

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

EDUARDO FABIANO DA COSTA

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO FIO DE COBRE POR ALUMÍNIO
EM CAPTADORES DE SOM**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2016

EDUARDO FABIANO DA COSTA

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO FIO DE COBRE POR ALUMÍNIO
EM CAPTADORES DE SOM**

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

Orientador: Prof. Dr. Márcio Andreato
Batista Mendes

LONDRINA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia de
Materiais
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO FIO DE COBRE POR ALUMÍNIO EM CAPTADORES DE SOM

Por

EDUARDO FABIANO DA COSTA

Monografia apresentada no dia 03 de novembro de 2016 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO.**

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)
Orientador

Prof.^a. Dr.^a. Silvia Midori Higa

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – DAEMA-LD)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Cava

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – DAEMA-LD)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

Obs.: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais.

Dedico este trabalho à minha família, em especial a minha mãe, Isabel, e meu pai, Antônio, pessoas a qual me inspiro e dedico tudo que conquistei e conquisto.

AGRADECIMENTOS

Essas poucas linhas não definem todos que já tiveram uma contribuição em minha vida, mas espero que entendam que meus agradecimentos também os pertencem.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Andreato Batista Mendes, que manifestou interesse, apoiou firmemente este trabalho e confiou em meu trabalho.

Aos professores do curso, em especial, em ordem de acontecimentos, Prof. Dr. Renato Belinello, pelo ano como monitor e pela ajuda ao longo do curso, assim como a Prof. Dra. Delia Vieira, Prof. Dr. Carlos Cava e Prof. Dr. Lucas Berti, que deram oportunidades e confiaram em meu trabalho em projetos que fazem parte da minha carreira.

Aos membros da banca, Prof. Dra. Silvia e Prof: Dr. Carlos, assim como os suplentes Prof. Dra. Délia e Prof. Dra. Francisco, por aceitarem o convite para membros da banca.

Aos técnicos e auxiliares de laboratório, em especial Filippe De Carvalho, Felipe Ferreira e Márcio Alves, por auxiliarem na execução dos experimentos e sugerirem ideias para facilitar a execução do trabalho. Agradeço aos docentes responsáveis pelos laboratórios que permitiram a execução do trabalho nos mesmos.

Aos meus amigos de sala e pessoais, que me deram forças ao longo do curso.

Por último, agradeço firmemente ao apoio ao meu pai, Antônio, e de minha namorada, Raquel, que me aguentaram e sentiram minha falta durante este período, e que estiveram lá, para todo e qualquer problema, e em especial para minha mãe, que se foi recentemente, mas espero orgulha-la em retribuição a todo o apoio durante minha vida e quase todo período de faculdade.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Music doesn't lie. If there is something to be changed in this world, then it can only happen through music. (HENDRIX, Jimi, 196-)

RESUMO

COSTA, E. F. DA. **Análise da substituição do fio de cobre por alumínio em captadores de som.** 2016. 64 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

A substituição do material utilizado no enrolamento da bobina do captador pode ser vantajosa, em aspectos de custos e características sonoras obtidas. A substituição do cobre utilizado na bobina do captador por alumínio foi o tema deste trabalho. Para avaliar os efeitos desta alteração, foram realizados testes eletromagnéticos, de microscopia e testes acústicos em captadores enrolados de cobre e alumínio, assim como um captador mantido como adquirido. Obtiveram-se resultados promissores para estudo deste tipo de alteração, como não alteração na qualidade som e redução no custo de produção e no peso, que podem servir como impulso para produção industrial.

Palavras-chave: Captador. Alumínio. Cobre. Bobina. Fio.

ABSTRACT

COSTA, E. F. Da. **Replacement analysis of aluminum by copper wire in sound pickups**. 2016. 64 pages. Final Course Assignment (Bachelor of Engineering Materials) - Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2016.

Substitution of the material used in the pickup coil winding may be advantageous in aspects of cost and noise characteristics obtained. The replacement of the copper used in the pickup coil of aluminum has been the topic of this paper. To assess the effects of this change, electromagnetic tests were performed, microscopy and acoustic tests pickup coils of copper and aluminum, as well as a pickup maintained as acquired. Promising results were obtained for study of this type of change, as no change in sound quality and a reduction in production cost and weight, which can serve as impetus for industrial production.

