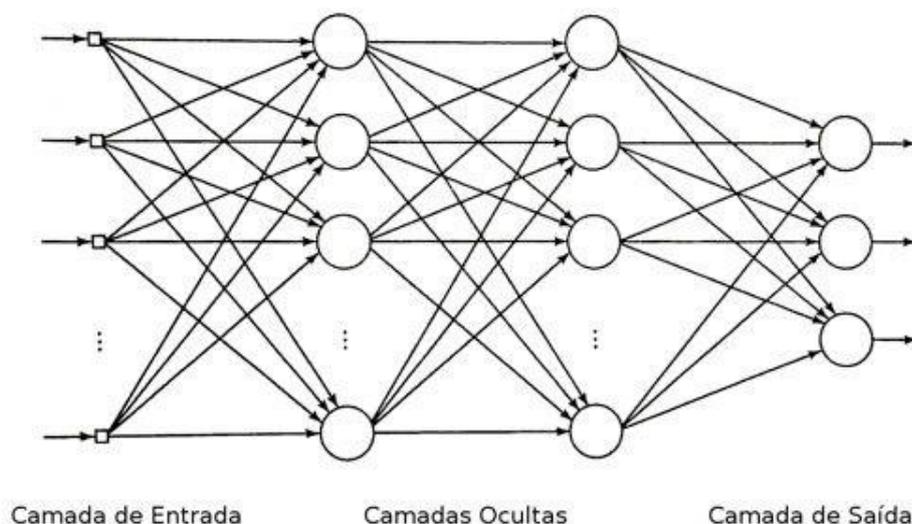


Figura 2.10 - Rede Neural Multicamada (Haykin, 2001).

Redes Neurais Artificiais realizam o paradigma subsimbólico de representação e processamento de informação (Kasabov, 1996). A área científica que lida com métodos e sistemas para processamento de informações utilizando redes neurais é chamada neurocomputação.

2.4.1 – História das Redes Neurais

A primeira publicação relacionada à neurocomputação data de 1943 por Walter Pitts, que era um matemático, e o neurofisiologista Warrm McCulloch. Neste trabalho, eles realizaram um modelo matemático inspirado no neurônio biológico. A contribuição deste trabalho foi puramente conceitual e tomada como base para a maioria dos modelos conexionistas desenvolvidos posteriormente.

Em 1949, Donald Hebb publica o livro intitulado “The Organization of Behavior” (A Organização do Comportamento) e dá um passo muito importante na história das redes neurais. Ele propôs um método de treinamento das RNAs, denominado de regra de aprendizado de Hebb, baseada em hipótese de observação de caráter neurofisiológico onde a aprendizagem do conhecimento em uma rede neural é alcançada pelo fortalecimento das conexões entre neurônios adjacentes, sempre que estes estiverem excitados. Suas teorias serviram para diversos outros pesquisadores.

No período compreendido entre 1957 e 1958, Frank Rosenblatt criou o primeiro neurocomputador, denominado Mark I – Perceptron, idealizando o modelo básico de perceptron (Rosenblatt, 1958).

Em 1969 Marvin Minsky e Seymour Papert provaram que as redes neurais de uma única camada, proposta por Rosenblatt, não seriam capazes de resolver uma ampla classe de problemas devido às restrições de apresentação. Com o reflexo destas publicações houve um período no qual as redes neurais artificiais foram desacreditadas, mas em 1982, John Hopfield apresentou seu trabalho no qual descreve um modelo de rede neural baseado no sistema nervoso de uma lesma e no mesmo ano Kohonen publica um artigo no qual descreve uma RNA baseada em auto-organização e nas características de adaptação dos neurônios. Com estas publicações o interesse por tais algoritmos renasceu.

Uma fonte de pesquisa abrangente sobre fatos históricos das redes neurais artificiais pode ser encontrada em (Haykin, 2001).

2.4.2 – Neurônio Biológico

O sistema nervoso humano é formado por uma rede de neurônios, unidade básica do cérebro, responsável pelos fenômenos conhecidos como pensamento, emoção e cognição, além da execução das funções sensório-motoras e autônomas (Wasserman, 1989).

Segundo Silva *et al.* (2010), o processamento de informações no cérebro humano é regido por elementos biológicos que operam em paralelo, tendo como objetivo a produção de ações apropriadas para cada uma de suas funcionalidades, tais como o pensar e o memorizar.

A célula elementar do nosso sistema nervoso central é o neurônio (Figura 2.11). Pelo que se conhece, o cérebro humano possui cerca de 10 bilhões destes neurônios e cada um deles é capaz de realizar até 10.000 sinapses com outros neurônios.

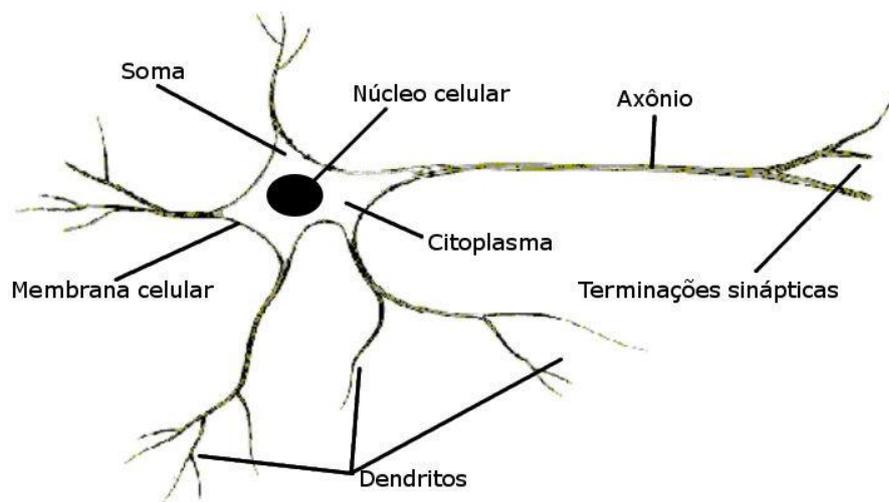


Figura 2.11 - Neurônio Biológico (Haykin, 2001).

O neurônio biológico é composto por três partes principais que são os dendritos, o corpo celular e o axônio.

O corpo celular tem a função de processar os sinais advindos dos dendritos gerando um potencial de ativação que poderá ser disparado ao longo de seu axônio. Os dendritos captam continuamente os estímulos transmitidos por outros neurônios. Já a função do axônio, que é constituído por um único prolongamento tubular e que pode alcançar até alguns metros, é transmitir os estímulos a outras células.

Através das sinapses, os neurônios se unem funcionalmente, formando redes neurais (Beale e Jackson, 1990).

2.4.3 – Neurônio Artificial

As unidades processadoras de uma RNA são os neurônios artificiais que são estruturas bem simplificadas de um neurônio biológico.

Tais estruturas foram inspiradas a partir da análise da geração e propagação de impulsos elétricos pela membrana celular dos neurônios (Hodgkin e Huxley, 1952).

Os neurônios das RNAs realizam funções simples como receber um ou mais sinais de entrada e devolver um único sinal de saída, levando em consideração sua função de ativação, que pode servir como saída da rede ou como entrada para outros neurônios. A Figura 2.12 mostra a representação de um neurônio artificial.

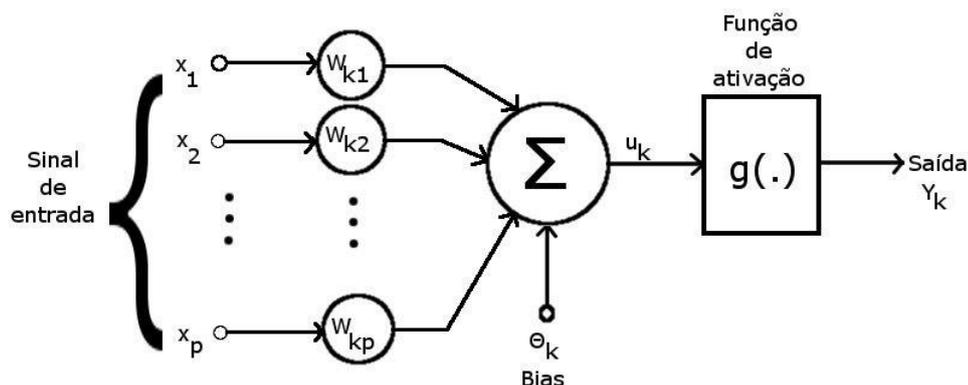


Figura 2.12 - Representação de um Neurônio Artificial (Haykin, 2001).

Quando as entradas, x , são inseridas no neurônio, elas são automaticamente multiplicadas pelos seus respectivos pesos sinápticos, w , gerando desta forma as entradas ponderadas:

$$W_{k1}x_1, W_{k2}x_2, \dots, W_{kp}x_p \quad (2.2)$$

Estas entradas são então somadas gerando como resultado a saída do somatório $(\Sigma)u_k$.

$$u_k = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (2.3)$$

A saída do somatório (u_k) é então apresentada à função de transferência. A função de transferência tem o objetivo de limitar a saída do neurônio dentro de um intervalo de valores razoável.

$$Y_k = g(u_k) \quad (2.4)$$

2.4.4 – Função de Ativação e Função de Transferência

A função de ativação antecede a função de transferência, e tem por objetivo, repassar o sinal para a saída do neurônio; ela permite que pequenas alterações nos pesos e bias causem apenas pouca alteração na saída. A função de ativação é geralmente utilizada com os seguintes propósitos: limitar a saída do neurônio e introduzir não linearidade no modelo.

A função de transferência pode ter muitas formas e métodos, podendo ser simples ou complexa. A função de transferência (limiar lógico ou threshold) é quem define e envia para a saída do neurônio o valor passado pela função de ativação. Em alguns modelos de redes, o nível de saída produzido pela função de transferên-

cia é igual ao nível de ativação. A Figura 2.13 ilustra algumas funções de transferência.

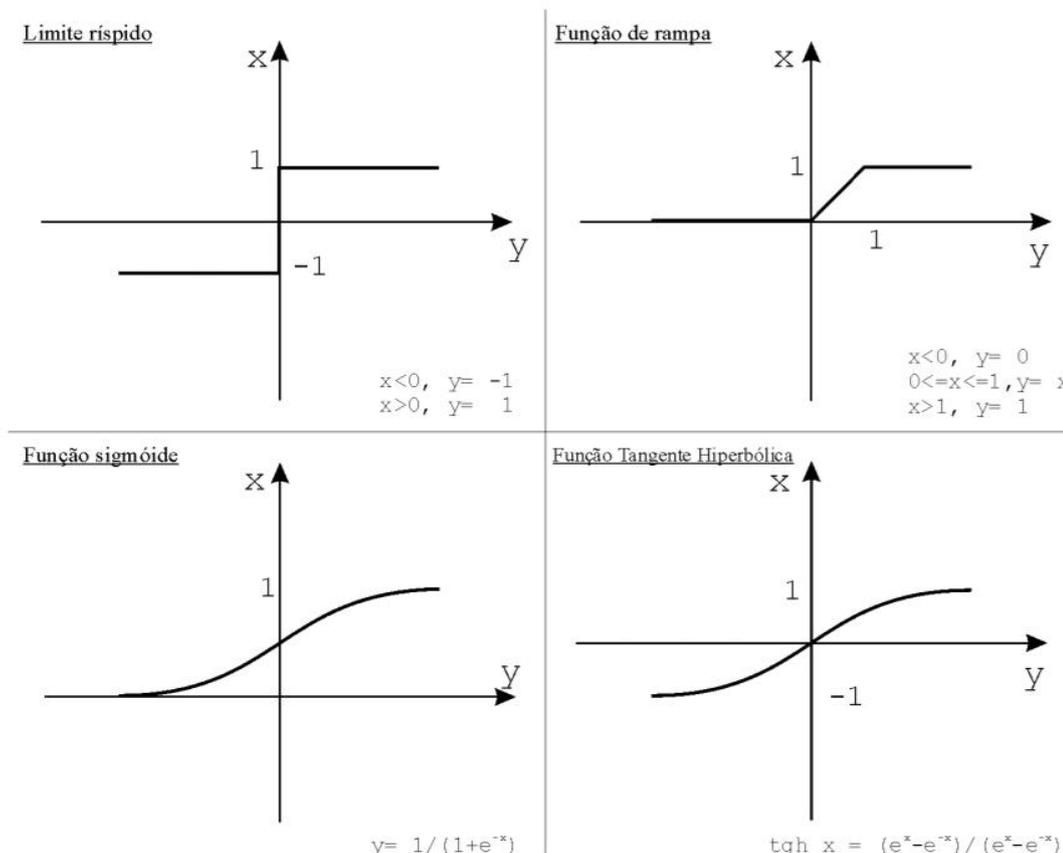


Figura 2.13 - Funções de transferência (Kovács, 1996).

As funções rampa e limite ríspido (degrau) possuem decisões ríspidas, principalmente para valores extremos. Essas funções refletem a saída dentro de uma faixa (digamos entre 0 e 1). Isto quer dizer que, ultrapassando certo limite, a função dispara o valor 0, ou 1, ou -1, dependendo da função e da forma que será utilizada.

As funções sigmoide e tangente hiperbólica são utilizadas normalmente para decisões onde as saídas limites são disparadas quando existe uma saturação muito alta do valor de ativação. Em outras palavras, significa que se fosse utilizado a função sigmoide:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (2.5)$$

essa função produziria um 0 de saída somente quando o valor passado da função de ativação tivesse um grande valor negativo, e produziria o valor de saída 1 quando

a ativação tivesse um grande valor positivo. Essa função faz a transição entre os extremos de forma suave.

2.4.5 – Arquitetura de Rede

Quando nos referimos à arquitetura de uma rede neural estamos nos referindo à disposição dos neurônios, um em relação ao outro.

Segundo Ludwing Júnior e Montgomery (2007), as conexões entre as camadas podem gerar n números de estruturas diferentes. A forma com que estas estão dispostas se relaciona intimamente com o algoritmo de aprendizagem utilizado para treinar a rede. Quando uma rede possui todas as saídas dos neurônios de uma camada conectadas com todos os neurônios da camada a seguinte é denominada de amplamente conectada (fully connected). Quando o sinal de saída de um neurônio servir como sinal de entrada para um ou mais neurônios na mesma camada ou em alguma camada anterior, a rede possui uma característica denominada realimentação (feedback)

2.4.6 – Controle do Aprendizado

Existem duas formas de aprendizado de uma rede neural, o aprendizado supervisionado e o aprendizado não supervisionado.

No aprendizado supervisionado, conjuntos de entrada e seus correspondentes de saída são apresentados à rede. Durante este processo, os valores de entrada são comparados com os valores de saída desejados e em seguida os pesos sinápticos e de bias são ajustados para minimizar a diferença entre a saída desejada e a saída apresentada pela rede. Este processo é repetido para todos os pares de entrada e saída que constituem o conjunto de treinamento da rede, até que a taxa de erro seja considerada satisfatória (Ludwing Júnior e Montgomery, 2007).

No aprendizado não supervisionado ou auto supervisionado a rede não recebe informações de saídas desejadas; a própria rede deve se auto-organizar baseado-se nas particularidades existentes entre os elementos componentes do conjunto de amostras apresentadas à mesma. Essa auto-organização se dá por meio de processo de cooperação e competição entre os neurônios da rede.

2.4.7 – Algoritmo de Aprendizado

Uma das principais propriedades da RN é sua habilidade em aprender com o seu ambiente por meio de processos iterativos de ajustes aplicados a seus pesos sinápticos e níveis de bias e com isto melhorar seu desempenho. A este processo denomina-se de treinamento. Existem atualmente diversos algoritmos para ajustes dos pesos e níveis de bias de uma RN, dentre estes podemos destacar o algoritmo backpropagation:

O algoritmo backpropagation trabalha com RN multicamadas e consegue resolver problemas “não linearmente separáveis” que alguns algoritmos não conseguem resolver, ou seja, são aqueles problemas dos quais não podemos separar duas classes distintas no eixo cartesiano bidimensional apenas traçando uma reta (Figura 2.14).

O objetivo do backpropagation é otimizar os pesos para que a rede neural possa aprender a mapear corretamente as entradas para as saídas.

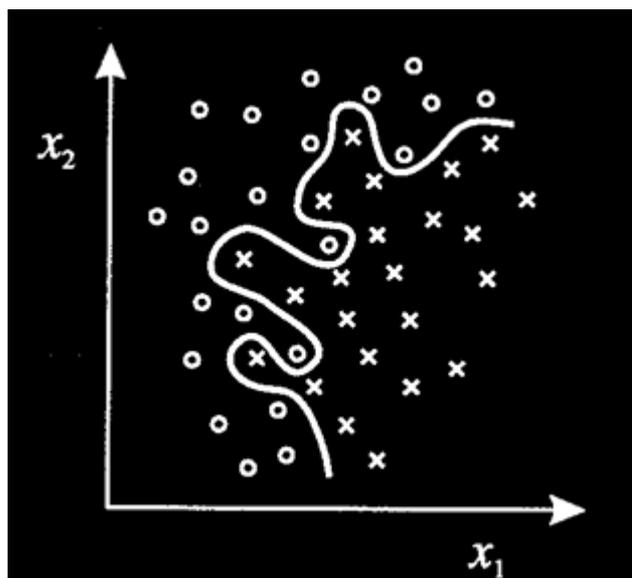


Figura 2.14 - Problema não linearmente separável (DevMedia, 2013).

Este algoritmo consiste de duas fases:

1. Passo para frente (forward pass), na qual as entradas são passadas através da rede e as previsões de saída obtidas (fase de propagação).
2. Passo para trás (backward pass), na qual calculamos o gradiente da função de perda na camada final da rede e usamos esse gradiente para aplicar recursivamente a regra da cadeia para atualizar os pesos (fase retro-propagação).

2.5 – Linguagem de Programação Python

Python é uma linguagem de programação criada por Guido van Rossum em 1991. É uma linguagem livre e multiplataforma; isso significa que os programas escritos em uma plataforma serão executados na maioria das plataformas existentes sem nenhuma modificação.

A linguagem Python foi a escolhida para a escrita dos softwares por possuir uma grande biblioteca para lidar com dados científicos e também gerenciar interfaces gráficas.

2.6 – Biblioteca PyAudio

O PyAudio fornece ligações em Python para o PortAudio, uma biblioteca de Entrada/Saída de áudio de várias plataformas. A PyAudio permite a utilização da linguagem Python para reproduzir e gravar áudio em diversas plataformas, como GNU / Linux, Microsoft Windows e Apple Mac OS.

2.7 – Biblioteca Numpy

O Numpy é o pacote básico da linguagem Python que permite trabalhar com arranjos, vetores e matrizes de N dimensões, de uma forma comparável e com uma sintaxe semelhante ao software proprietário Matlab, mas com muito mais eficiência, e com toda a expressividade da linguagem. Provê diversas funções e operações sofisticadas, incluindo (mas não se limitando a):

- Objeto array para a implementação de arranjos multidimensionais
- Objeto matrix para o cálculo com matrizes
- Ferramentas para álgebra linear
- Transformadas de Fourier básicas
- Ferramentas sofisticadas para geração de números aleatórios

Além disso tudo, as classes criadas podem ser facilmente herdadas, permitindo a customização do comportamento (por exemplo, dos operadores típicos de adição, subtração, multiplicação, etc.). O módulo é implementado em linguagem C, o que dá uma grande velocidade às operações realizadas (PyScience-Brasil, 2018).