Keywords: Pickup. Aluminum. Copper. Bobin. Wire.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Da esquerda para direita, captador <i>Custom Alnico 50 (single)</i> , <i>Custom II (humbucker)</i> , <i>Little HH777 (humbucker em formato single)</i> , todos da empresa brasileira Malagoli.	18
Figura 2 – Captador single na visão explodida, geralmente utilizado nos modelos Strato.....	20
Figura 3 – Acima, tem-se a interação do magneto com a corda da guitarra, e abaixo tem-se a alteração nas linhas de fluxo magnético da bobina.	22
Figura 4 – Esquema elétrico genérico para 3 captadores singles. Neste caso, o potenciômetro b do meio controla o tom de todos captadores, e o potenciômetro c mistura captadores.	25
Figura 5 – Perdas por corrente parasita em um material magnético.	26
Figura 6 – Fluxograma de atividades, com os itens presentes na metodologia.	29
Figura 7 – Medição da resistência do captador, através das duas pontas do captador.	32
Figura 8 – Captador com sua proteção retirada parcialmente. Nota-se que o fio tem diâmetro pequeno, e pela aproximação da imagem o fio está envolto em parafina. .	36
Figura 9 – Captador com sua proteção retirada à esquerda superior, na direita superior a região que foi cortada, na esquerda inferior o captador no meio do corte da bobina e na direita inferior o captador já com a bobina cortada retirada (Todas as imagens são do captador 151, tirando a inferior direita, do captador 150).....	37
Figura 10 – A bobina após ser lavada com etanol, com destaque a um fio levado ao estereoscópio, onde as setas apontam a presença de parafina, também é destacada a parafina removida em uma placa de petri e a bobina após a secagem com secador (canto superior direito).	38
Figura 11 – À esquerda, fio de cobre sem o isolamento, e à direita, fio de alumínio sem o isolamento, ambos com destaque ao perfil longitudinal da superfície.	40
Figura 12 – O captador enrolado com cobre durante o processo de enrolamento no torno mecânico.....	40
Figura 13 – Ferro de soldar e solda à esquerda, e solda do captador enrolado com alumínio.....	42
Figura 14 – Captadores antes e após soldagem e isolamento, na esquerda o captador 150 e a direita o captador 151, na parte de cima os anteriores a soldagem e isolamento e na parte inferior os após.	42
Figura 15 – Aparato criado para utilização do captador no osciloscópio, assim como o afinador à esquerda, durante a afinação em Lá (A).	44
Figura 16 – Imagem da tela do osciloscópio analógico, mostrando o comportamento de onda presente nos captadores 149 (esquerda), 150 (centro) e 151 (direita) após a oscilação da corda metálica (captador 151 está em uma escala vertical diferente dos demais).....	46
Figura 17 – Fotografia da tela do aparelho, mostrando o comportamento da tensão emitida pelo captador 149, à esquerda sem qualquer oscilação na corda, e à direita com a oscilação da corda.....	48

Figura 18 – Fotografia da tela do aparelho, mostrando o comportamento da tensão emitida pelo captador 150, à esquerda sem qualquer oscilação na corda, e à direita com a oscilação da corda.....	48
Figura 19 – Guitarra utilizada no experimento.....	49
Figura 20 – Interface USB, em vermelho, o aparato e o captador posicionado próximo a ponte.....	50
Figura 21 – Resposta dos captadores 149 (primeira linha, superior), 150 (segunda linha, meio) e 151 (terceira linha, inferior) no Audacity, na parte superior, e na parte inferior a resposta dos 3 captadores com ampliação diferente, sob mesma ordem..	51
Quadro 1 – Tipos de material isolante utilizado nos fios de cobre de captadores e uma breve descrição sobre.	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade elétrica de alguns metais a temperatura ambiente.	16
Tabela 2 – Intervalo de resistência de corrente contínua para obtenção dos tons limpo, médio de pesado.	24
Tabela 3 – Venda de guitarras e violões, assim como o capital gerado e o preço médio de vendas.	27
Tabela 4 – Unidades vendidas durante o ano de 2015 de violões e guitarras, divididos por preço de compra.	27
Tabela 5 – Informações relativas aos fios AWG 29.....	35
Tabela 6 – Tabela de identificação e resistência dos captadores adquiridos e sua posição na guitarra.....	36
Tabela 7 – Massa obtida das duas bobinas dos captadores.....	38
Tabela 8 – Massa obtida do resto do captadores.....	39
Tabela 9 – Dados obtidos dos captadores montados.	41
Tabela 10 – Resistência dos captadores enrolados e do captador de referencia, além da resistência teórica.	43
Tabela 11 – Tensões e correntes máximas obtidas nos osciloscópios e multímetro ao se oscilar a corda sobre o captador.	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO	12
1.1.1 Objetivos Específicos.....	12
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 MATERIAIS.....	14
2.1.1 Cobre	14
2.1.2 Alumínio.....	16
2.1.3 Revestimento do Fio	17
2.2 CAPTADORES MAGNÉTICOS	17
2.2.1 Tipos de Captadores Magnéticos	18
2.3 PEÇAS INTEGRANTES	19
2.4 PRINCIPIO ELETROMAGNÉTICO.....	21
2.4.1 Indução Eletromagnética em Bobinas	22
2.5 CONDIÇÕES E ASPECTOS DE PROJETO NOS CAPTADORES MAGNÉTICOS	
23	
2.5.1 Variações na Resistividade.....	23
2.5.2 Dimensões	24
2.5.3 Resistências Padrões	24
2.5.4 Número de Voltas do Fio na Bobina	24
2.5.5 Circuitos elétricos da Guitarra.....	25
2.5.6 Corrente Parasita.....	26
2.5.7 Mercado de captadores e custos envolvidos	27
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES.....	29
3.2 MONTAGENS DOS CAPTADORES.....	30
3.2.1 Testes com o Fio Adquirido para Enrolamento	30
3.2.2 Desmontagem dos Captadores	31
3.2.3 Análise Microscópica Ótica do Fio	31
3.2.4 Montagem dos Captadores.....	31
3.2.5 Análise por Osciloscópio.....	32
3.2.6 Testes Sonoros.....	33
4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	34
4.1 TESTES COM O FIO ADQUIRIDO PARA ENROLAMENTO	34
4.2 DESMONTAGEM DOS CAPTADORES	35
4.3 ANÁLISE MICROSCÓPICA ÓTICA DO FIO.....	39
4.4 MONTAGEM DOS CAPTADORES.....	40

4.5 ANÁLISE POR OSCILOSCÓPIO.....	43
4.5.1 Análise por Osciloscópio Analógico	45
4.5.2 Análise por Osciloscópio Digital.....	47
4.6 TESTES SONOROS.....	49
4.7 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	51
5 CONCLUSÃO.....	54
6 ESTUDOS POSTERIORES.....	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O captador é um transdutor sonoro de energia (dispositivos que transformam energia física em elétrica) que transforma a vibração das cordas¹ em impulsos elétricos de corrente alternada (LUIGHI, 2005). Este dispositivo é o principal diferencial do violão para a guitarra, pois o som das cordas no violão é amplificado pelo formato do violão e na guitarra, a amplificação é feita pelo captador magnético. O captador magnético transforma a energia em corrente elétrica, o sinal é trabalhado na parte eletrônica da guitarra, e, assim, amplificado externamente por amplificadores sonoros.

A transformação de som em sinais elétricos foi primeiramente alcançada com a invenção do telefone, em 1895, por Gray e Bell. Posteriormente, já relacionado a instrumentos musicais, Lloyd Loar trabalhou com instrumentos de corda e captação, criando um dispositivo chamado bobina captadora (*pickup coil*), por volta de 1920. Durante a década de 1930, diversos pesquisadores trabalharam com a vibração das cordas, que, ao vibrarem, causam alterações magnéticas em um magneto permanente enrolado com um cabo condutivo (MCDONALD, 2007).

A maioria dos captadores utilizados em guitarras são magnéticos, existindo outros, como os microfones e captadores de contato. Os captadores magnéticos foram primeiramente documentados por George D. Beauchamp (BEAUCHAMP, 1934), em 1934. Este captador estava na guitarra de George D. Beauchamp (também atribuída a Paul Barth), que era basicamente uma guitarra havaiana com a adição do captador.

Os captadores do tipo magnético foram e são os mais utilizados, com diversos avanços e modificações nos mesmos. Ao se referir aos captadores neste trabalho, estará se referenciando a esse tipo em especial. O princípio físico ainda é o mesmo, mas surgiram novos tipos e modelos ao longo do tempo. Em tipos, surgiram captadores com duas bobinas, sistemas de supressão de interferências sonoras, entre outros.

¹ As cordas de guitarra são metálicas, geralmente de níquel, e são estendidas desde a mão da guitarra até a ponte. Normalmente são 6 cordas nas guitarras comuns, existindo guitarras com mais cordas. Possuem diâmetros crescentes, onde a corda mais fina é a mais aguda, e a mais grossa a mais grave.

Captadores tem características diversas de timbres, tons, presença de graves, agudos, entre outras, para satisfazer diversos públicos alvo. Além disso, muitas vezes, o desejo por qualidade de áudio prevalece, como no caso da série de captadores Zephyr® da Seymour Duncan, onde o cobre foi substituído pela prata no enrolamento da bobina do captador, que resulta em um produto extremamente caro, mas que satisfaz as condições de qualidade de certo público alvo (KING, 2014). Em outros casos, o desejo é o baixo custo, onde entra a motivação deste trabalho.

Alternar o material utilizado em um projeto é algo característico da engenharia de materiais, que, ao selecionar o material em um determinado projeto, deve se preocupar com os conceitos envolvidos, e também se preocupar com os custos e possíveis inovações ao se utilizar um novo material.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é a substituição do cobre, que é o material de enrolamento dos captadores atualmente utilizados em guitarras, pelo alumínio, de menor custo. Além da possibilidade de se obter um instrumento mais barato, almeja-se obter características sonoras diferentes, que pode ter novas perspectivas comerciais.

1.1.1 Objetivos Específicos

Objetiva-se a construção de um captador de alumínio e um de cobre, ambos com o diâmetro e resistência elétrica iguais, a fim de comparar os dois materiais. Essa comparação será dada em função das características eletromagnéticas, estruturais, acústicas e econômicas, de forma a avaliar o desempenho do captador enrolado com alumínio perante o captador enrolado com cobre.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A motivação principal deste trabalho é fundamentada no mercado de captadores, que é bastante influenciado por novidades e aberto a novas características sonoras, além da substituição de cobre por alumínio estar sendo iniciada e desenvolvida em muitas áreas tecnológicas e de engenharias, como na área de transformadores (SALUSTIANO, 2012), chicotes elétricos automotivos (ROCHA, 2014) e motores elétricos.