2.8 – Biblioteca Matplotlib

O Matplotlib é uma biblioteca para a visualização de dados em Python. Ele apresenta uma API orientada a objetos que permite a criação de gráficos em 2D de uma forma simples e com poucos comandos. A ferramenta disponibiliza diversos tipos de gráficos, como em barra, em linha, em pizza, histogramas entre outras opções. A API foi projetada para ser compatível com o MATLAB que, apesar de ser referência na área de processamento numérico, não é open-source (Lima, 2018).

2.9 – Biblioteca Json

A troca de informações entre programas é um problema antigo, que tem passado por diferentes soluções. Um exemplo de solução já bem conhecida é o XML, que hoje é bastante utilizado. Mas o JSON é uma metodologia mais moderna e eficiente, e no Python existe um módulo que permite a codificação e decodificação de objetos JSON de uma forma bem estruturada.

JSON significa “JavaScript Object Notation”, ou “Notação de Objetos JavaScript”. É bem leve, independe da linguagem utilizada para codificar e decodificar, e é muito fácil de ser lida, seja por humanos ou por programas.

A biblioteca json disponível no Python pode operar com objetos json originários de arquivos ou strings. Ao decodificar o objeto, a biblioteca o converte para listas ou dicionários Python. E também o inverso, ou seja, converte listas ou dicionários Python em objetos json (Tavares, 2016).

2.10 – Piezoelectricidade

A piezoelectricidade é uma forma de acoplamento entre os comportamentos mecânico e elétrico de certos materiais com propriedades piezoelectricas. Esses materiais possuem a capacidade de se tornarem eletricamente polarizados se forem submetidos a algum tipo de tensão mecânica ou, ao inverso, se apresentarem alguma deformação mecânica, quando experimentam uma carga elétrica.

O efeito piezoelectrico divide-se em efeito piezoelectrico direto e efeito inverso (Figura 2.15). O primeiro ocorre quando uma deformação mecânica é aplicada ao material, sendo essa convertida em uma carga elétrica. O segundo ocorre quando

se aplica um potencial elétrico ao material e esse é convertido em deformação mecânica (Iliuk, 2016).

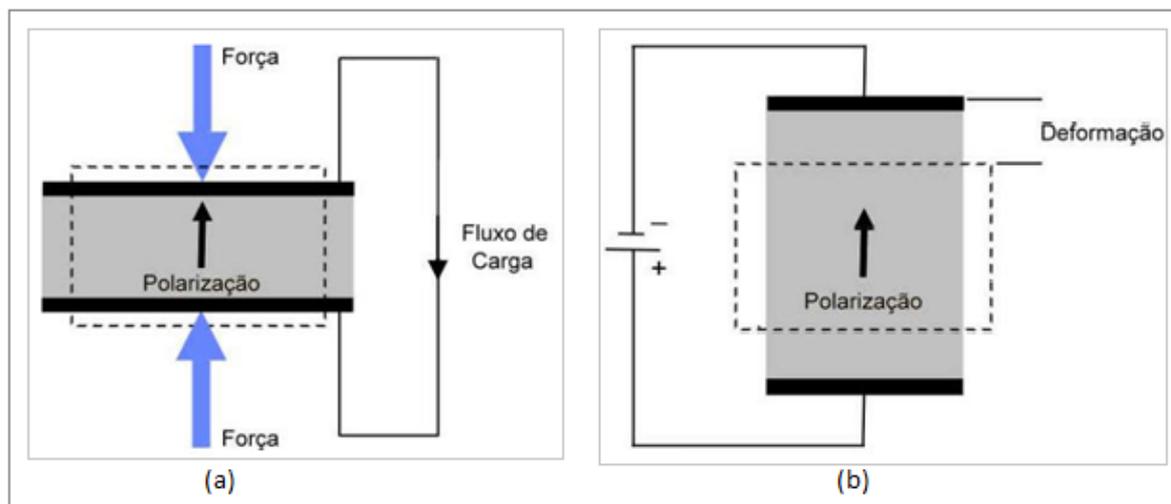


Figura 2.15 - a) Efeito piezoelétrico direto, b) Efeito piezoelétrico inverso (Falconi, 2010).

Os materiais piezoelétricos ao serem submetidos a um esforço mecânico apresentam um momento elétrico com intensidade proporcional ao esforço aplicado. Conforme o tipo de esforço mecânico - se de tração ou de compressão aplicado ao material piezoelétrico, o sentido da polarização resultante é inverso ao da aplicação de um campo elétrico a um cristal. Dessa forma, o efeito piezoelétricos inverso apresenta uma deformação do cristal, que é tanto maior quanto o campo elétrico exercido e depende do sentido desse campo (Iliuk, 2016).

O captador piezoelétricos, também conhecido como cerâmico ou cristal, gera uma força eletromotriz a partir da deformação de um cristal (Figura 2.16). Esse cristal possui características piezoelétricas, ou seja, eletricidade por resposta a uma pressão mecânica. A tensão gerada pela deformação do cristal é proporcional ao deslocamento das ondas de som. Esses dispositivos são capazes de receber pressão direta ou por meio de um diafragma que está acoplado ao cristal. O captador piezoelétrico possui resposta aproximadamente plana. Esse tipo de resposta é comum em microfones utilizados para medição, denominados microfones de referência. Observa-se que eles respondem a um amplo espectro de frequências, mantendo-se quase totalmente planas (Medeiros, 2014).

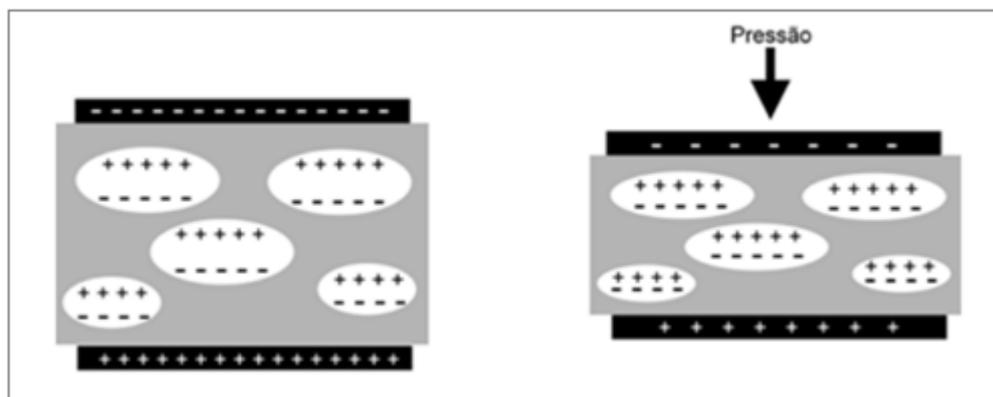


Figura 2.16 - Representação das cargas elétricas aprisionadas nos polímeros celulares após carregamento elétrico e deformação das cavidades pela aplicação de uma pressão externa - nesse caso, o som (Assagra, 2015).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Cabo de Aço do Experimento

O cabo de aço selecionado para uso neste trabalho foi adquirido no comércio local. O critério principal de seleção foi que sua resistência fosse tal que pudesse ser rompido com os recursos laboratoriais disponíveis. Isso pressupunha que os mecanismos envolvidos no processo de ruptura sob tração e suas emissões acústicas fossem comuns a todos os tipos de cabo de aço.

Não foi possível ter acesso às especificações do fabricante do cabo. Algumas de suas especificações foram verificadas por meio de averiguação do próprio autor. São elas:

- Diâmetro total de 1.6mm
- Torção à direita
- Composto por 6 pernas
- Diâmetro de cada perna de 0.5mm
- Cada perna composta por 7 arames
- Diâmetro de cada arame 0.2mm
- Alma de fibra sintética composta por 7 fios

Isso caracteriza um cabo do tipo **6x7 + AF**. A Figura 3.1 ilustra o cabo de aço com suas pernas enquanto na Figura 3.2 ilustra os arames que compõem uma perna do cabo de aço.

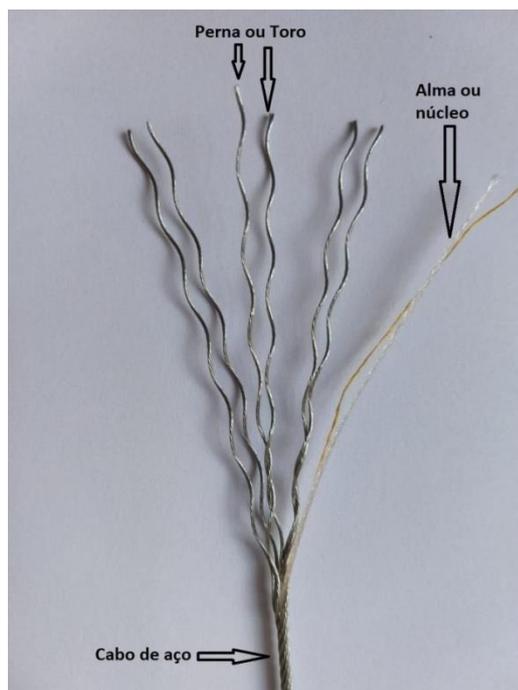


Figura 3.1 - Cabo de aço do experimento e suas pernas.

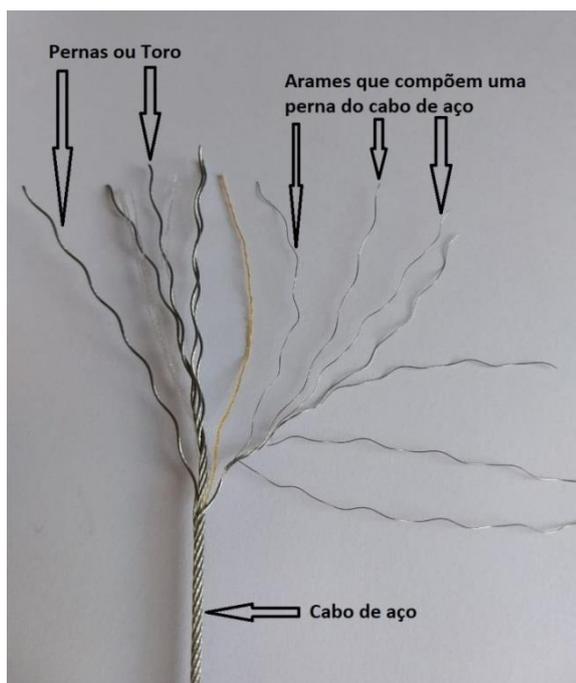


Figura 3.2 - Arames da perna do cabo de aço.

A Figura 3.3 exibe o rolo de cabo de aço adquirido para a execução do projeto. São 500 m de cabo. Cada ensaio utiliza 1 m de cabo que, após instalado na máquina de tracionamento fornece 0,70m de comprimento útil.



Figura 3.3 - Rolo de cabo de aço utilizado nos experimentos.

3.2 – Módulo de Pré-Amplificação

O módulo de pré-amplificação é a parte do equipamento que recebe os sinais dos captadores e os amplifica. Os circuitos ficam montados dentro de uma caixa plástica onde ficam fixados os conectores de entrada e de saída de sinais conforme é mostrado na Figura 3.4.

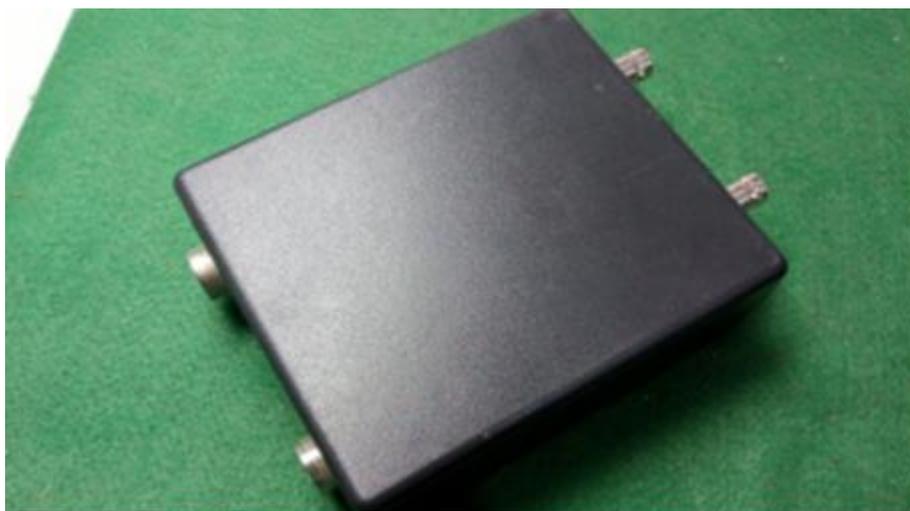


Figura 3.4 - Módulo de pré-amplificação.

3.3 – Pré-Amplificador Diferencial

Um dos tipos de captador de emissão acústica usado foi do tipo magnético. Seu uso requer também uma instrumentação específica. Um dos principais problemas a ser contornado nesse tipo de captador é a contaminação por interferência eletromagnética, principalmente pelo 60Hz da rede elétrica. O primeiro cuidado a ser tomado foi quanto à escolha do tipo de captador mais adequado. Ainda assim, o uso simplesmente do captador com pré-amplificação simples não foi satisfatório para a obtenção de uma boa redução de ruídos. Para que esse objetivo fosse conseguido foi necessário montar um pré-amplificador diferencial cujo esquema pode ser visto na Figura 3.5.

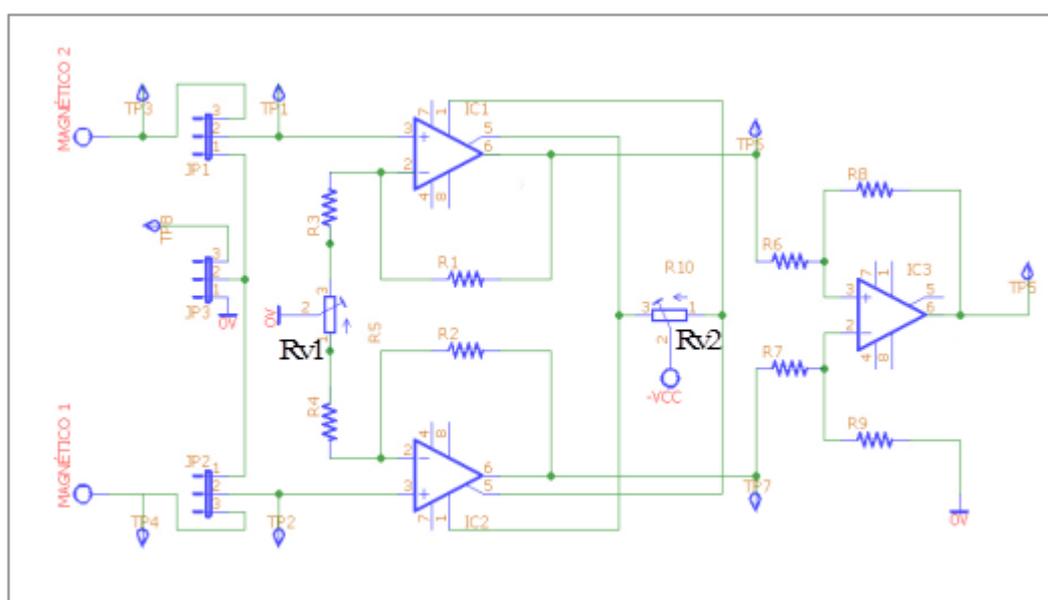


Figura 3.5 - Esquema elétrico do pré-amplificador diferencial.

O circuito é baseado em três amplificadores operacionais de alta impedância CA 3140 ($R_{in} > 100M\Omega$). A etapa de entrada usa dois amplificadores operacionais configurados como amplificador de tensão não inversor, ou seja, garante altíssima impedância de entrada com ganho individual dado por

$$G_{in} = \frac{R_1}{R_3} + 1 \text{ e } \frac{R_2}{R_4} + 1 \quad (3.1)$$

sendo $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1,2k\Omega$. A alta impedância é altamente desejável, pois contribui para que a resposta de frequência do captador não seja afetada pelo próprio circuito. Cada saída de cada um dos dois amplificadores não inversores é conectada à entrada de outra etapa do circuito que é o amplificador diferencial propriamente dito. O ganho dessa configuração é dado pela expressão:

$$G = -\frac{R8}{R6}Vtp5 + \left(\frac{R6 + R8}{R7 + R9}\right)\frac{R9}{R6}Vtp7 \quad (3.2)$$

Substituindo os valores dos resistores $R6 = R7 = 1,2k\Omega$ e $R8 = R9 = 1,27M\Omega$ utilizados nessa montagem obtem-se valor de ganho:

$$G = -1058Vtp5 + 1058Vtp7 \quad (3.3)$$

Levando-se em conta que $R3$ e $R4$ são ligados a cada metade do trimpot $RV1(1k\Omega)$ ou seja 500Ω para cada lado, significa que cada etapa fica com ganho $Gin = 1,7$. Calculando o ganho global $Gdif$ do pré-amplificador pela multiplicação dos ganhos de cada etapa obtém-se aproximadamente:

$$Gdif = -1058Vtp5 + 1058Vtp7 \quad (3.4)$$

Isso significa que cada uma das bobinas do captador, ao serem ligadas com as polaridades corretamente referenciadas ao zero volt da fonte de alimentação resultará em um ganho $G=3600$ para o sinal de interesse e $G=0$ para os ruídos. Faz-se necessário observar que o uso de baterias como fonte de alimentação também foi crucial para diminuição de ruídos.

Para que o pré-amplificador tenha eficiência máxima na função de reduzir ruídos é necessária uma calibração. A Figura 3.6 é mostra uma vista de topo da montagem dos componentes do pré-amplificador em placa de circuito impresso universal.

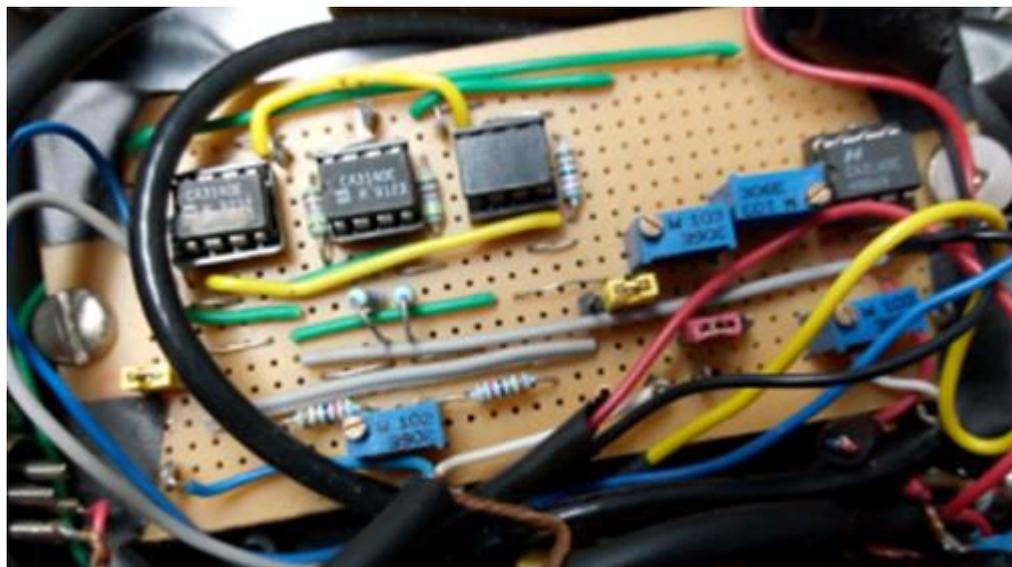


Figura 3.6 - Componentes do pré-amplificador em uma placa de circuito impresso universal.