A justificativa para a realização deste trabalho está no custo e nas características físicas apropriadas para este fim do alumínio, tendo potencial para gerar uma economia significativa no produto final, assim como potencial para a obtenção de características sonoras diferentes das encontradas nos captadores enrolados com alumínio.

Em vista disso, a possibilidade de aplicar os conhecimentos adquiridos durante o curso da engenharia de materiais também justifica esta proposta de trabalho de conclusão de curso, que possibilitará a utilização de conhecimentos de várias áreas do curso, como, por exemplo, seleção de materiais e propriedades e manufatura de materiais metálicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico será abordado inicialmente os materiais utilizados no enrolamento do captador, depois será tratado os aspectos relevantes dos captadores, como os aspectos físicos envolvidos, tipos de captadores magnéticos, peças e condições e aspectos de projeto nos captadores magnéticos.

2.1 MATERIAIS

Dentre os diversos materiais aplicados na fabricação do captador magnético, serão abordados aspectos físicos relevantes do cobre e do alumínio e de aspectos em relação ao revestimento do fio.

2.1.1 Cobre

O cobre é o material mais utilizado como fio para enrolamento do captador, sendo um fio delgado que é enrolado ao magneto, de diâmetro variável de acordo com o projeto (LUIGHI, 2005, p. 31). Segundo a ICALA (INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION LATIN AMERICA) o cobre é caracterizado pela sua boa condutividade, o que é desejado em bobinas, pois elas devem conduzir bem a corrente elétrica, e, neste caso, conduzir o sinal elétrico que é gerado pelo captador. Além disso, ainda segundo a ICALA, sua alta flexibilidade, maleabilidade e soldabilidade o dão características desejáveis para o fio de enrolamento, pois flexibilidade e maleabilidade são essenciais para o enrolamento da bobina do captador, e a sua boa soldabilidade é importante para a soldagem dos terminais da bobina a parte elétrica do captador. Por fim, segundo a ICALA, a boa resistência à corrosão do cobre também é importante, por ser alta, pois a oxidação resultaria em problemas de condução e até de resistência mecânica do fio (INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION LATIN AMERICA, 2016).

A classe de fios utilizada normalmente no enrolamento de captadores é a de fios magnéticos (*magnet wire*), que são fios isolados geralmente com uma camada

de um material isolante. A unidade de padronização americana para fios e cabos elétricos é a AWG (*American Wire Gauge*), e para fios de captadores, é mais utilizado valores na ordem de 36 a 54 AWG; mas, em geral, usa-se AWG 42, que equivale a 0,064 mm (BROSNAC, 1980, p. 16).

É importante salientar que uma das propriedades mais importantes para os fios de bobina em geral é a resistência elétrica por unidade de área, onde se aumenta o valor da resistência elétrica ao se diminuir o diâmetro do fio, vide a equação da resistência elétrica presente na Equação 1, onde R é a resistência elétrica (ohms, ou Ω), ρ é a resistividade elétrica (ohms*metro, ou Ωm), l é o comprimento do fio ou cabo (metros, ou m) e A é a área da seção transversal do fio ou cabo (metros quadrados, m^2) (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 142).

$$(1) \quad R = \frac{\rho l}{A}$$

Para os fios magnéticos de cobre, diversos dados importantes, como a resistência, diâmetro em milímetro para os fios AWG, contam no Anexo 1.

A condutividade elétrica do cobre é comparada a outros metais na Tabela 1. A maior condutividade dentre todos os metais é a da prata, porém, devido ao seu custo, é um dos condutores menos utilizados. O cobre tem uma condutividade elétrica alta, porém seus custos também são moderadamente altos, levando muitas vezes a uma necessidade de utilizar outro condutor, como descrito anteriormente, o que abre a possibilidade de se utilizar o alumínio, com condução elétrica bem menor, mas com custos, em geral, inferiores.

Tabela 1 – Condutividade elétrica de alguns metais a temperatura ambiente.

Metal	Condutividade elétrica ($\Omega \cdot m$)⁻¹
Prata	$6,8 \times 10^7$
Cobre	$6,0 \times 10^7$
Ouro	$4,3 \times 10^7$
Alumínio	$3,8 \times 10^7$
Latão (70 Cu – 30 Zn)	$1,6 \times 10^7$
Ferro	$1,0 \times 10^7$
Platina	$0,94 \times 10^7$
Aço-carbono	$0,6 \times 10^7$
Aço inoxidável	$0,2 \times 10^7$

Fonte: Adaptado de Jr. (2008, p. 496).