Na placa de circuito impresso há quatro trimpots (azuis) de precisão. No parafuso do trimpot $RV1$, localizado na parte mais inferior da placa, (vide imagem), efetua-se uma regulagem para que o cancelamento em modo comum seja máximo. Para isso, primeiramente é necessário que a posição dos dois jumpers (amarelos), $JP1$

e JP3, estejam nos pinos 1e 2 e a posição do jumper JP3 (vermelho), nos pinos 2 e 3. Essas alterações são referentes ao modo calibração. Feito isso, injeta-se um sinal senoidal externo de frequência 1kHz e amplitude de 5Vpp no ponto TP8 do circuito. Com um osciloscópio conectado à saída TP5 procura-se ajustar com chave de fenda o trimpot RV1 de modo que a senoide apresente amplitude mínima possível. Na prática foi conseguida uma redução cerca de 100 vezes.

Outro ajuste feito no circuito é o cancelamento de offset para tornar nulo o nível de tensão contínua DC na saída do pré-amplificador.

Repetindo as mesmas configurações anteriores com relação aos jumpers amarelos, e mudando apenas a posição do jumper vermelho tem-se as condições para o ajuste do offset. O ajuste foi feito através do trimpot RV2 e foi obtido um valor de 0,1mV na saída TP5.

Tabela 1 - Lista de Materiais.

Lista de Materiais		
$R1 = R2 = R3 = R4 = 1,2k\Omega$	Trim RV1 = 5 1kΩ	IC 3x CA3140
$R8 = R9 = 1,27M\Omega$	Trim RV2 = 10kΩ	

O circuito para o captador piezoelétrico constitui-se apenas de um circuito seguidor de tensão, baseado em um amplificador operacional CA 3140 (Figura 3.7), que fornece alta impedância de entrada e ganho unitário. O sinal bruto do captador piezoelétrico já é intrinsecamente de elevada amplitude.

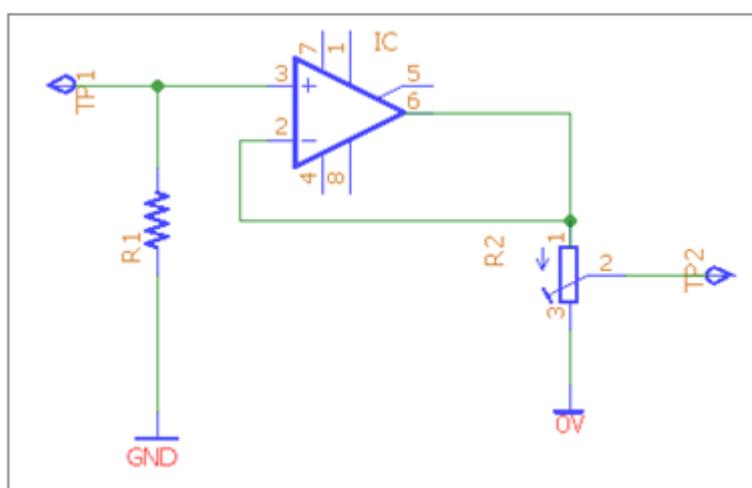


Figura 3.7 - Circuito para o captador piezoelétrico.

3.4 – Captador Magnético

Os captadores magnéticos são transdutores especialmente indicados para serem usados quando o meio ou material de onde emanam as vibrações apresenta propriedades ferromagnéticas. Esse tipo de captador não necessita de contato físico com o corpo vibrante, o que em si já é uma grande vantagem. Seu princípio de funcionamento baseia-se na lei de indução de Faraday. Quando um fluxo magnético que passa através de uma espira de fio condutor sofre uma variação temporal tem-se um campo elétrico induzido gerando um sinal que se manifesta como uma força eletromotriz em circuito aberto e que, pode ser medida através de um voltímetro ou sob forma de corrente se conectada a um amperímetro (Figura 3.8).

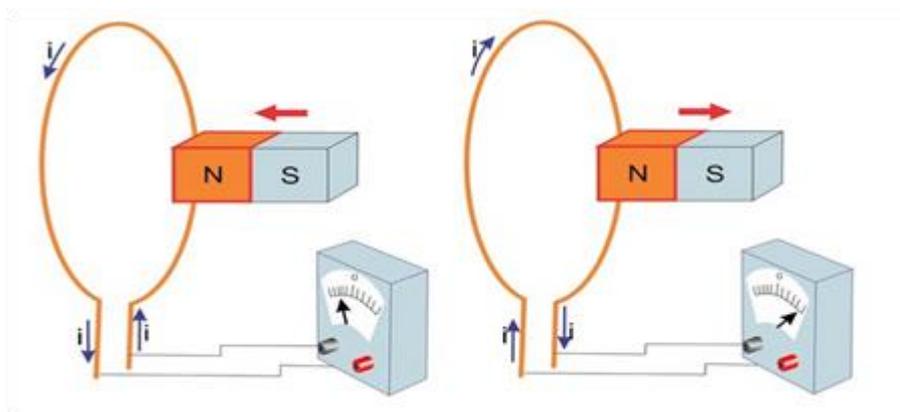


Figura 3.8 - Medição da força eletromotriz pelo multímetro.

Segundo a lei de Faraday a força eletromotriz é dada por

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.5)$$

onde E é a tensão gerada, N é o número de espiras da bobina, ϕ é o fluxo magnético. Portanto, quanto maior a quantidade de voltas da espira maior será a tensão gerada da mesma forma quanto mais rápida a variação do fluxo, maior a tensão. Fisicamente os captadores magnéticos possuem dois elementos básicos: bobina e ímã permanente conforme Figura 3.9.

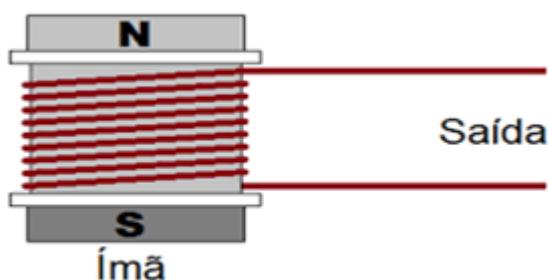


Figura 3.9 – Configuração básica de um captador magnético.

Qualquer objeto ferromagnético metálico vibrante posto nas proximidades de um dos polos do imã, causará uma perturbação, ou variação do fluxo magnético, gerando uma tensão variável no tempo que, a princípio, reproduz características de amplitude e de frequências presentes na vibração.

Uma situação vastamente conhecida e que não só inspirou a escolha do tipo de captador, mas também os tipos de equipamentos a serem usados na solução de problemas está relacionado com a guitarra elétrica. Em essência, o captador de guitarra é o elemento que transforma a vibração das cordas de aço em um sinal de tensão elétrica que é enviada para um amplificador de potência. Este por sua vez, envia o sinal amplificado para auto-falantes e o som da vibração das cordas pode ser ouvido.

Com base em experiências com o sistema de captação de vibração em guitarras elétricas, foi escolhido um captador comercial de guitarra do tipo Humbucker. Esse tipo de captador, além de ter um custo muito baixo, possui uma ótima resposta de frequências e intrinsecamente foi projetado para ser imune, ou quase imune, à interferências eletromagnéticas geradas pela própria rede elétrica de alimentação. Daí o nome humbucker, que é a união de palavras de origem inglesa “hum”, alusão ao típico ronco de 60Hz ouvido nos amplificadores de guitarra que entram pelos captadores mais a palavra “bucker” que tem o sentido de cancelamento. O princípio de redução de ruído é baseado no cancelamento de fase. Esse captador possui duas bobinas, ao contrario dos modelos anteriores de bobina simples.

A ligação das polaridades entres as bobinas é feita de modo que o ruído captado em uma das bobinas está em oposição de fase com relação ao da outra bobina. Como as bobinas estão dispostas lado a lado, possuem sutis diferenças construtivas com relação aos seus magnetos e assim, captam vibrações vindas de pontos diferentes da corda, portanto, somente os sinais de ruído são eliminados.

Na Figura 3.10 pode ser visto o captador Humbucker usado no equipamento.



Figura 3.10 - Captador Humbucker.

3.4.1 – Resposta do Captador Magnético

Para que a resposta do captador magnético fosse conhecida, foram realizados testes com estímulos magnéticos impulsivos de curta duração, produzidos pela percussão da ponta de um objeto ferromagnético em forma de bastão contra o ímã do captador magnético. O sinal produzido na saída do captador resultante deste tipo de estímulo carrega em si as características de resposta de frequência como um todo e que pode ser identificada. As Figura 3.11 e Figura 3.12 exibem a resposta do captador magnético ao estímulo impulsivo no domínio da frequência e no domínio do tempo respectivamente.

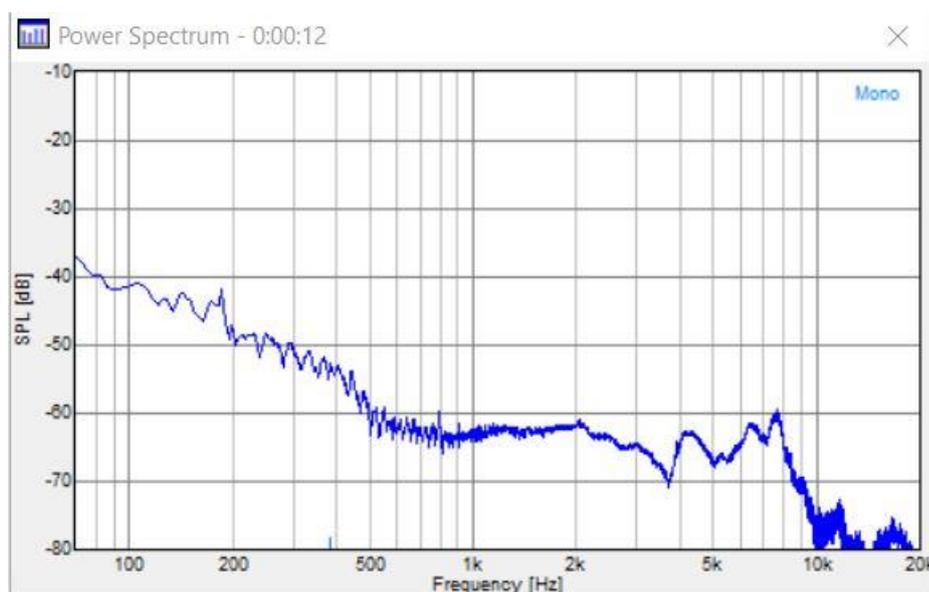


Figura 3.11 - Resposta no domínio da frequência do estímulo impulsivo.

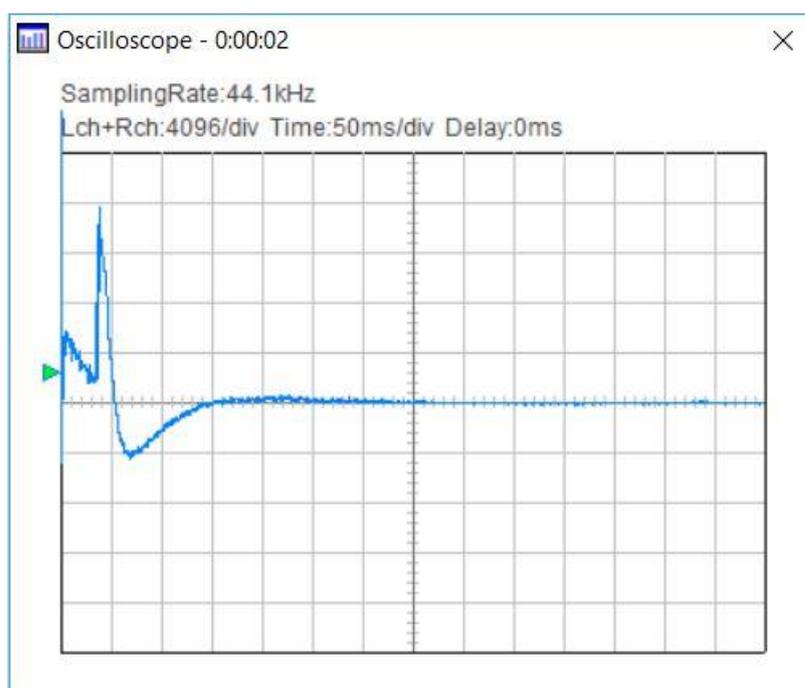


Figura 3.12 - Resposta no domínio do tempo resultante do estímulo impulsivo.

3.5 – Captador Piezoelétrico

O funcionamento do captador piezoelétrico baseia-se no fenômeno da piezoelectricidade. É um captador tipicamente de contato, necessitando de acoplamento direto ao corpo do elemento da qual se deseja captar as vibrações.

Neste trabalho, um piezo diafragma cerâmico, modelo 7BB-27-4, foi utilizado como captador de contato. Suas especificações são mostradas na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Piezoelétrico.

Para que a resposta do captador piezoelétrico fosse conhecida, foi realizado um teste semelhante ao que foi realizado com o captador magnético.

Foram provocados estímulos impulsivos de curta duração golpeando diretamente o corpo do captador com a ponta do mesmo objeto utilizado para golpear o captador magnético. No caso do captador piezoelétrico é irrelevante que o objeto golpeador seja de material ferromagnético.

A resposta característica de frequência do captador piezoelétrico é ilustrada nas Figura 3.14 e Figura 3.15 nos domínios da frequência e do tempo, respectivamente.

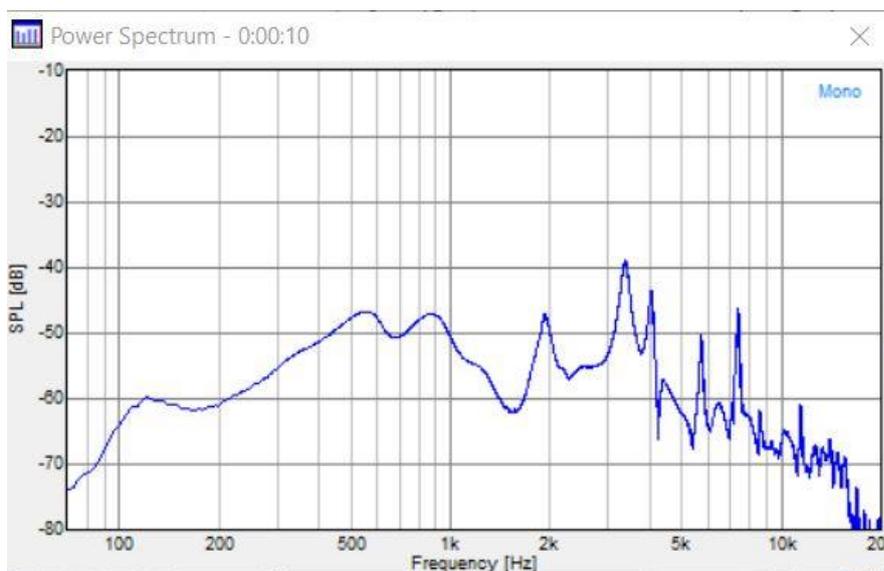


Figura 3.14 - Resposta no domínio da frequência do estímulo impulsivo.

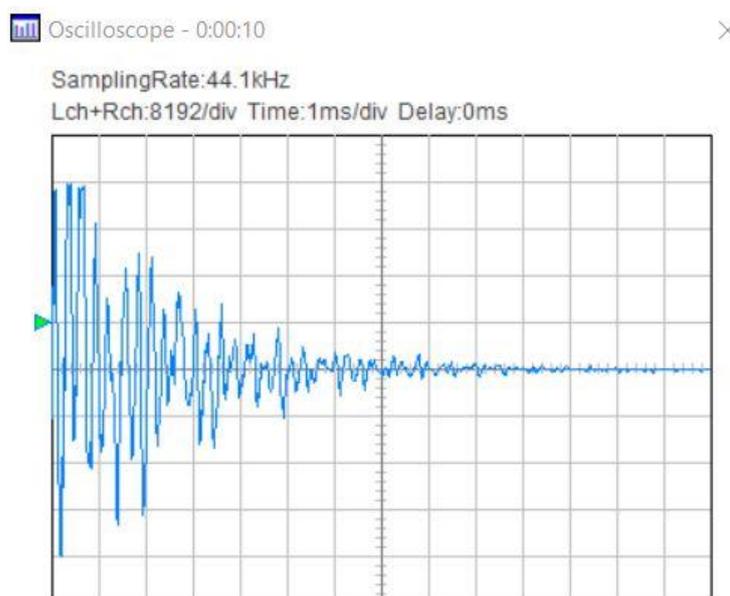


Figura 3.15 – Resposta no domínio do tempo do estímulo impulsivo.

3.6 – Ensaios Instron

3.6.1 – Ensaio Dinâmico (polia)

A fim de averiguar o comportamento mecânico do cabo, e principalmente determinar sua tensão de ruptura, foram realizados ensaios de tração em uma máquina INSTRON 5582. Para esse ensaio em específico, foi necessário criar dois dispositivos para que o cabo fosse adequadamente fixado nas garras da máquina. O dispositivo consiste de uma roldana soldada a um grampo conforme Figura 3.16.



Figura 3.16 - Roldana soldada a um grampo para fixação do cabo de aço.

O ensaio de tração utilizando este modo de fixação permite que o cabo se mantenha preso exclusivamente devido à força de atrito com a superfície da roldana. Tal condição garante que o ponto de ruptura ocorra preferencialmente na metade do comprimento do cabo. Cada ponta deste foi enrolada com três voltas em torno de cada roldana. Escolheu-se como comprimento padrão L_0 a distância de 1m entre as roldanas (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Ensaio do cabo de aço feito em uma máquina INSTRON mostrando o cabo preso (esquerda) e seu rompimento (direita).

A Figura 3.18 mostra o diagrama carga versus alongamento do ensaio de tração do cabo. Durante o ensaio a tração foi variada automaticamente com uma taxa de deformação de 5mm/min. O rompimento ocorreu no valor de tração de 2009,438N e um alongamento de 22,153mm.

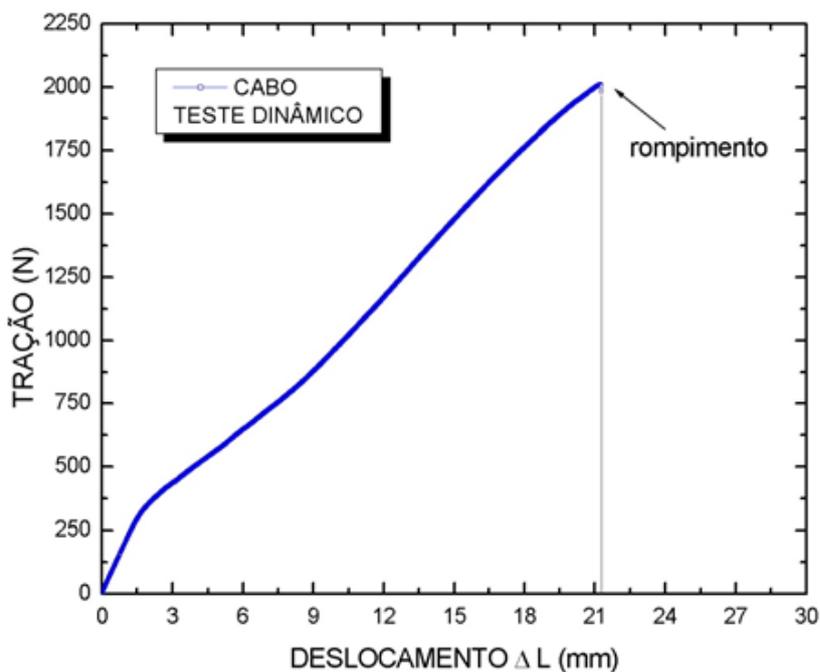


Figura 3.18 - Resultado do ensaio.

3.6.2 – Ensaio Manual (polia)

Outro tipo de ensaio também foi realizado para determinar a correlação entre frequência fundamental de vibração transversal e a carga de tensionamento. Neste ensaio, a tração foi variada manualmente, em incrementos de 100N, e a medida da frequência feita a cada novo incremento. Este teste foi feito replicado, o resultado para ambos é ilustrado na Figura 3.19.

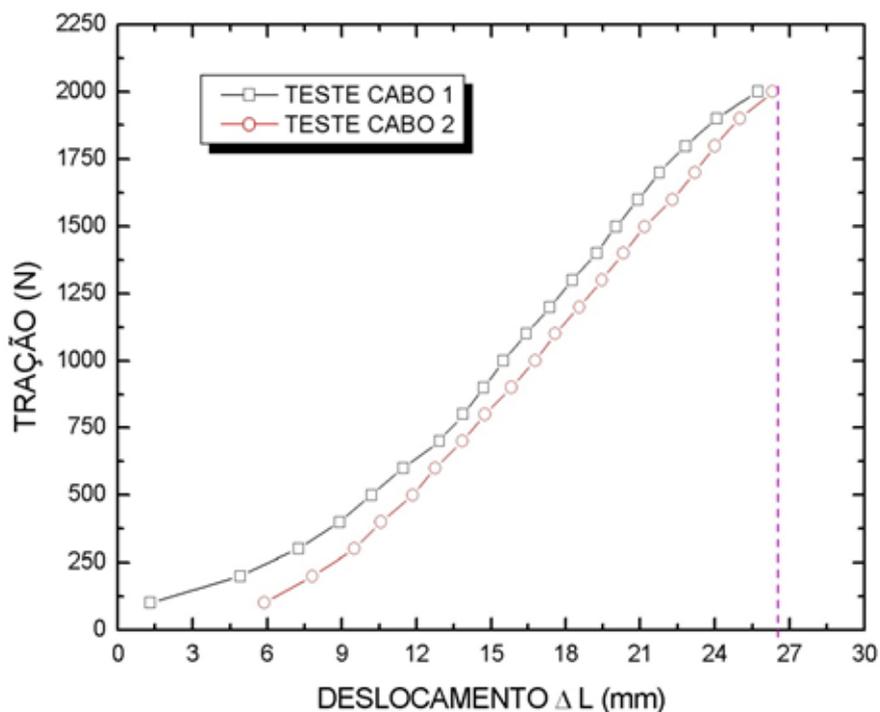


Figura 3.19 - Resultado da tração versus deslocamento captado pelo programa Real Time Analyser.

A ausculta foi feita por meio de um captador magnético comercial de bobina simples SOUND conectado à entrada MIC de um notebook e o cabo posto para vibrar por meio de tangimento. Os valores de frequência foram medidos com o uso do programa Real Time Analyser. Na Figura 3.20 é possível ver os resultados.

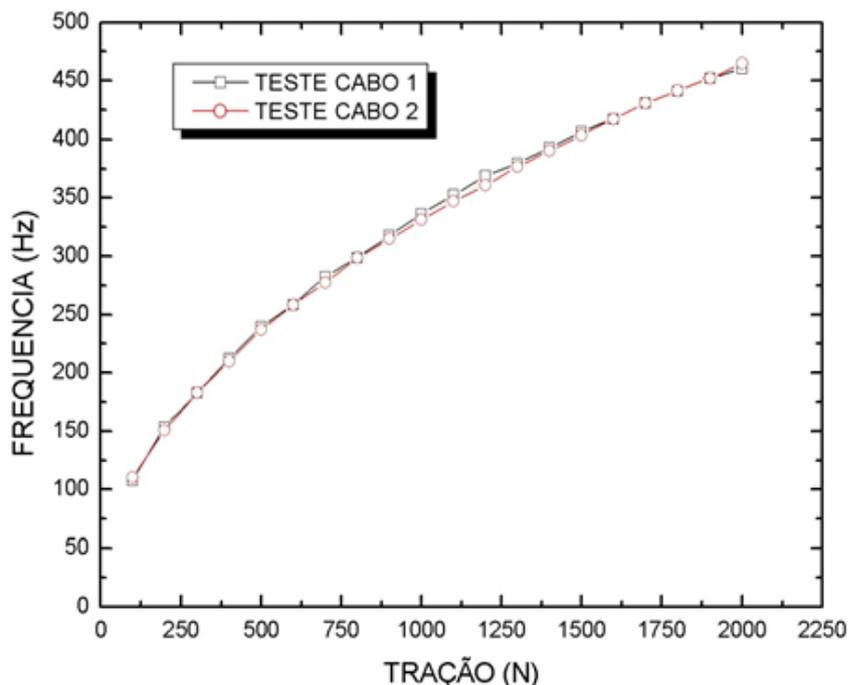


Figura 3.20 - Resultado da frequência versus tração captada pelo programa Real Time Analyser.

No gráfico 3.20 se vê que nos dois ensaios com medição da frequência de vibração, as frequências de vibração exibiram resultados coincidentes em função da tensão. O resultado concorda com a teoria que estabelece que a frequência de vibração de um cabo tensionado tem dependência com a raiz quadrada da tração.

3.6.3 – Ensaio Dinâmico (engate)

Este teste teve por objetivo verificar o comportamento mecânico do cabo ao ser preso no próprio dispositivo de engate da Máquina de Tensionamento que foi utilizado para todos os testes de tensionamento para geração e registro de emissões acústicas.

Neste ensaio casa uma das duas extremidades do cabo de aço fica presa por meio de um nó. O nó foi adotado propositalmente para funcionar como indutor de falha. Foram feitas três repetições do mesmo ensaio visando uma estimativa comportamental do cabo.

O resultado dos testes é exibido na Figura 3.21. A curva mostra um comportamento qualitativamente semelhante entre os ensaios. Há um comportamento inicial em que a deformação aumenta continuamente com o aumento da tração, até que ocorre uma brusca queda da tração, seguida de uma sucessão de aumentos de

quedas bruscas, deixando a curva semelhante a dente de serra. Em média, o valor máximo de carga de tração de ruptura foi de 950N, praticamente a metade do valor que foi na máquina INSTRON utilizando fixação por roldanas. Isto mostra o efeito do concentrador de tensão representado pelo nó em reduzir a resistência nominal do cabo.

O aspecto tipo serrilhado deve-se à ruptura sucessiva de pernas do cabo de aço. Cada queda abrupta de tração corresponde, em princípio, à ruptura de uma perna. Quando uma perna se rompe, cabe às pernas restantes resistirem à tração sobre o cabo. Por isso a tração de ruptura em um dado pico será sempre inferior ao valor do pico anterior.

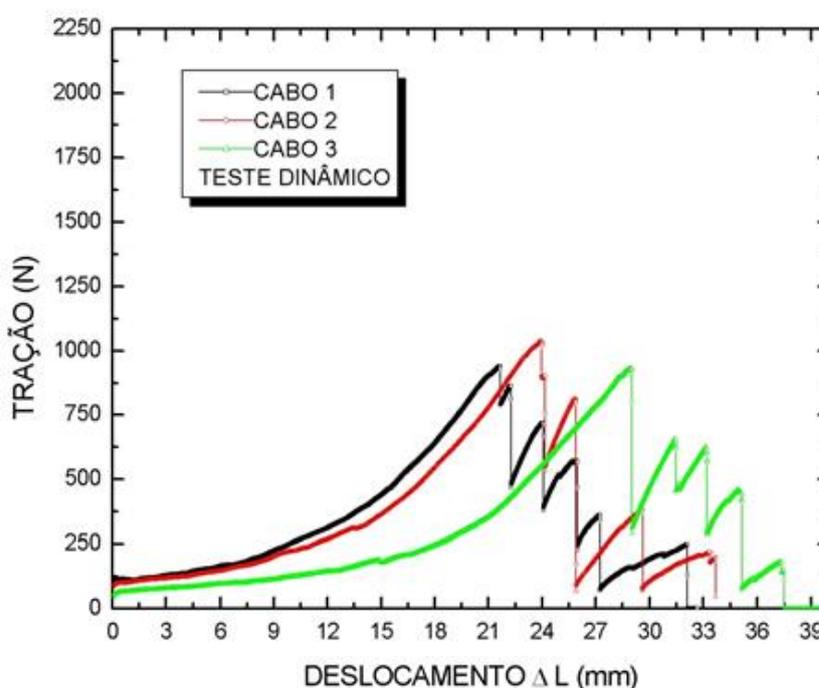


Figura 3.21 - Resultado da tração versus deslocamento captado pelo programa Real Time Analyser.

3.7 – Máquina Tractionadora

Uma máquina tracionadora de cabo de aço foi desenvolvida. A máquina tem por objetivo provocar o tracionamento progressivo do cabo de aço até sua ruptura para permitir a geração da emissão acústica provocada pela ruptura dos arames. Outro objetivo da máquina é testar a eficiência da RN na detecção da ruptura dos arames em tempo real.

A Máquina Tracionadora (MT) pode submeter o cabo a tracionamento constante ou progressivo, até que uma de suas pernas seja rompida, ou ainda, leva-lo ao rompimento completo.

A Máquina Tracionadora constitui-se das seguintes partes:

- 1) ESTRUTURA PRINCIPAL (EP)
- 2) MACACO TRACIONADOR (MT)
- 3) MOTOR ACIONADOR DO MACACO (MAM)
- 4) CABO DE ACOPLAMENTO AO MACACO (CAM)
- 5) ENGATE DE ANCORAGEM (EAN)
- 6) SUPORTE DO CAPTADOR PIEZOELETRICO (SCP)
- 7) ENGATE TRACIONADOR (ETR)
- 8) PLATAFORMA PARA CAPTADOR MAGNÉTICO (PCM)
- 9) EMPARELHADOR DO ENGATE TRACIONADOR (EET)

3.7.1 – Estrutura Principal

Basicamente é uma estrutura metálica confeccionada com tubos de aço de 2” e 1,5” unidos por meio de solda. A estrutura é uma base de sustentação e agrega todas as partes mecânicas do equipamento. A EP é formada por uma base triangular onde de cada vértice emerge uma coluna tubular. Todo conjunto é apoiado no chão através de 3 sapatas rosqueadas ajustáveis que permite a regulagem individual de suas alturas. Tendo em vista a facilidade de fabricação, de portabilidade e de robustez, optou-se por essa configuração conforme Figura 3.22.

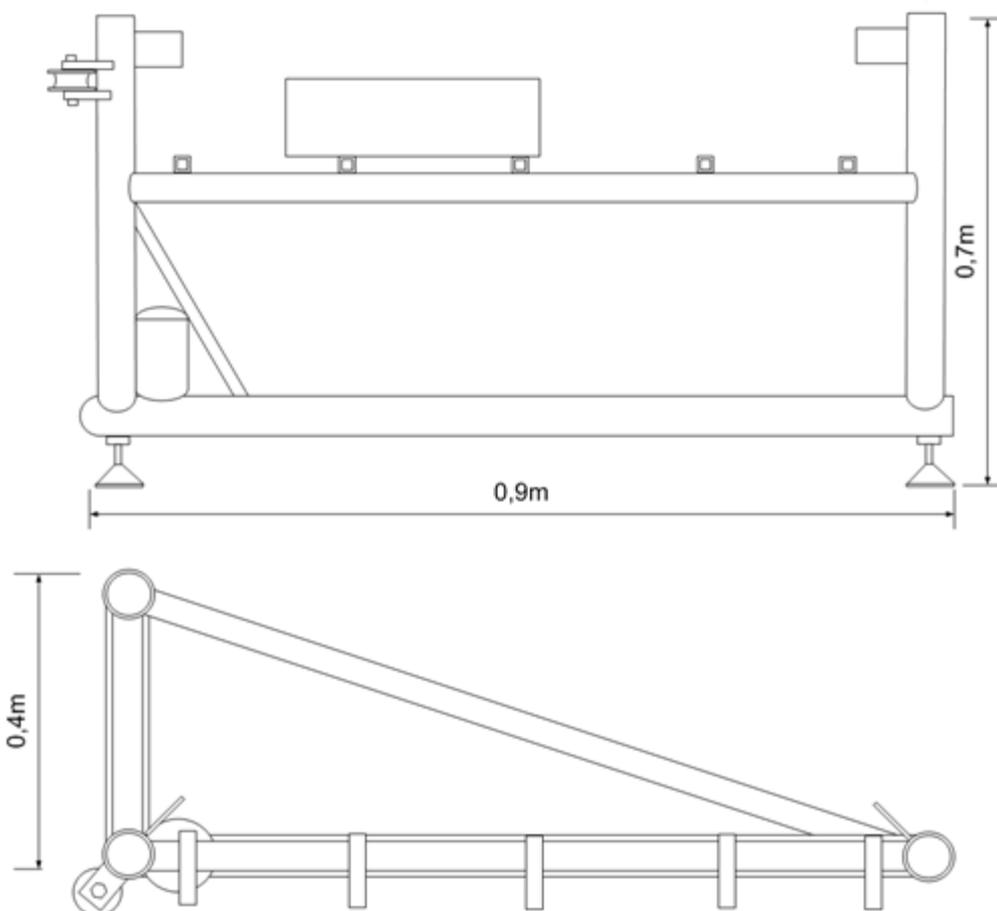


Figura 3.22 - Máquina Tracionadora – Estrutura principal.

3.7.2 – Macaco Tracionador

Um macaco mecânico automotivo foi utilizado para produzir o tracionamento do cabo. Com isso, foi possível aliar compacidade, número limitado de componentes mecânicos e baixo custo. Ver Figura 3.23.

Testes iniciais de tracionamento com o macaco foram realizados com o objetivo de selecionar o tipo de cabo a ser usado, pois o macaco deveria ser capaz de tracionar e levá-lo a ruptura.

Nas etapas seguintes do desenvolvimento, o acionamento manual do macaco foi substituído por acionamento feito por motor elétrico. Com o uso do motor foi possível aplicar um maior torque para o acionamento do parafuso do macaco. Para que o motor pudesse ser acoplado ao parafuso do macaco, e ao mesmo tempo acompanhasse avanço ou o recuo do parafuso foi idealizada uma caixa articulada com quatro buchas deslizantes. Esse arranjo resultou em um modo suave de acionar o macaco reduzindo os níveis de ruído mecânico durante a aplicação da força.



Figura 3.23 - Macaco automotivo.

3.7.3 – Motor Acionador do Macaco

O motor utilizado na montagem é um motor DC com caixa de redução integrada com tensão de alimentação de 24V (Figura 3.24).



Figura 3.24 - Motor com sua caixa de redução.

Um circuito PWM externo foi inserido entre a entrada de alimentação do motor e a fonte de alimentação. O conjunto é alimentado pela rede elétrica via transformador 127/220V de 300W usado como elevador de tensão. A rotação do motor pode ser variada de zero até o seu valor máximo através de um potenciômetro permitindo assim, o tracionamento do cabo de modo mais fino. Por meio de uma chave de 3

posições, selecionada em sua posição central, é possível selecionar a parada. Nas outras duas posições adjacentes o motor pode ser acionado no sentido de rotação horária e anti-horária, permitindo tencionar ou afrouxar o cabo (Figura 3.25).

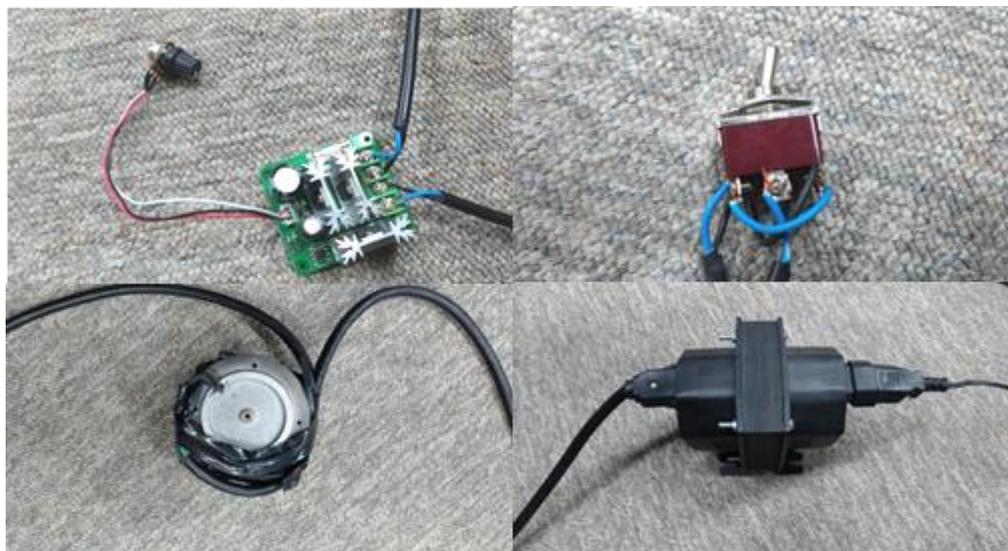


Figura 3.25 - PWM, fontes e chave de comutação.

3.7.3.1 – PWM (Pulse Width Modulation)

PWM significa “Pulse Width Modulation” ou Modulação de Largura de Pulso. É uma técnica usada para obter comportamento analógico através de meios digitais. O controle digital é usado para criar uma onda quadrada através de um sinal alternado entre HIGH e LOW.

Considere-se uma chave liga-desliga, quando desligada a tensão é nula e assim a potência é 0, já com a chave ligada, a tensão é aplicada 100% na carga (Figura 3.26).