2.1.2 Alumínio

O alumínio vem sendo utilizado em aplicações na qual o cobre era utilizado, pois seus custos são inferiores. Segundo a ABAL (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO), o alumínio possui uma baixa densidade, boa resistência à corrosão e boa condução elétrica, características essas que motivaram a presente proposta de trabalho. A substituição do cobre nos captadores pelo alumínio possibilitará, frente às essas características apresentadas, um captador mais leve, com boa condução elétrica em sua bobina e maior resistência a corrosão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2016).

Apesar de possuir essas características adequadas para a fabricação da bobina do captador, a condução elétrica do alumínio ainda é inferior à do cobre (sendo que o alumínio possui 61% da condução elétrica do cobre, também conhecido como índice I.A.C.S). Por outro lado, o alumínio é mais leve que o cobre (densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$ do alumínio contra $8,9 \text{ g/cm}^3$ do cobre, segundo (CALLISTER JR., 2008, p. 1)), e, dependendo dos aspectos construtivos, mais barato.

2.1.3 Revestimento do Fio

O revestimento dos fios magnéticos é um isolante elétrico para evitar o contato entre as espiras do fio após o enrolamento, pois é desejado que o fio conduzisse da mesma forma como se estendido em linha reta. O revestimento do fio geralmente é feito com um fio polimérico que é aderido ao cabo, impedindo qualquer contato elétrico e diminuindo a saída de campo magnético do fio. No Quadro 1 constam os principais tipos de revestimento utilizado nos fios de cobre, em geral, semelhante aos revestimentos utilizados nos fios de alumínio.

Quadro 1 – Tipos de material isolante utilizado nos fios de cobre de captadores e uma breve descrição sobre.

Material isolante	Descrição
<i>Plain Enamel</i> (Esmaltado)	Resina oleosa, normalmente de cor marrom escura (utilizado em novas guitarras <i>Stratocasters</i>)
<i>Polyurethane</i> (Poliuretano)	Possuem várias cores, vermelho, verde, limpo, azul, etc
<i>Formvar</i> (Polivinil Formvar)	Utilizado em guitarras <i>Stratocasters</i> antigas
<i>Bondable Polyurethane</i> (Poliuretano ligável)	Filme de termoplástico adesivo, que reage com álcool ou calor
<i>Bondable Formvar</i> (Formavar ligável)	Filme de termoplástico adesivo

Fonte: Adaptado de Brosnac (1980, p. 26).

O fio em si não pode ser utilizado sem algum tipo de revestimento, pois ocorreria um curto-circuito, o que resultaria em redução na indução.

2.2 CAPTADORES MAGNÉTICOS

Neste tópico serão discutidas as características dos captadores magnéticos, como os princípios de funcionamento, tipos, partes e um tópico especial com relação a diversos aspectos importantes para a montagem de um captador.

2.2.1 Tipos de Captadores Magnéticos

De acordo com a divisão proposta por LUIGHI em 2005, têm-se os seguintes tipos:

- **Captadores *singles*** são captadores com uma única bobina;
- ***Stacks*** são captadores com duas bobinas, reduzidas e sobrepostas;
- ***Humbuckers*** são captadores com duas bobinas, paralelas, que normalmente apresentam mais volume, e timbres com maior ataque e sustentação
 - ***Humbuckers em formato single ou mini-humbuckers*** possuem a mesma configuração do *humbucker*, só que com reduções de tamanho para obter-se o tamanho de um *single*;
 - **Captadores ativos** possuem um dos formatos anteriores, mas possuem sistemas eletrônicos que eliminam a interferência dos materiais de outros componentes da guitarra (ex: a interferência do corpo de madeira da guitarra no som obtido, pois, ocorre uma vibração natural do mesmo ao se tocar nas cordas, que altera as características do som captado) no som captado.

A Figura 1 mostra alguns dos captadores citados acima.



Figura 1 – Da esquerda para direita, captador *Custom Alnico 50 (single)*, *Custom II (humbucker)*, *Little HH777 (humbucker em formato single)*, todos da empresa brasileira Malagoli.

Fonte: Site Malagoli, (2016)