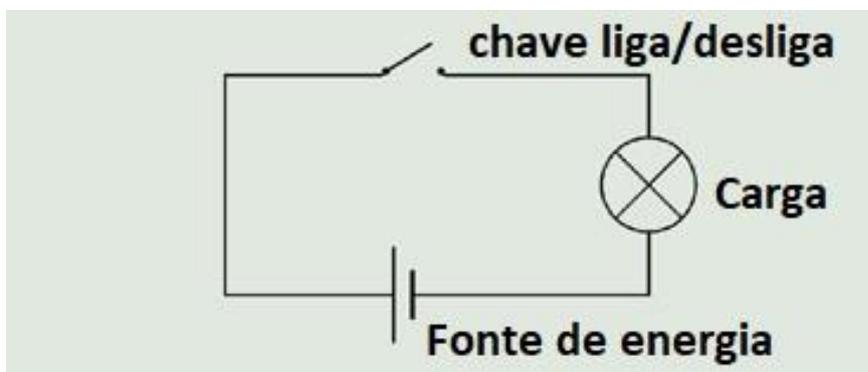


Figura 3.26 - Circuito liga-desliga.

A duração do tempo em nível HIGH é chamada de largura de pulso. E para obtenção de valores analógicos variados, efetua-se a modulação dessa largura de pulso. Por exemplo, para controlar o tempo que uma chave fica ligada, consequentemente o tempo que ela fica desligada, pode-se controlar a potência média entregue à carga. Por exemplo: se uma chave fica ligada 25% e desligada 75% do período, isto quer dizer que a potência aplicada na carga é de 25%.

Na Figura 3.27 tem-se a largura de pulso em 0, 25 e 100% do período, gerando assim a potência total em 0%, 25% e 100%, respectivamente.

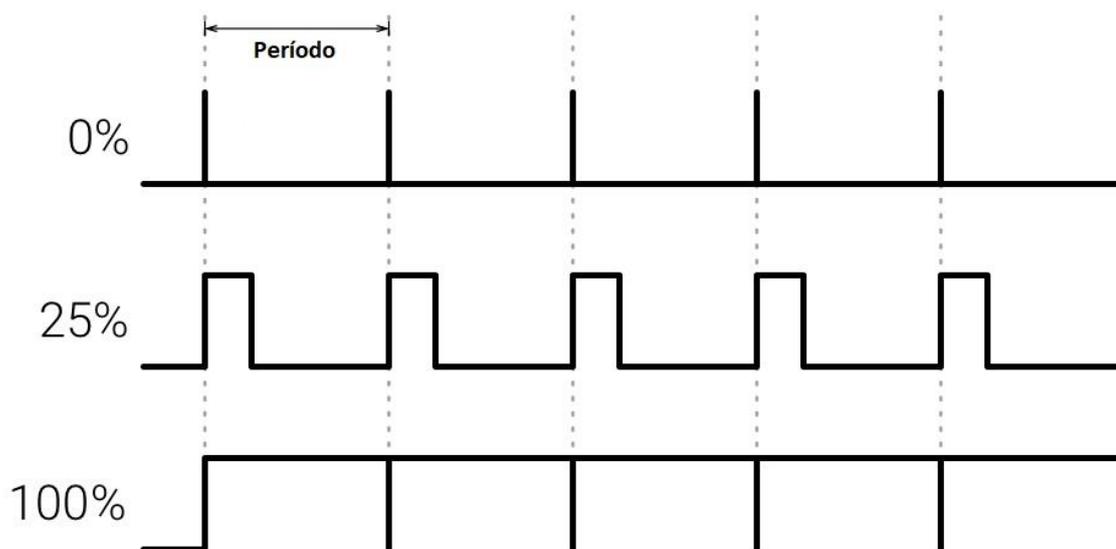


Figura 3.27 - Largura de pulso.

Neste trabalho foi utilizado um controle PWM para controlar a potência e a velocidade do motor.

3.7.4 – Cabo de Acoplamento ao Macaco

Levando-se em conta que o tipo de macaco automotivo utilizado na fabricação do equipamento possui um braço de alavanca, esse elemento responsável pela aplicação da força descreve essencialmente um movimento angular e não puramente de translação. Portanto, não seria indicado fazer o acoplamento do cabo a ser ensaiado diretamente à extremidade do braço do macaco. Assim, para que o movimento angular do braço do macaco fosse convertido em um movimento de translação, utilizou-se um cabo de acoplamento com bitola cerca de 5mm maior do que o cabo de teste apoiado a um par de roldanas. O arranjo é mostrado na Figura 3.28.



Figura 3.28 - Cabo de acoplamento.

3.7.5 – Engate Ancorador (EAN)

Para fixação do cabo de teste na MT, foram confeccionados dois elementos, denominados engates, para facilitar e agilizar a colocação e troca de cabos. Ambos os engates foram confeccionados em aço e são fisicamente idênticos, diferindo apenas em alguns detalhes devido as suas funções. Em ambos há um canal longitudinal através da qual o cabo é passado e travado por meio de um único nó. Há também um furo vazante em formato de “gota” usado para fim de fixação. No caso específico do EAN há quatro furos para fixação do suporte do captador piezoelétrico. O engate deste componente na estrutura é feito por meio um gancho soldado ao tubo da coluna vertical mais afastada do macaco. Na Figura 3.29 é mostrado o EA.

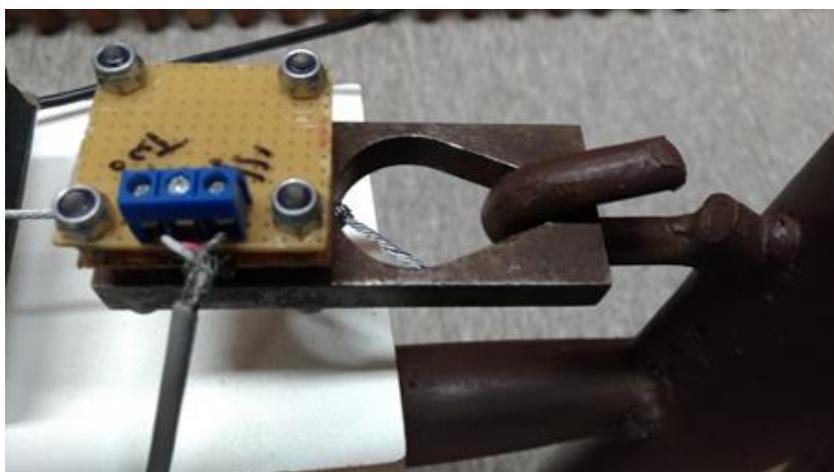


Figura 3.29 - Engate ancorador.

3.7.6 – Suporte para o Captador Piezoelétrico

Para a captação das EA foi criado um dispositivo composto por duas placas de circuito impresso fixadas por meio de quatro parafusos e de porcas. Por meio de uma mola de compressão o captador piezoelétrico é mantido em uma cavidade circular fresada em baixo relevo. A face inferior do captador se mantém pressionada contra a superfície da peça. A mola e o corpo metálico da peça constituem-se os contatos elétricos do captador, cujo sinal fica acessível nos terminais de contato e é levado por intermédio de um cabo blindado ao sistema de processamento.

A blindagem do cabo permite não só o aterramento direto da peça metálica do engate, mas também o da EP como um todo reduzindo em muito a interferência de ruídos eletromagnéticos. A criação do SCP foi de relevante importância, pois este dispositivo possibilita um melhor contato mecânico entre o captador e o suporte, não havendo a necessidade do uso de gel de acoplamento. O SCP resultou na redução do ruído de 60Hz induzido pela rede elétrica e eliminou a necessidade de soldagem de contatos elétricos facilitando em muito a substituição do sensor em caso de avaria. O suporte é mostrado na Figura 3.30.



Figura 3.30 - Suporte para o captador piezoelétrico.

3.7.7 – Engate Tractionador

O engate tracionador é o componente que permite a conexão entre o CAM e o cabo de teste. De modo semelhante ao EAN, permite a fixação da segunda extremidade do cabo de teste. Aqui, o modo de fixação do cabo também se faz por meio de um único nó. O engate possui a movimentação de maneira a permitir o estiramento do cabo (Figura 3.31).



Figura 3.31 - Engate tracionador.

3.7.8 – Plataforma para Captador Magnético

Para que o captador magnético pudesse ser posicionado bem próximo do cabo e captar as EA, uma plataforma de MDF foi afixada na estrutura, aparafusada em duas das cinco hastes de apoio que ficam mais próximos do engate ancorador. Por sua vez, o captador fica fixo na plataforma por dois parafusos. Por meio de porcas é possível ajustar a distância do captador em relação ao cabo (Figura 3.32).



Figura 3.32 - Plataforma para captador magnético.

3.7.9 – Emparelhador do Engate Tracionador

A necessidade de criar este componente surgiu em decorrência de observações durante testes de tracionamento. O emparelhador consiste em duas placas paralelas soldadas em duas hastes. E tem por finalidade servir como guia para o engate tracionador. Este impede o movimento de rotação do cabo que ao ser tracionado, tende a desenrolar suas pernas. Tal movimentação provocava ruídos impulsivos semelhantes à batida secas cuja cadência de repetição se tornava cada vez mais rápida à medida que o nível de tensionamento do cabo aumentava. Esses ruídos poderiam de certa forma atrapalhar o treinamento da rede neural (Figura 3.33).



Figura 3.33 - Emparelhador do engate tracionador.

3.8 – Central de Análise

Denominou-se central de análise o conjunto de equipamentos e programas que foram utilizados com a finalidade de adequar, atuar, analisar e registrar os sinais acústicos para que pudessem ser adequadamente observados/ouvidos e interpretados. A Figura 3.34 mostra a disposição da CA.

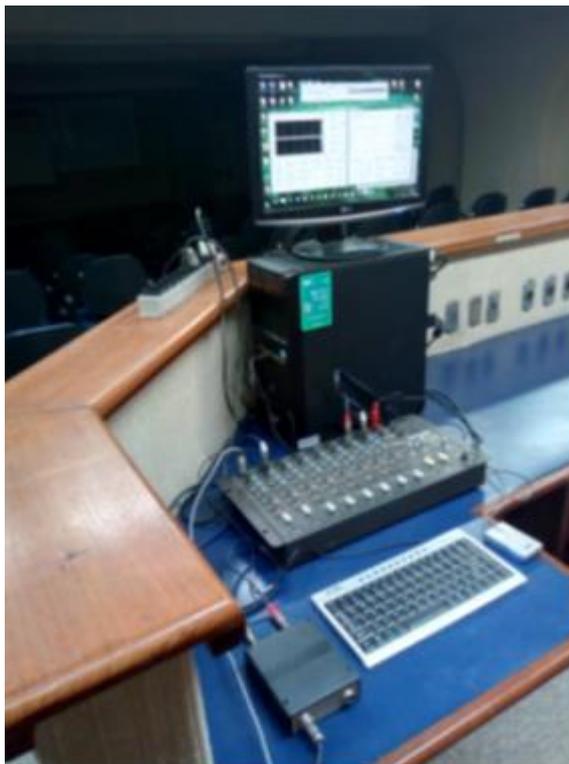


Figura 3.34 - Central de análise.

A fim de que os sinais dos sensores, já pré-amplificados, fossem acondicionados de modo mais adequado possível, tanto para enviá-los para o PC quanto para serem percebidos auditivamente, optou-se pelo uso de um misturador de áudio. Esse equipamento foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho, principalmente no que diz respeito à seleção e testes iniciais dos captadores. O tipo de misturador usado foi um modelo de 8 canais MXS 8S da WATTSOM (Figura 3.35). Além do controle rápido e preciso de volume e ganho, possui controles de equalização em 3 faixas de áudio, o que seria útil para atuar enfatizando ou atenuando características de resposta dos captadores caso houvesse necessidade.



Figura 3.35 - Misturador modelo MXS 8S da WATTSOM.

Do misturador, foram usadas quatro entradas e três saídas, sendo uma delas saída para fone. Os dois primeiros canais de entrada (da esquerda para a direita) foram usados para receberem os sinais captados com os sensores piezoelétrico e magnético, respectivamente. O sétimo e o oitavo canais de entrada foram conectados por meio de um cabo estéreo à saída de áudio R e L da placa do computador. Um segundo cabo estéreo foi usado para enviar os sinais gerais de saída R e L do misturador para a entrada de linha da placa do computador. Essas saídas gerais são controladas individualmente pelos dois últimos pares de controles de volume deslizantes brancos. A terceira saída (estéreo) do misturador foi conectada por cabos a duas caixas acústicas para que os sons captados durante o tracionamento de um cabo pudessem ser ouvidos em tempo real ou posteriormente. Uma vez efetuados os ajustes individuais de volumes para cada captador é possível ajustar e estabelecer amplitudes adequadas e similares para serem então, enviados para a etapa seguinte realizada via programa.

3.8.1 – Programa Realtime Analyser

O Realtime Analyser (Yoshimasa Eletronic Inc) foi instalado em um PC para que todas as auscultas pudessem ser monitoradas, analisadas e gravadas. Foi uma ferramenta fundamental de análise, pois dispensou gastos elevados na aquisição de um osciloscópio e um analisador de espectros FFT. A tela do módulo simulador de osciloscópio de dois canais é mostrada na Figura 3.36.

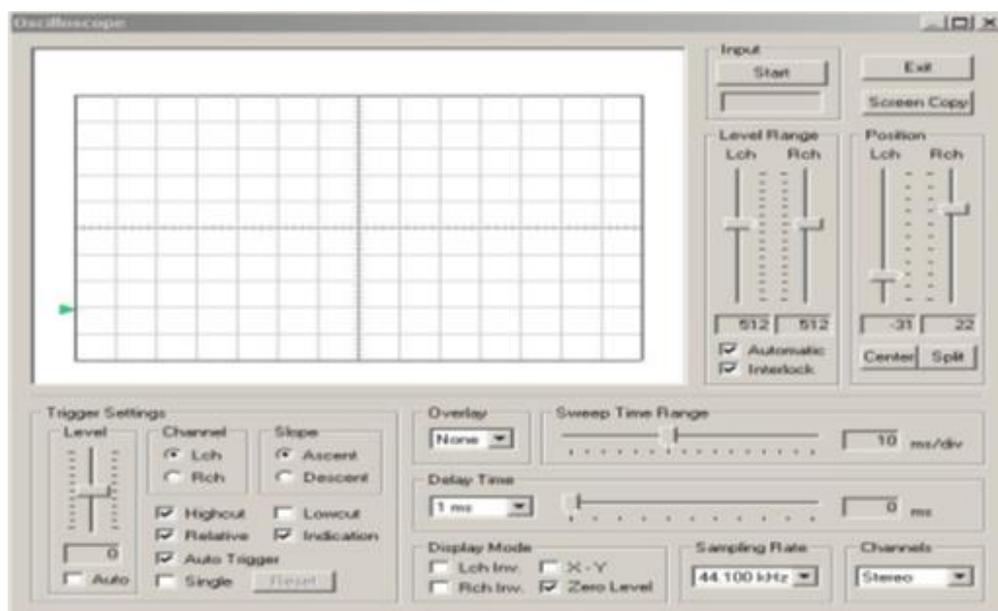


Figura 3.36 - Tela do módulo FFT no Modo power spectrum

Os sinais do captador magnético e do captador piezoelétrico foram enviados cada um para um canal específico do osciloscópio.

Para observação dos sinais no domínio da frequência, foi utilizado o módulo FFT basicamente em duas formas de exibição: espectrograma e power spectrum. As respectivas telas para esses dois modos de exibição são mostradas na Figura 3.37 e Figura 3.38.

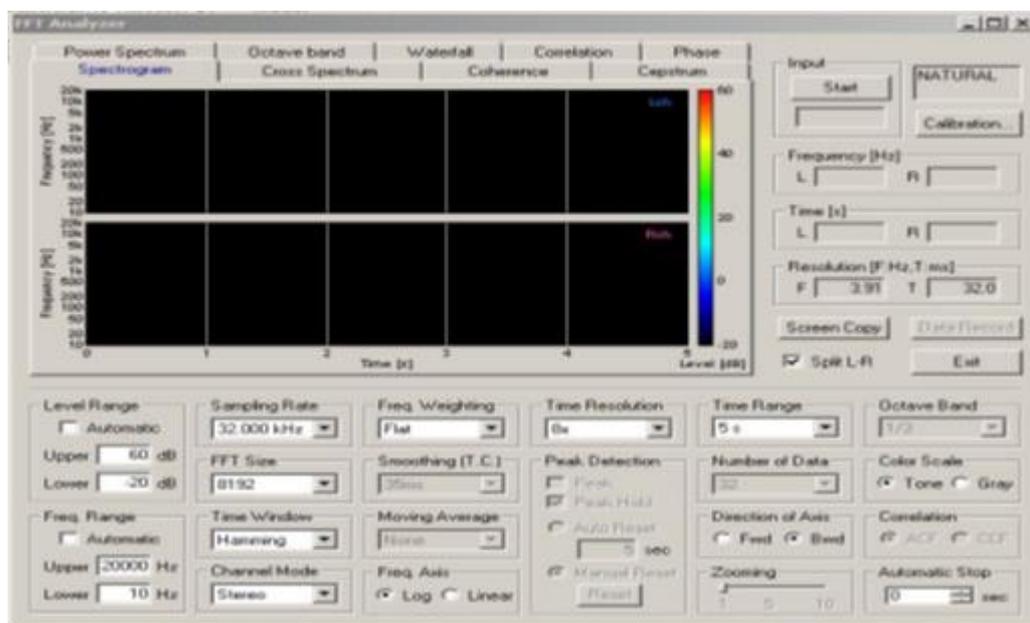


Figura 3.37 - Tela do módulo FFT no Modo espectrograma.

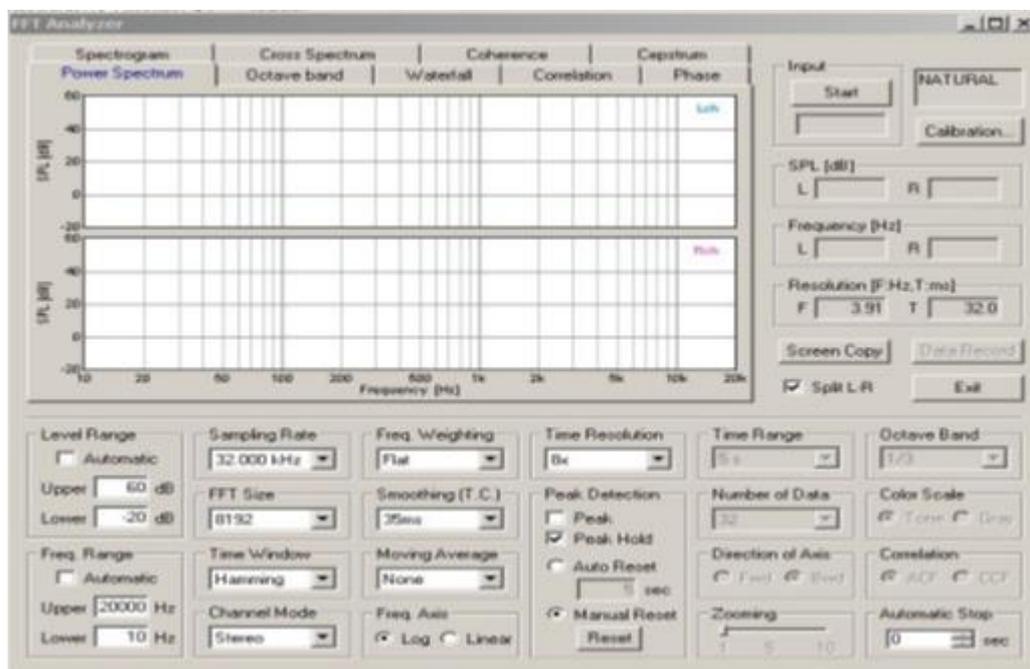


Figura 3.38 - Módulo do power spectrum.