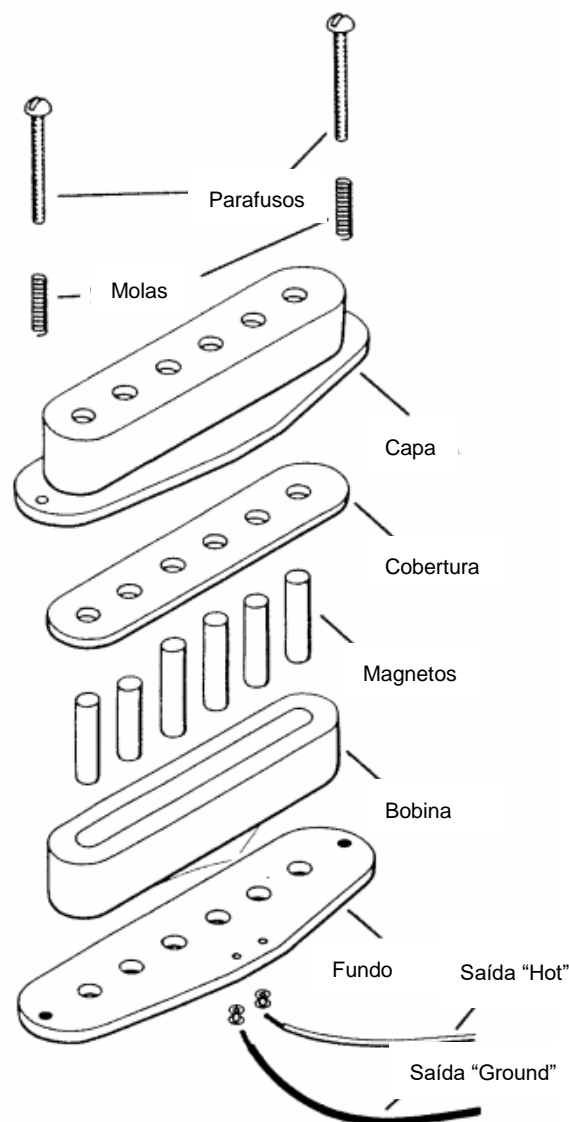
Em relação à posição no corpo da guitarra, um captador pode ser posicionado em três posições: 1 - na posição ponte² (próximo a ponte da guitarra), 2 - no meio (entre a posição 1 e 3), e 3 - no braço³ (próximo ao braço da guitarra).

2.3 PEÇAS INTEGRANTES

Os captadores magnéticos, em especial os *singles*, possuem algumas peças importantes a serem destacadas. Conforme esquematizado na Figura 2, para a sua fixação na guitarra, possuem sistema de mola e parafusos. É observado na figura que a bobina é um carretel onde se tem o fio condutor enrolado. Os magnetos (imãs) são encaixados dentro da bobina por uma placa (denominadas de cobertura e fundo na figura) ou, em alguns casos, diretamente pela capa do captador. Os terminais da bobina são ligados a fios, e estes ligados a parte elétrica da guitarra.

² A ponte é uma parte da guitarra, geralmente metálica, que fixa as cordas da guitarra, também podendo servir para tracionar as cordas de forma a alterar o som gerado.

³ O braço da guitarra é uma barra maciça de madeira, com outra barra fina colada, chamada de escala, que é dividida em diversas casas, chamadas trastes.



**Figura 2 – Captador single na visão explodida, geralmente utilizado nos modelos Strato.
Fonte: Adaptado de Brosnac (1980, P. 32).**

Segundo a empresa MALAGOLI CAPTADORES, 2016, captadores podem ter diversos tipos de magneto (ou seja, o imã), dentre eles: os imãs de Alnico, que é uma liga ternário a base de alumínio, níquel e cobalto; os imãs cerâmicos, que são imãs sintetizados através de metais ferrosos; os imãs de liga de samário cobalto; os imãs de neodímio; e, finalmente, os imãs de cobalto (MALAGOLI CAPTADORES, 2016).

Dentre esses imãs, os mais utilizados nos captadores são os de Alnico e cerâmicos. Os imãs em Alnico são produzidos por fundição ou por sinterização (via metalurgia do pó). Quanto aos imãs cerâmicos, os precursores são prensados em

molde com o formato dos magnetos, secados e nas sequencia são queimados em fornos, e finalmente são usinados.

Os carretéis, onde será enrolado o fio, são fabricados com diversos tipos de materiais, podendo-se citar a fibra vulcanizada, a baquelite, a fibra fenólica, o náilon, a celulose, o poliestireno, o polibutileno e o ABS. Os carretéis são produzidos comumente por injeção em moldes mecânicos ou hidráulicos.

As principais marcas mundiais de captadores, além das de fabricantes de guitarra (como os captadores da Fender e Gibson), são a Seymour Duncan, EMG, DiMarzio e, no Brasil, a Malagoli, que é conhecida por ter captadores fabricados a mão (linha *Custom*), com ótimo custo x benefício e com qualidade garantida por garantia vitalícia.

2.4 PRINCIPIO ELETROMAGNÉTICO

O captador magnético é constituído pelo imã enrolado por um fio condutor. O imã induz um campo magnético, induzindo o mesmo às cordas, de modo que se cria um fluxo magnético entorno das mesmas. Ao vibrarem, cria-se uma corrente alternada devido à oscilação do campo magnético, que é levada pela parte elétrica até a saída de áudio da guitarra (conhecido como *jack* de áudio), semelhante a saída de áudio de alguns aparelhos eletrônicos), que por sua vez, ao ser plugado em um cabo, ou dispositivo wireless, leva o sinal da corrente alternada para o amplificador (MALAGOLI CAPTADORES, 2016).