As Figuras 3.37 e 3.38 têm apenas caráter ilustrativo. Uma vez escolhidos os diversos parâmetros de ajustes ideais, estes foram fixados e mantidos para todos os

testes. A lista dos parâmetros do Analisador FFT é mostrada na Tabela 2 e do Osciloscópio na Tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros do Analisador FFT.

Analisador FFT	
Parâmetro	Ajustes
Level range	Upper -30dB; Lower -50dB
Freq range	Upper 20000Hz; Lower 20Hz
Sampling Rate	44100kHz
FFT Size	16384
Time Window	Hamming
Channel Mode	Stereo
Freq. Weigting	Flat
Smoothing (T.C)	None
Moving Average	None
Freq. Axis	Log
Time Resolution	8x
Peak Hold	yes
Auto reset	yes
Time range	5s
Number of Data	32

Tabela 3 - Parâmetros do Osciloscópio.

Osciloscópio	
Parâmetro	Ajustes
Trigger level	Auto
Channel	Rch
Highcut	no
Relative	yes
Auto Trigger	yes
Single	no
Slope	Descendent
Lowcut	yes
Indication	yes
Overlay	1ms
Sweep time Range	2ms/div
Delay time	1ms
Display mode	Zero Level
Sampling Rate	44100kHz
Channles	Stereo

3.8.2 – Determinação da Resposta de Frequência da Central de Análise

Com o intuito de se avaliar a banda útil para observações dos fenômenos acústicos detectados pelos captadores, foi realizado um teste de resposta do conjunto misturador de áudio e placa de áudio do computador. O teste foi feito com o uso de um gerador senoidal externo conectado a uma das entradas do misturador de áudio. O gerador foi ajustado para uma amplitude fixa e feita uma varredura manual de frequências indo de 10Hz a 100kHz. No teste, verificou-se que a banda útil do conjunto ficou em torno de 20kHz (Figura 3.39).

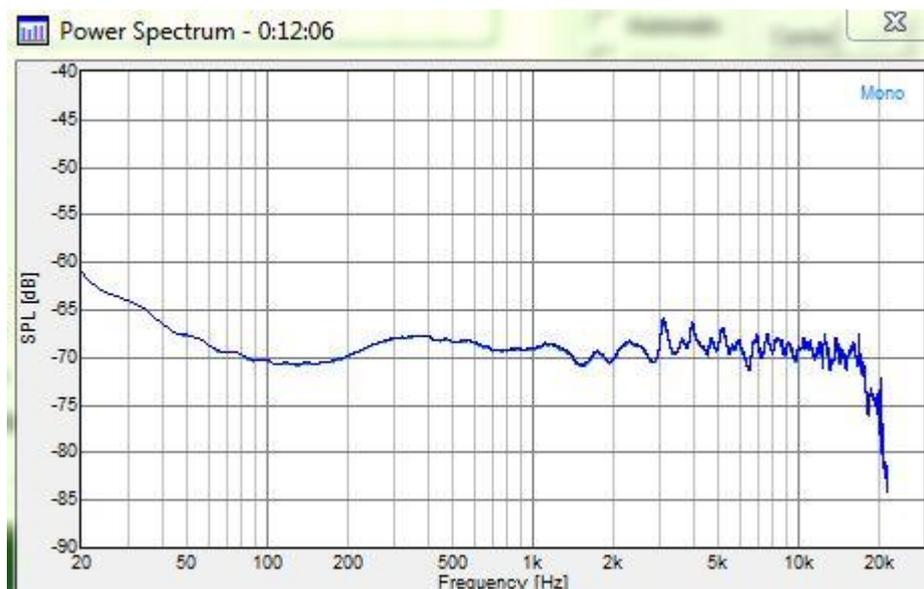


Figura 3.39 - Limite de banda útil do sistema.

3.8.3 – Audacity

O Audacity é um editor e gravador de áudio multi-track gratuito para Windows, Mac OS X, GNU / Linux e outros sistemas operacionais. A Figura 3.40 ilustra sua tela.

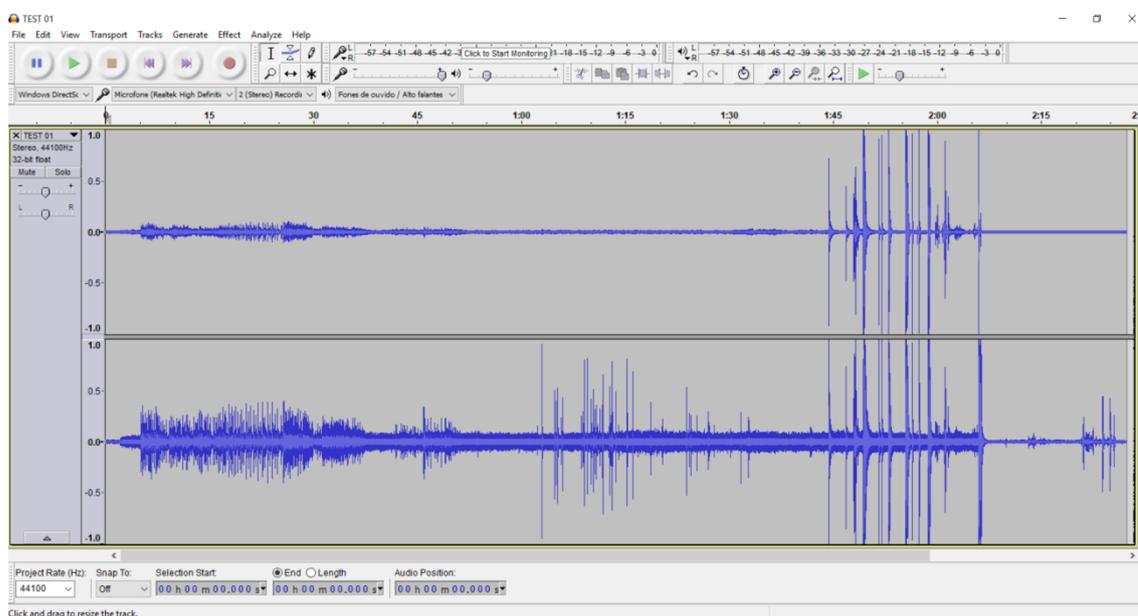


Figura 3.40 - Tela do programa Audacity.

O Audacity é uma ferramenta livre que permite editar e mixar qualquer arquivo de áudio nos formatos WAV, AIFF, MP3 e OGG. Estes arquivos podem ser tanto

gravados por meio de microfone ou entrada de linha quando importados de algum arquivo.

Este software foi útil na edição dos registros a fim de selecionar e isolar eventos de sinais positivos e negativos de rompimento do cabo de aço.

3.9 – Software de Processamento de Sinais

O software de reconhecimento tem por objetivo a detecção, em tempo real, da ruptura de arames ou perna de um cabo de aço a partir dos sinais de áudio capturados da entrada auxiliar do computador.

A linguagem de programação Python foi utilizada para desenvolver o software de reconhecimento.

Para otimização do tempo de execução do software de reconhecimento ele foi dividido em vários pequenos softwares, de forma a poder ser executada por uma única pessoa ou por uma equipe. Abaixo estão listados todos os códigos fonte que fazem parte do software, assim como suas respectivas parametrizações:

- 1) sound-spectrum_wmo_captura_FFT1
- 2) plotagem6_wmo_selecao_VF1
- 3) sound-spectrum_wmo_captura_Falso_FFT1
- 4) NeuralNetwork_Treinamento1
- 5) NeuralNetwork_Treinamento_full
- 6) sound-spectrum_wmo_Sem_captura_FFT1
- 7) sound-spectrum_wmo_tempo_real1

3.9.1 – sound-spectrum_wmo_captura_FFT1

Esta parte do código é a responsável por fazer a captura, a partir da entrada de linha do computador, do sinal de áudio e transformá-lo em uma matriz de números em ponto flutuante (números com frações).

Para fazer esta captura, a biblioteca do python chamada pyaudio foi utilizada. Esta biblioteca trabalha com várias configurações, dependendo do objetivo com que ela é inicializada, como por, exemplo o número de canais, a taxa de captura, etc.

Para este trabalho ela foi inicializada para capturar os sinais da entrada auxiliar de um computador. A Figura 3.41 ilustra sua inicialização.

```
stream = p.open(format=FORMAT,  
                channels=CHANNELS,  
                rate=RATE,  
                input=True,  
                frames_per_buffer=BUF_SIZE,  
                input_device_index=1  
                )
```

Figura 3.41 - Inicialização da stream de audio.

O primeiro parâmetro, “format”, é utilizado para definir com qual formato de dados a stream irá trabalhar, se é um valor em ponto flutuante ou um valor inteiro. Neste caso foi configurado com um valor inteiro de 16 bits (pyaudio.paInt16). O segundo parâmetro, “channels”, é o número de canais que serão abertos para captura. Como foram utilizados dois sensores de captura, o captador magnético e o piezoelétrico, foi necessário abrir dois canais, um para cada dispositivo.

O terceiro parâmetro, “rate”, é o número de amostras capturadas por segundo. Foi definido com 2000. O quarto parâmetro é definido se a stream será uma entrada ou uma saída de áudio. Como foi processado os sinais que entram no computador, ela foi configurada como entrada, “input=True”. Todas estas streams de captura trabalham com blocos de dados denominados “chunk” que é o quinto parâmetro, “frames_per_buffer”. Foi definido este chunk com 2048 bytes.

O último parâmetro, “input_device_index”, seleciona o dispositivo físico pelo qual o áudio será capturado. Em um computador existem vários dispositivos de entrada e saída. A gerencia destes dispositivos é feito pelo sistema operacional (SO). Para saber qual valor o SO associou à entrada auxiliar, foi necessária a instalação de uma biblioteca em python chamada sounddevice que lista todos os dispositivos do computador. Uma vez listados, foi possível constatar que a entrada auxiliar foi reconhecida como dispositivo 1 pelo SO (Figura 3.42).

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\Weverson>python -m sounddevice
0 Mapeador de som da Microsoft - Input, MME (2 in, 0 out)
> 1 Entrada (Dispositivo de High De, MME (2 in, 0 out))
< 2 Mapeador de som da Microsoft - Output, MME (0 in, 2 out)
3 Fones de ouvido (Dispositivo de, MME (0 in, 2 out)
4 Áudio Digital (S/PDIF) (Disposi, MME (0 in, 2 out)
5 Alto-falantes (Dispositivo de H, MME (0 in, 2 out)
6 Driver de captura de som primário, Windows DirectSound (2 in, 0 out)
7 Entrada (Dispositivo de High Definition Audio), Windows DirectSound (2 in, 0 out)
8 Driver de som primário, Windows DirectSound (0 in, 2 out)
9 Fones de ouvido (Dispositivo de High Definition Audio), Windows DirectSound (0 in, 2 out)
10 Áudio Digital (S/PDIF) (Dispositivo de High Definition Audio), Windows DirectSound (0 in, 2 out)
11 Alto-falantes (Dispositivo de High Definition Audio), Windows DirectSound (0 in, 2 out)
12 Fones de ouvido (Dispositivo de High Definition Audio), Windows WASAPI (0 in, 2 out)
13 Áudio Digital (S/PDIF) (Dispositivo de High Definition Audio), Windows WASAPI (0 in, 2 out)
14 Alto-falantes (Dispositivo de High Definition Audio), Windows WASAPI (0 in, 2 out)
15 Entrada (Dispositivo de High Definition Audio), Windows WASAPI (2 in, 0 out)
16 Microfone (Captura Mista de HD Audio), Windows WDM-KS (2 in, 0 out)
17 Headphones (Fone de Ouvido de HD Audio), Windows WDM-KS (0 in, 2 out)
18 SPDIF Out (Saída de SPDIF de HD Audio), Windows WDM-KS (0 in, 2 out)
19 Speakers (Alto-falante de HD Audio), Windows WDM-KS (0 in, 2 out)

C:\Users\Weverson>

```

Figura 3.42 - Listagem dos dispositivos de entrada e saída do computador.

A próxima etapa de processamento da stream de áudio foi a geração de sua FFT. A biblioteca numpy foi a responsável pela conversão da stream de áudio capturada em uma matriz de pontos flutuante, separando cada canal em uma matriz distinta. A Figura 3.43 ilustra parte do código no qual a biblioteca numpy faz a conversão destas matrizes gerando suas FFT. A primeira linha faz a conversão do canal esquerdo, enquanto a segunda linha do canal direito.

```

Y_L = np.fft.fft(y_L, nFFT)
Y_R = np.fft.fft(y_R, nFFT)

```

Figura 3.43 - Geração da FFT dos canais esquerdo e direito.

Todo o processamento em tempo real do software é exibido na tela para que o usuário possa acompanhar e identificar no domínio da frequência, os sinais emitidos pelo cabo de aço. A biblioteca em python responsável pela exibição destes sinais é a matplotlib. A Figura 3.44 ilustra uma saída de tela em tempo real sendo exibida.

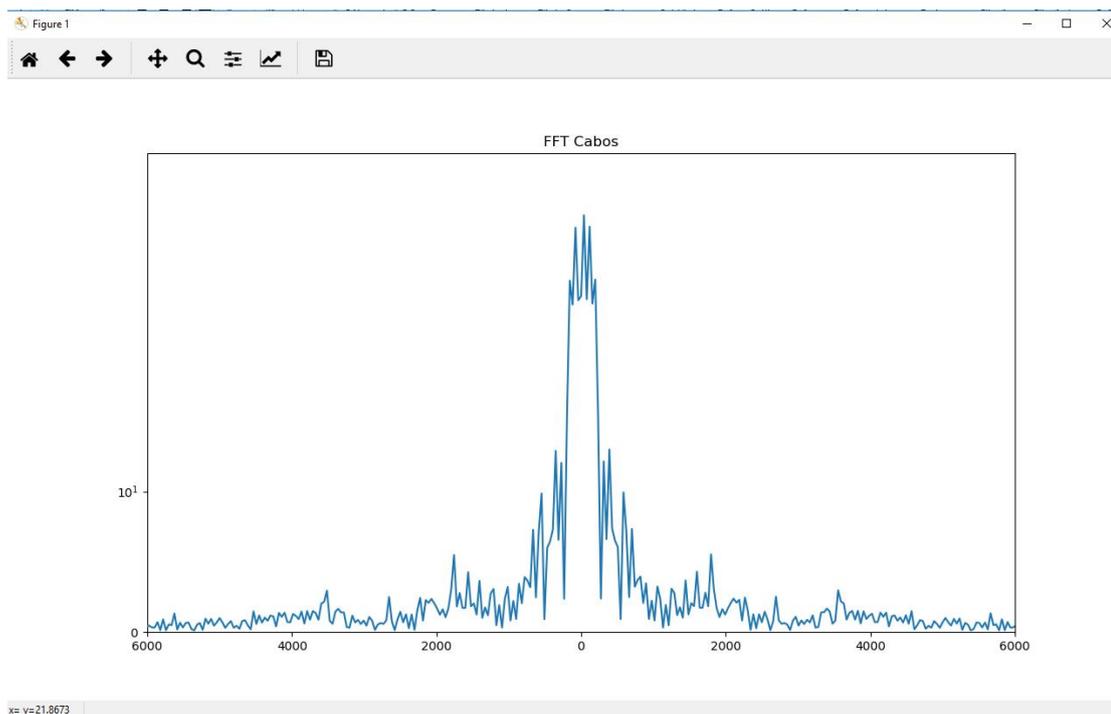


Figura 3.44 - Tela de captura dos sinais de entrada (sound-spectrum_wmo_captura_FFT1).

Como este software funciona por módulos separados, todas as amostras de FFT são armazenadas em uma pasta específica para posterior seleção, pelo usuário, de quais sinais são positivos e quais são negativos. Para armazenar estas amostras em arquivo foi utilizada a biblioteca json, que facilita a comunicação entre os diferentes módulos do software. A Figura 3.45 ilustra parte do código responsável pelo armazenamento, em tempo real, das amostras da FFT. A Figura 3.46 ilustra este armazenamento no diretório “pesos” com 997 amostras.

```
json.dump(b, codecs.open('./pesos/peso'+str(flagjason)+'.json', 'w', encoding='utf-8'), separators=(',', ':'), sort_keys=True, indent=0)
```

Figura 3.45 - Trecho do código utilizando para armazenar as FFT em arquivos para posterior processamento pela rede neural.

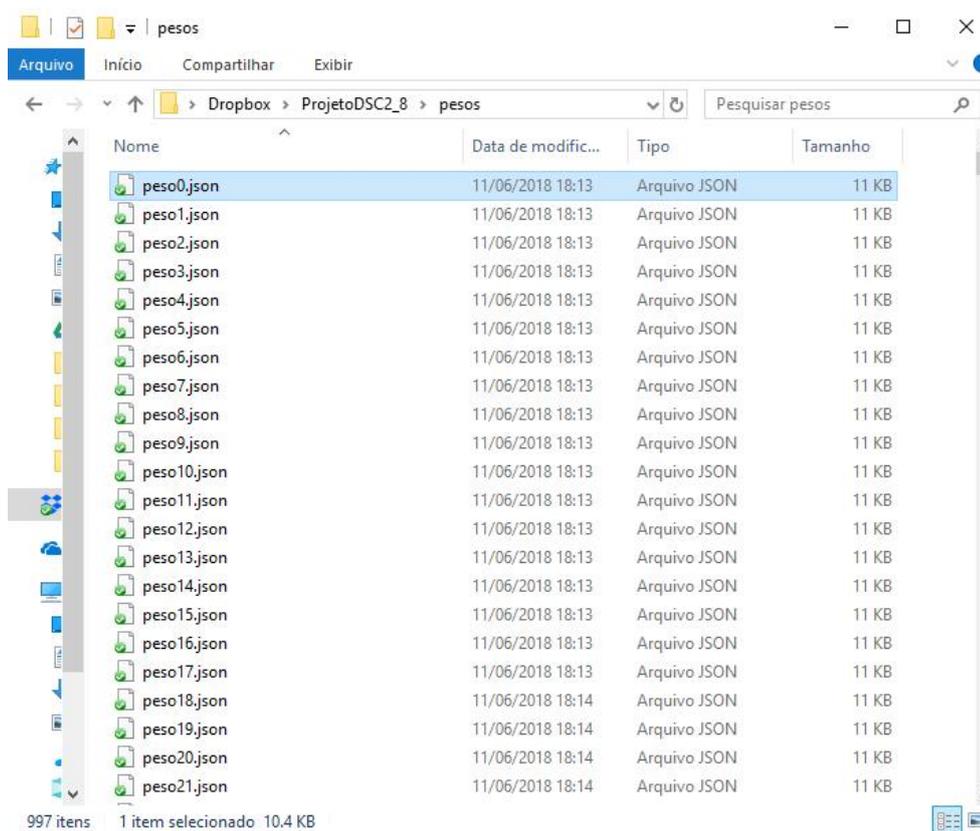


Figura 3.46 - Diretório de armazenamento das amostras da FFT capturadas em tempo real.

3.9.2 – Plotagem6_wmo_selecao_VF1

Este segundo módulo do software exibe de forma sequencial (adiantar (tecla “M”) ou retroceder (tecla “N”)) todas as amostras das FFT salvas em arquivos na pasta “pesos” pela etapa anterior, spectrum_wmo_captura_FFT1. Isso é feito para que o usuário possa selecionar os sinais positivos e os negativos. Toda esta seleção é feita através do teclado ao qual foi atribuída a tecla “A” para os sinais positivos, ou verdadeiros, e a tecla “B” para os sinais negativos, ou falsos (Figura 3.47). Uma vez selecionado o arquivo, uma cópia é feita para uma pasta específica correspondente à seleção, pasta “true” para os positivos, e pasta “false” para os negativos. Estas pastas são os locais em que a rede neural irá “procurar” pelos exemplos de sinais para seu treinamento no modo supervisionado.

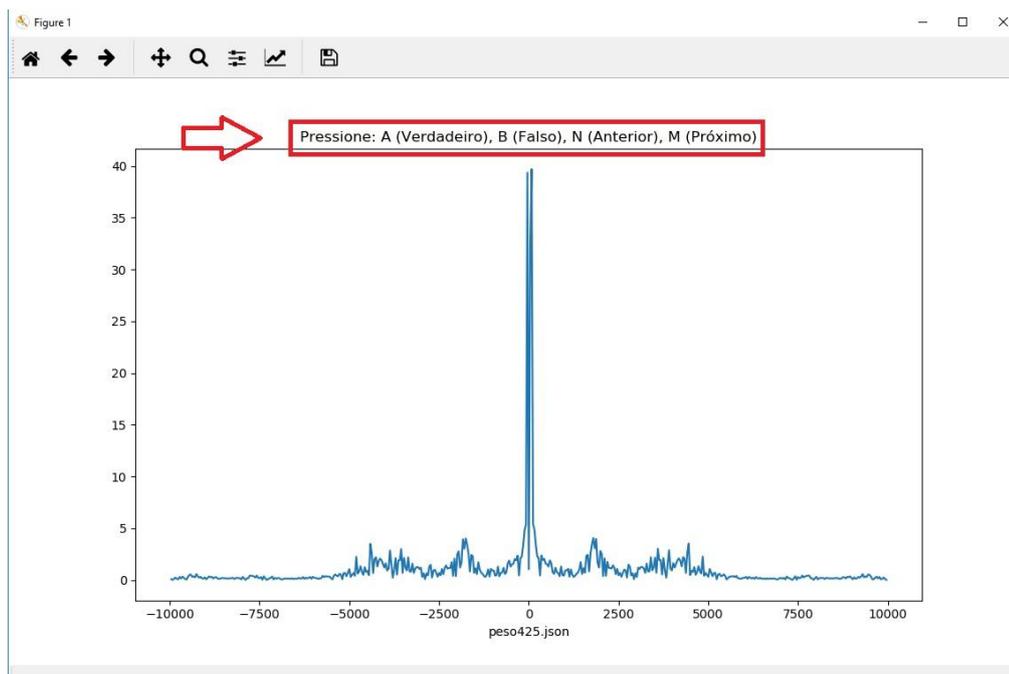


Figura 3.47 - Tela de seleção dos sinais de entrada.

3.9.3 – sound-spectrum_wmo_captura_Falso_FFT1

Esta etapa do software, opcional, foi utilizada para otimizar o processo de seleção dos valores falsos. Durante os testes o tempo de gravação dos valores falsos foi muito superior aos dos positivos, gerando uma grande quantidade de arquivos falsos e o processo de seleção de um por um ficou muito demorado; uma forma para diminuir este tempo de seleção foi gerar um único arquivo de áudio só com sinais falso, assim todas as amostras capturadas são armazenadas diretamente na pasta “false”. A Figura 3.48 exibe o arquivo de áudio original com as amostras selecionada que foi copiado e colado em um único arquivo. A Figura 3.49 exibe o arquivo com os valores falsos. Para selecionar as amostras dos trechos negativos, copiar e colar em um novo arquivo foi utilizado o programa Audacity. Este módulo, além de otimizar o processo de seleção dos valores falsos, não é necessário a alteração da taxa de captura do código principal, sound-spectrum_wmo_captura_FFT1.

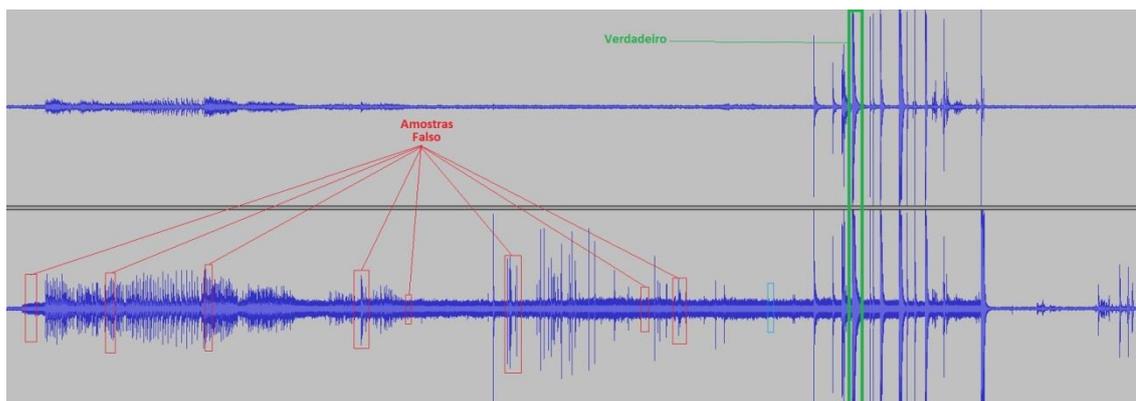


Figura 3.48 - Arquivos original ilustrando algumas amostras de negativo e um positivo.

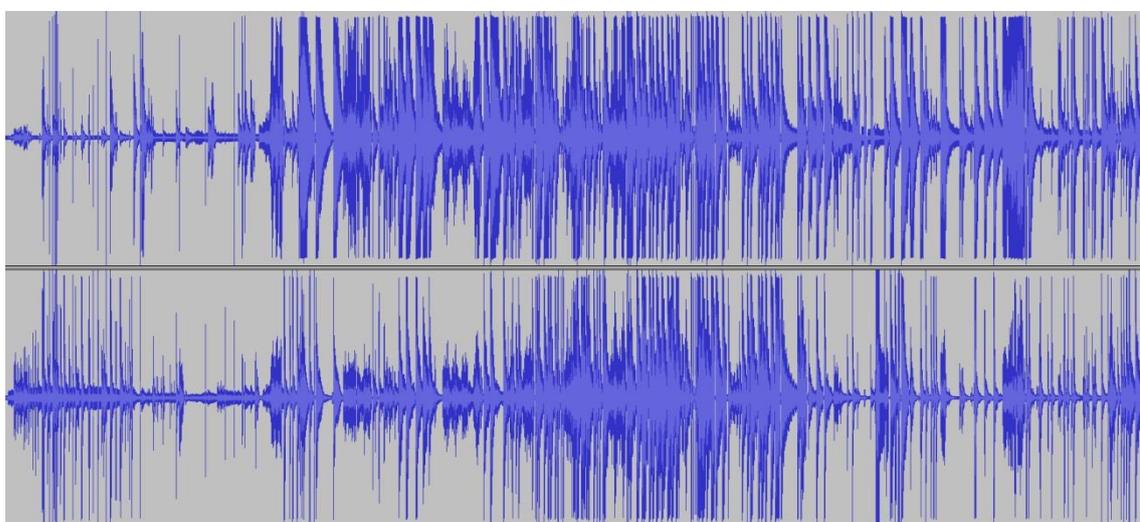


Figura 3.49 - Arquivos com sinais somente negativos.

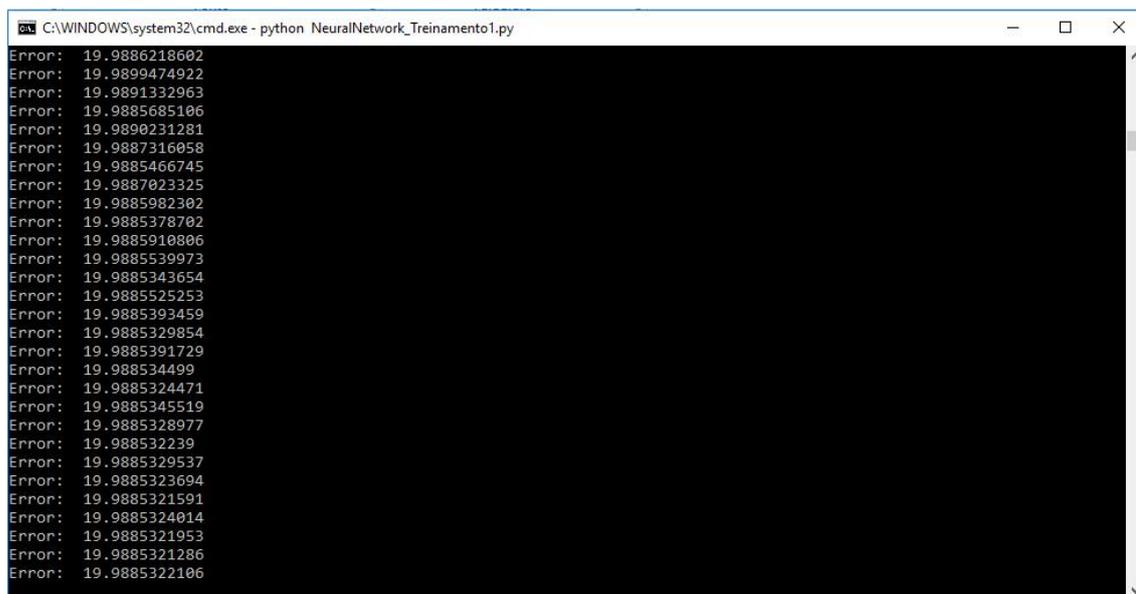
3.9.4 – NeuralNetwork_Treinamento1

Nesta etapa, o treinamento da RN foi feito com as matrizes salvas da etapa anterior pelo software Plotagem6_wmo_selecao_VF1. Uma característica deste módulo é que ele foi gerado para testar amostra por amostra de som capturado com o objetivo de validar se o resultado obtido do treinamento da rede é satisfatório. Uma vez validado, os pesos que estão nas pastas “true” e “false” são copiados para uma pasta temporária para se juntar a outros resultados de outras amostras para posterior processamento pela RN final usando o software NeuralNetwork_Treinamento_full.

Este módulo consta de uma RN multicamadas com 512 neurônios em sua entrada, contendo duas camadas ocultas, com 50 neurônios na primeira e 30 na se-

gunda, e um único neurônio em sua camada de saída. O algoritmo de treinamento utilizado foi o backpropagation e sua função de ativação foi a sigmoide.

A RN foi configurada de modo que seu resultado atingisse uma precisão de duas casas decimais. A Figura 3.50 ilustra a tela de exibição do programa durante o treinamento da RN, enquanto que na Figura 3.51 ilustra um dos arquivos de entrada.

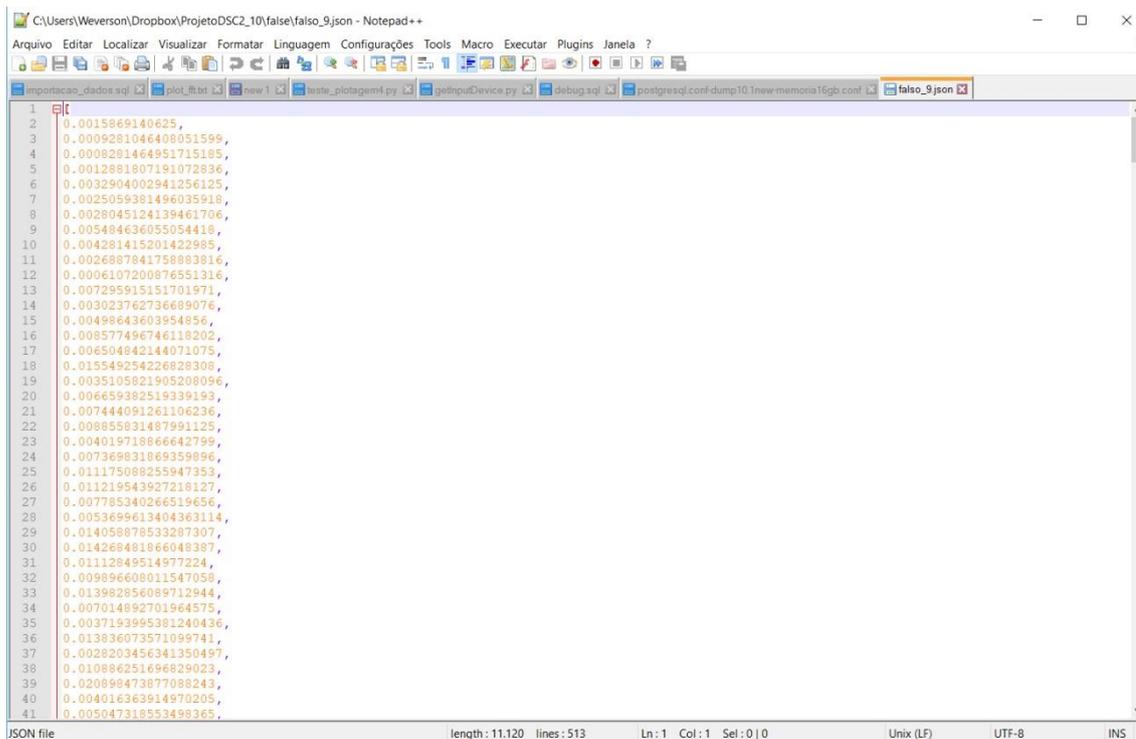


```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - python NeuralNetwork_Treinamento1.py
Error: 19.9886218602
Error: 19.9899474922
Error: 19.9891332963
Error: 19.9885685106
Error: 19.9890231281
Error: 19.9887316058
Error: 19.9885466745
Error: 19.9887023325
Error: 19.9885982302
Error: 19.9885378702
Error: 19.9885910806
Error: 19.9885539973
Error: 19.9885343654
Error: 19.9885525253
Error: 19.9885393459
Error: 19.9885329854
Error: 19.9885391729
Error: 19.988534490
Error: 19.9885324471
Error: 19.9885345519
Error: 19.9885328977
Error: 19.988532239
Error: 19.9885329537
Error: 19.9885323694
Error: 19.9885321591
Error: 19.9885324014
Error: 19.9885321953
Error: 19.9885321286
Error: 19.9885322106

```

Figura 3.50 - Treinamento de uma rede neural (NeuralNetwork_Treinamento1).