Pode-se dizer que esta corrente elétrica é alternada devido à corda oscilar se aproximando e afastando da bobina, que gera uma corrente que muda de sentido, de frequência igual à oscilação da corda. Nas imagens que compõe a Figura 3, visualiza-se a interação do magneto com a corda da guitarra (geração dos polos na corda da guitarra) e a alteração nas linhas de fluxo magnético da bobina, ocorrendo o efeito descrito pela Lei de Faraday da Indução (PAGLIARINI, 2004, p. 6).

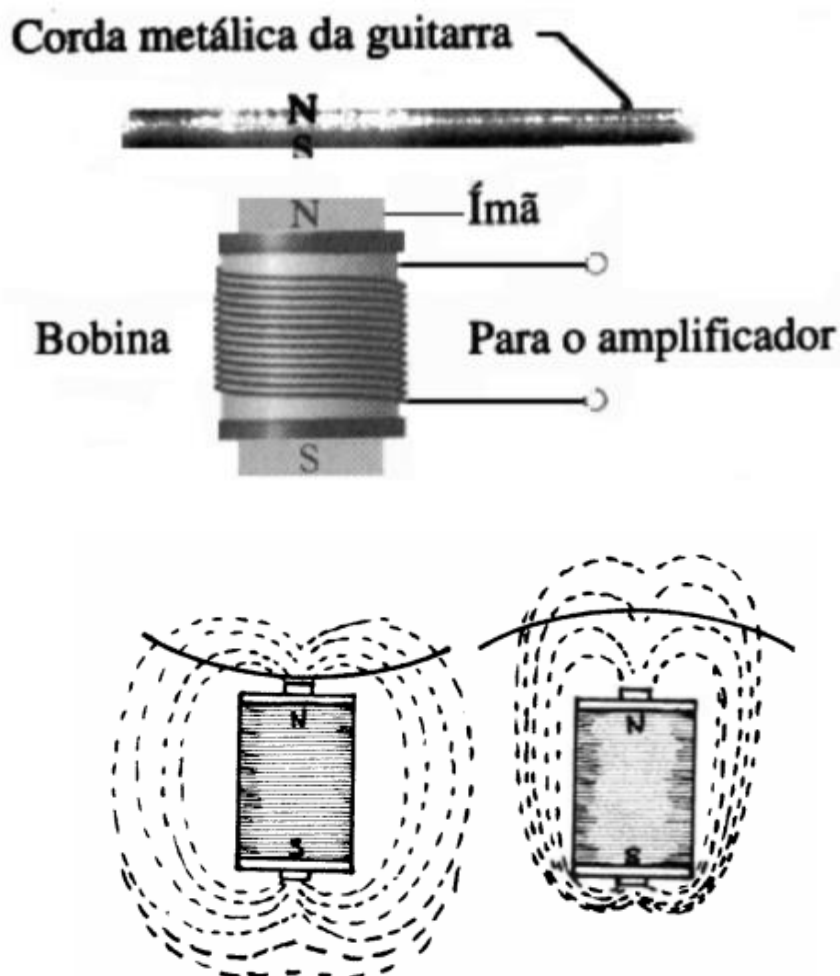


Figura 3 – Acima, tem-se a interação do magneto com a corda da guitarra, e abaixo tem-se a alteração nas linhas de fluxo magnético da bobina.
 Fonte: Pagliarini (2004, p. 6) e Brosnac (1980, p. 14), de cima para baixo, respectivamente.

2.4.1 Indução Eletromagnética em Bobinas

O efeito de indução magnética é importante para os captadores, pois o sinal elétrico do captador é gerado por este efeito. Para uma bobina, pode-se determinar que a corrente gerada i (em Amperes, A) é dada pela Equação 2, onde tem-se como N o número de espiras da bobina, Φ o fluxo magnético gerado (em weber, Wb) e L (em Henry, H) a indutância, a capacidade da bobina em criar uma corrente (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 278).

$$(2) \quad i = \frac{N \Phi}{L}$$

2.5 CONDIÇÕES E ASPECTOS DE PROJETO NOS CAPTADORES MAGNÉTICOS

Diversos aspectos e condições de projeto são explicados neste tópico, pois serão essenciais na fabricação e montagem do captador para o presente estudo.

2.5.1 Variações na Resistividade

A resistividade de metais é diretamente influenciada por três fatores, como mostrado na Equação 3, onde ρ_i é a resistividade dependente da presença de impurezas, ρ_t é a resistividade dependente da temperatura e ρ_d é a resistividade dependente da deformação plástica (CALLISTER JR., 2008, p. 496).

$$(3) \quad \rho = \rho_i + \rho_t + \rho_d$$

Segundo Callister Jr. (2008, p. 496), a resistividade é dependente das impurezas, pois qualquer impureza é deletéria à condução de um metal, gerando pontos de dispersão de elétrons, que causam um trabalho adicional à condução elétrica, que justamente é o aumento de resistividade. Também depende da temperatura, pois o aumento de temperatura resulta num aumento da agitação molecular, que também causa um trabalho adicional à condução elétrica. Finalmente, a deformação plástica também é fator determinante na resistência, pois as discordâncias são pontos de espalhamento de elétron, e novamente, é um trabalho adicional à condução elétrica.