```

C:\Users\Wveverson\Dropbox\ProjetoDSC2_10\false\false_9.json - Notepad++
Arquivo Editar Localizar Visualizar Formatar Linguagem Configurações Tools Macro Executar Plugins Janela ?
importacao_dados.sql | plot_fit.br | new 1 | teste_plotagem1.py | gettopDevice.py | debug.sql | postgresql.conf.dump.10.new.memoria.16gb.conf | falso_9.json
1 |
2 | 0.0015869140625,
3 | 0.000928104640051599,
4 | 0.0008281464951715185,
5 | 0.0012881807191072836,
6 | 0.0032904002941256125,
7 | 0.0025059381496035918,
8 | 0.0028045124139461706,
9 | 0.005484636055054418,
10 | 0.004281415201422985,
11 | 0.0026887841758883816,
12 | 0.0006107200876551316,
13 | 0.007295915151701971,
14 | 0.003023762736689076,
15 | 0.00498643603954856,
16 | 0.008577496746118202,
17 | 0.006504842144071075,
18 | 0.015549254226828308,
19 | 0.0035105821905208096,
20 | 0.006659382519339193,
21 | 0.007444091261106236,
22 | 0.00885831487991125,
23 | 0.004019718866642759,
24 | 0.007369831869359896,
25 | 0.011175088255947353,
26 | 0.011219543927218127,
27 | 0.007785340266519656,
28 | 0.0053699613404363114,
29 | 0.014058878533287307,
30 | 0.014268481866048387,
31 | 0.01112849514977224,
32 | 0.009896608011547058,
33 | 0.013982856089712944,
34 | 0.007014892701964575,
35 | 0.0037193995381240436,
36 | 0.013836073571099741,
37 | 0.0028203456341350497,
38 | 0.010886251696829023,
39 | 0.02089947387708243,
40 | 0.004016363914970205,
41 | 0.005047318553499365,
JSON file | length: 11,120 | lines: 513 | Ln: 1 | Col: 1 | Sel: 0 | 0 | Unix (LF) | UTF-8 | INS

```

Figura 3.51 - Arquivo de entrada da RN.

3.9.5 – NeuralNetwork_Treinamento_full

Para o treinamento da rede com base em vários ensaios de rompimento foi necessária a geração de um código para processar os resultados positivos e negativos de todos os experimentos realizados. Esta etapa teve como resultado a geração dos pesos para a rede neural final que tem a função de processar os sinais de entrada em tempo real.

Neste processo, o software buscou nas pastas “false” e “true” o resultado das seleções anteriores para seu treinamento total. Quando terminado o treinamento, os pesos finais da RN foram gerados e armazenados na pasta “pesoredetreinada”. A Figura 3.52 ilustra o sistema de diretórios utilizado pelo software. A Figura 3.53-a exhibe conteúdo da pasta true e Figura 3.53-b exhibe o conteúdo da pasta false.

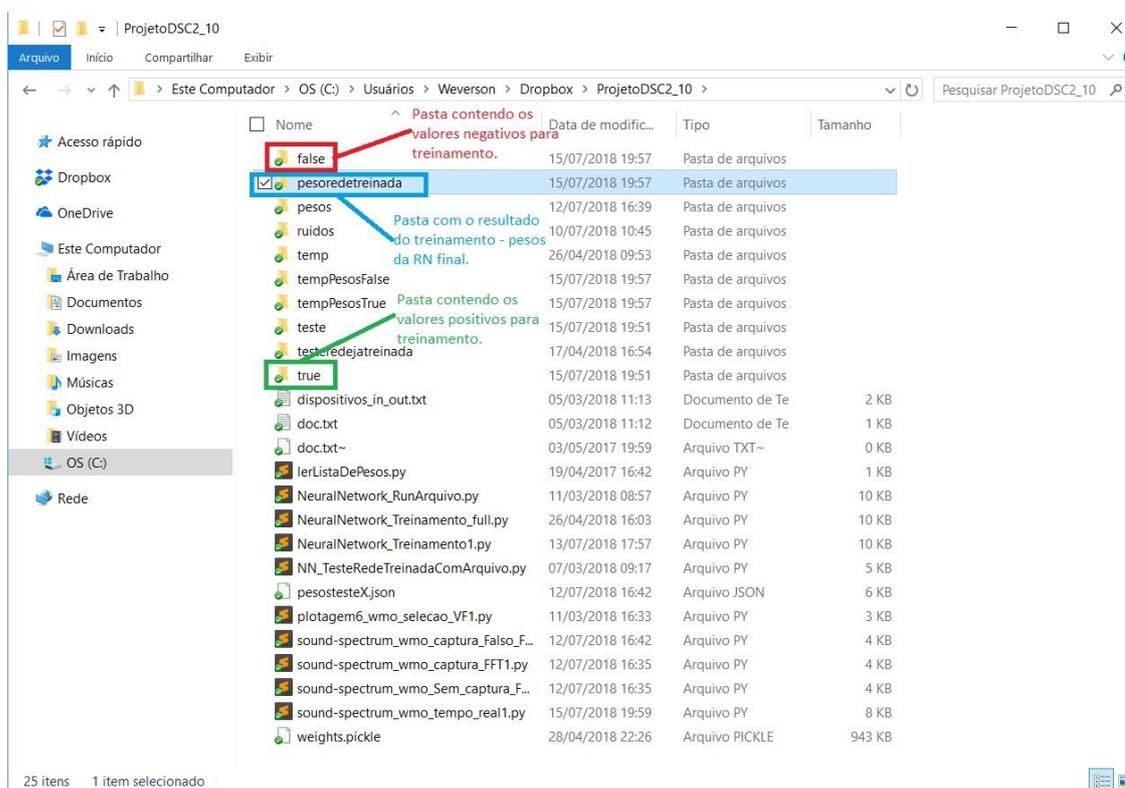


Figura 3.52 - Sistema de arquivos utilizado pelo NeuralNetwork_Treinamento_full.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o treinamento das redes neurais foram utilizadas 1379 amostras negativas e 213 positivas que convergiram para uma precisão de duas casas decimais em 36h.

Após a RN ter sido treinada, foram realizados vários ensaios de tracionamento supervisionado pelo programa em tempo real, utilizando para isso a MT. O tracionamento do cabo era aumentado progressivamente, até que alguma sinalização de ruptura fosse alertada pelo software. Um exemplo desta sinalização pode ser visto na Figura 4.1.

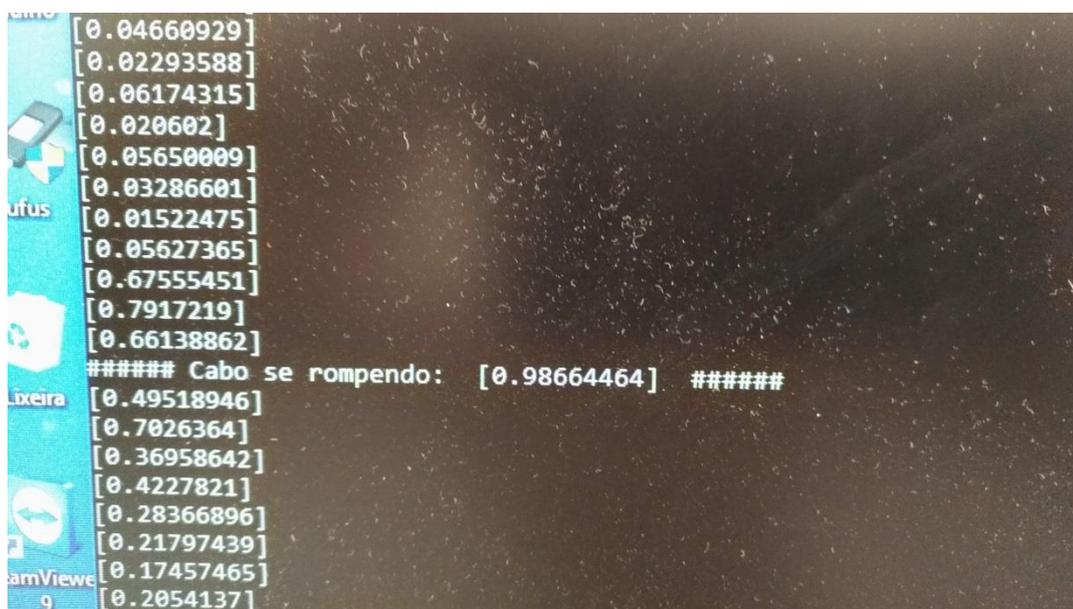


Figura 4.1 - Sinalização.

Após o sinal do software, o tracionamento era interrompido e o cabo era inspecionado para verificar se algum rompimento tinha ocorrido. O resultado da sinalização pode ser visto na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Cabo inspecionado.

Foram realizados 98 testes de ruptura e constatou-se que em 100% dos casos a ruptura ocorreu no nó em uma das extremidades do cabo (Figura 4.3).

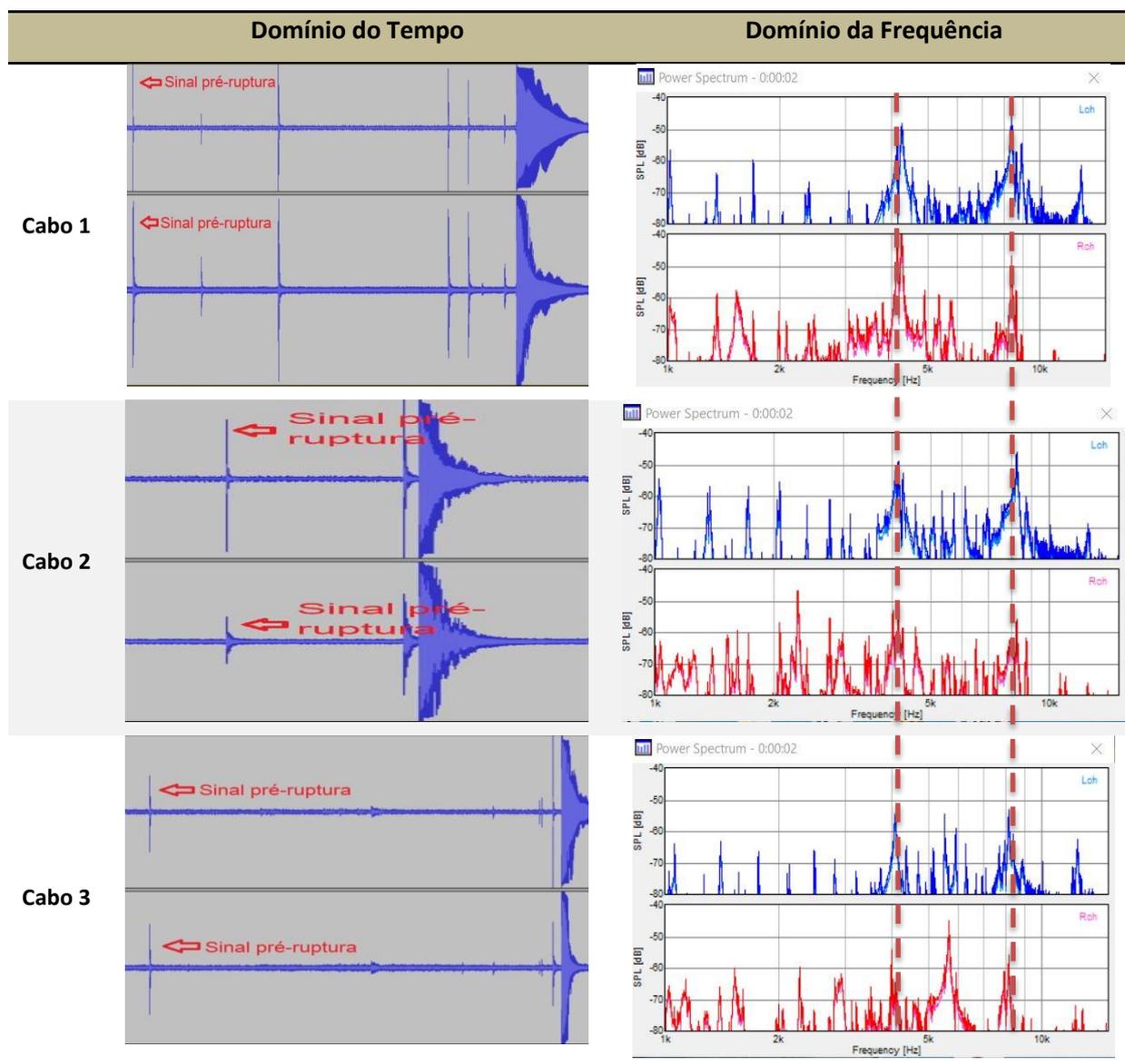


Figura 4.3 - Extremidade.

A eficiência da RN mostrou-se dependente da correta seleção e edição das amostras positivas e negativas.

Ficou evidenciado durante os testes um fato de extrema relevância: em todos os ensaios foi verificado um padrão de EA muito bem definido, principalmente caracterizado no domínio da frequência, que a partir daqui é denominado como “sinal de pré-ruptura” (SPR). A título de exemplo, a Tabela 4 mostra três SPR escolhidos aleatoriamente dentre o conjunto de todos os ensaios registrados.

Tabela 4 – Exemplos de ensaios.



Pode ser verificado pelas linhas tracejadas que o fenômeno SPR é bem caracterizado por duas frequências dominantes em torno de 4kHz e 8kHz.

Há indícios de que os SPRs estão associados à ruptura de arames que compõem as pernas do cabo.

A impossibilidade de fazer tal constatação se deve à dificuldade em se desfazer o nó dado no cabo sem produzir alguma avaria no cabo, mascarando assim à identificação visual da ruptura do arame de uma das pernas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Esta tese de doutorado teve como finalidade o desenvolvimento de um aparato de detecção, em tempo real, de rompimento de arames em um cabo de aço. Todas as etapas de construção e calibração foram concluídas e este equipamento pôde ser dividido em três partes distintas: Hardware mecânico, hardware eletrônico e software.

- Hardware mecânico

O hardware mecânico foi o responsável pelo acoplamento do cabo de aço e seu tensionamento. O cabo utilizado nos testes suportou uma carga máxima por volta de 2000N, nos testes feitos pela INSTRON.

- Hardware eletrônico

Possibilitou equalizar e misturar os sinais captados tanto pelo captador magnético como pelo piezoelétrico. Uma característica do misturador foi a possibilidade de se conectar outros tipos de sensores para processamento simultâneo dos sinais.

- Software

O sistema de software permitiu diversos testes de configurações em sua estrutura. Este sistema pode ser adaptado para funcionar em diversos materiais bastando somente alrear os pesos da RN.

- Os ensaios de ruptura do cabo na MT demonstraram que o cabo de aço, ao ser tracionado, rompe-se gradualmente, perna por perna. O sistema foi capaz de detectar e de reconhecer esses eventos de ruptura das pernas. Contudo, as emissões acústicas indicaram que pouco antes de cada EA de ruptura da perna, ocorre um pequeno evento que foi denominado de SPR. Há a hipótese de que esse sinal indique a ruptura de um arame individual da perna que se rompe logo em seguida. Tal hipótese deve ser confirmada para que o SPR passe a ser incluído no sistema de reconhecimento. Isto possibilitaria reduzir a taxa de erros do sistema.

O sistema completo permitiu testar e executar em tempo real o rompimento dos arames de um cabo de aço; sua eficiência na detecção mostrou-se dependente da qualidade de edição e seleção das amostras positivas e negativas para o treinamento da RN.

Também foi observado um SPR caracterizado por duas frequências dominantes em torno de 4kHz e 8kHz; há indícios de que os SPRs estão associados à ruptura de arames que compõem as pernas do cabo.

CAPÍTULO 6

MELHORAMENTOS FUTUROS

Durante os testes realizados foram feitas várias anotações no intuito de melhorar tanto o hardware como o software de processamento de sinais, seguem as melhorias sugeridas:

6.1 – Melhoramentos nos Softwares de Processamento de Sinal

- Exibição dos níveis de sinais de entrada juntamente com a FFT e possivelmente também do espectograma.
- Gravação dos áudios captados em arquivos para posterior processamento e comparações. Neste projeto as gravações foram feitas por softwares de terceiros.
- No atual modelo o software é composto por vários arquivos que trabalham independentes. Sugere-se a integração de todos os módulos do softwares em uma única interface amigável com a qual o usuário final possa gerenciar cada etapa do processo sequencialmente.
- Gerar uma RN evolutiva temporal baseada na análise de várias amostras acumuladas em sequência durante um evento de ruptura.

6.2 - Melhoramentos no Hardware Mecânico

- Construir uma garra universal com sensor híbrido.
- Adicionar um painel digital com botões para se inserir os parâmetros de controle do equipamento, desta forma facilitando o trabalho e o acompanhamento do status atualizado da máquina.
- Controlar de forma automática a rotação do motor de tracionamento através de uma retroalimentação do PWM. Todas as vezes que há exigência de um maior torque do motor há queda de rotação e é necessária a compensação manual dos pulsos do PWM através de um potenciômetro.
- Adicionar chave de fim de curso para parada automática do motor quando o braço do macaco atingir uma determinada posição. Uma vez que o cursor do maca-

co chega ao seu fim é necessário desligar o motor. Não havendo um controle automatizado disto, pode ocorrer o não desligamento do motor e este aquecer e ser danificado.

- Adicionar uma célula de carga (CC). Necessário para o acompanhamento da força de tracionamento em tempo real. O valor desta média seria exibido no painel do instrumento.

- Adicionar roldanas no suporte do captador piezoelétrico.

6.3 – Melhoramentos no Hardware Eletrônico

- Migração do software para um sistema embarcado.

- Utilização de circuitos eletrônicos que trabalhem sinais em uma banda de frequência mais larga, permitindo o processamento de emissão acústicas situadas em faixas de alta frequência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assagra, Y. A. (2015). *Novas metodologias para a fabricação de piezoelretos termo-formados*. Tese (Doutorado em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Bandeira, G., Abreu, G. d., & Gianelli, R. (2010). *Vibração e Ruído em Manutenção Preditiva*. Trabalho de Manutenção Industrial de Frotas. Universidade Estadual “Julio de Mesquita Filho”. Faculdade de Engenharia. Campus Bauru.
- Beale, R., & Jackson, T. (1990). *Neural Computing: an Introduction*. Bristol: Adam Hilger.
- CableMax. (2010). *CableMax Cabos de Aço e Acessórios LTDA*. Acesso em 05 de Junho de 2018, disponível em CableMax Cabos de Aço: <http://www.cabosdeacocablemax.com.br/cabo-de-aco.html>
- Cabopec. (2018). *Construções e Tipos de Cabos*. Acesso em 06 de Junho de 2018, disponível em Cabopec - Cabos de Aço e Peças: <http://cabopec.com.br/conhecendo-melhor-o-cabo-de-aco/#c-2>
- DevMedia. (2013). *Redes Neurais Artificiais: Algoritmo Backpropagation*. Acesso em 1 de Agosto de 2018, disponível em DevMedia: <https://www.devmedia.com.br/redes-neurais-artificiais-algoritmo-backpropagation/28559>
- Falconi, D. R. (2010). *Sensor piezoelétrico baseado na tecnologia dos eletretos termo-formados: aprimoramentos dos processos de produção*. Dissertação (Mestrado em Processamento de Sinais de Instrumentação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Haykin, S. (2001). *Redes Neurais: Princípios e prática* (2ª ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Hodgkin, A., & Huxley, A. (1952). *A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve* (Vol. 117). Journal of Physiology.
- Iliuk, I. (2016). *Análise de um sistema de captura de energia piezoelétrico não linear e não ideal utilizando-se uma estrutura aporticada*. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Kasabov, N. K. (1996). *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering* (1ª ed.). Massachusetts: The MIT press.

- Kovács, Z. L. (1996). *Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações* (2ª ed.). Collegium Cognitio.
- Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1977). *Ultrasonic Testing of Materials*. Estados Unidos da América: SpringerVerlag.
- Lathi, B. (1968). *Sistemas de Comunicação*. Rio de Janeiro: Guanabara S.A.
- Lazzarini, 1998 apud Fuzati Violinos. (2018). *O espectro e as formas de onda*. Acesso em Junho de 10 de 2018, disponível em Fuzati Violinos: <http://fuzativiolinos.com.br/o-espectro-e-as-formas-de-onda/>
- Li, X. (1998). Real-time detection of the breakage of small diameter drills with wavelet transform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(8), 539-543.
- Lima, S. (2018). *Visualização de dados em Python: Matplotlib*. Acesso em 25 de Julho de 2018, disponível em Lab KingHost: <https://king.host/blog/2018/03/visualizacao-de-dados-matplotlib/>
- Ludwing Junior, O., & Montgomery, E. (2007). *Redes Neurais: Fundamentos e Aplicações com Programas em C*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda.
- Medeiros, L. J. (2014). *Hidrofone ultrassônico com piezoelétrico como elemento transdutor*. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Miller, R. K., & McIntire, P. (1987). *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5: Acoustic Emission Testing*. Columbus, Ohio, USA: Amer Society for Nondestructive.
- PyScience-Brasil. (23 de Julho de 2018). *Numpy*. Fonte: PyScience-Brasil: <http://pyscience-brasil.wikidot.com/module:numpy>
- Rosenblatt, F. (1958). *The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain* (Vol. 65). Psychological Review.
- Schühli, L. A. (2007). *Monitoramento de Operações de Retificação usando Fusão de Sensores*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Mecânica). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- Silva, I. N., Spatti, D. H., & Flauzino, R. A. (2010). *Redes Neurais Artificiais: Para engenheiros e ciências aplicadas* (1ª ed.). São Paulo: Artliber.
- Soares, S., & Moura, N. (2007). *Emissão Acústica*. Apostila.
- Tavares. (2016). *JSON com Python. Troca de informações entre programas*. Acesso em 25 de Julho de 2018, disponível em Caderno de Laboratório:

<https://cadernodelaboratorio.com.br/2016/03/12/json-com-python-troca-de-informacoes-entre-programas>

The SciDAVis Handbook. (2018). *Chapter 6. Analysis of data and curves*. Acesso em 20 de Junho de 2018, disponível em The SciDAVis Handbook: <http://scidavis.sourceforge.net/manual/c4166.html>

Turnero, P. (2018). *La transformada de Fourier*. Acesso em 10 de Agosto de 2018, disponível em [monografisa.com: https://www.monografias.com/trabajos105/transformada-fourier/transformada-fourier.shtml](https://www.monografias.com/trabajos105/transformada-fourier/transformada-fourier.shtml)

Wasserman, P. D. (1989). *Neural Computing : Theory and Practice*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Weingaertner, W., Boaron, A., & Martinenghi, G. (Novembro de 2011). Aplicação Industrial do Reconhecimento de Contato Entre Rebolo e Peça. *Máquinas e Metais*(48), 50-71.