Para o captador esses três fatores são importantes, pois os três podem estar presentes no fio da bobina. As impurezas são indesejáveis, mas sempre estão presentes, mesmo em quantidade reduzida; a temperatura de trabalho do captador pode aumentar ou diminuir, mesmo que em pequenas quantidades, o que também causa uma variação na resistividade; e por último, a deformação mecânica ocorre desde a fabricação do fio até o seu bobinamento no captador.

2.5.2 Dimensões

Captadores magnéticos não seguem uma padronização exata de tamanho, em geral. Uma empresa pode ter várias dimensões para um tipo de captador e até modelo de captador.

2.5.3 Resistências Padrões

Todos captadores possuem resistências padrões em corrente contínua e, geralmente, por essa resistência é possível saber o comportamento sonoro do captador. Na Tabela 2 constam algumas generalizações para o comportamento sonoro dos captadores naquela amplitude de resistência (para captadores enrolados com fio de cobre).

Tabela 2 – Intervalo de resistência de corrente contínua para obtenção dos tons limpo, médio de pesado.

<i>Single Coils</i>		<i>Humbuckers</i>	
Característica	Amplitude (Ω)	Característica	Amplitude (Ω)
Tom limpo	3-6K	Tom limpo	4-7,5K
Tom médio	6-9K	Tom médio	7,5-9K
Tom alto-pesado (Modelos de alta distorção)	9-14K	Tom alto-pesado (Modelos de alta distorção)	9-14K

Fonte: Brosnac (1980, p. 16).

2.5.4 Número de Voltas do Fio na Bobina

O número de voltas no captador varia muito; por exemplo, para o captador *single* da guitarra Fender® *Stratocaster* de 1954, o número de voltas era de 8350 voltas, já para o modelo de 1978, 7600 voltas. Esses valores também são arbitrários, mas giram em torno de 6500 a 8500 voltas (BROSAC, 1980, p. 27). O número de voltas, considerando a Equação 2, aumenta a corrente gerada por indução, o que resulta em aumento de tom, deixando mais pesado, alto. A resistência também

aumenta, por que o comprimento do fio aumenta, e como visto na Tabela 2, o aumento de tom é previsto deste modo também.

2.5.5 Circuitos elétricos da Guitarra

A guitarra possui um sistema elétrico para alterar o sinal elétrico recebido do captador. Basicamente, esse sistema é composto de potenciômetros, capacitores, chaves e o *jack* de saída. Segundo BROSNAK (1980, p. 51-57), potenciômetros controlam o volume (*volume*), de forma a regular a corrente elétrica que os passam, já que o potenciômetro é um resistor variável. Unidos a capacitores, os potenciômetros controlam o tom (*tone*) dos captadores, pois os capacitores seguram o “*treble*” da guitarra (que é a quantidade de tons agudos emitidos). As chaves servem para controlar posições, sejam elas desligar ou ligar captadores, ou até desligar ou ligar bobinas em certos captadores. O *jack* de saída recebe o sinal elétrico e serve como ponto de conexão entre o amplificador e a guitarra. Em geral, os esquemas elétricos são padrões, disponibilizados em livros, sites, manuais, entre outros. Na Figura 4 tem-se um esquema genérico para três captadores single.

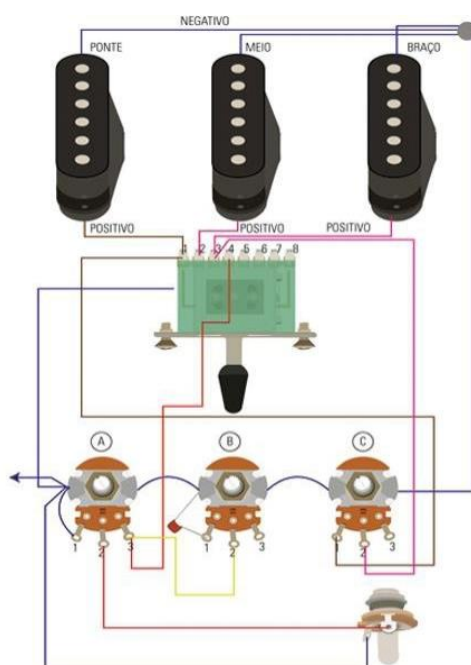


Figura 4 – Esquema elétrico genérico para 3 captadores singles. Neste caso, o potenciômetro b do meio controla o tom de todos captadores, e o potenciômetro c mistura captadores.

Fonte: Site Malagoli (2016).

2.5.6 Corrente Parasita

A corrente parasita, também conhecido como corrente de Foucault ou Eddy, trata-se de uma corrente que surge em blocos ou placas de um material sob a ação das linhas de fluxo de um campo magnético induzido. Esta corrente acaba circulando na superfície do material e gerando calor devido ao efeito Joule, pois o material possui resistência elétrica. A Figura 5 mostra como surgem tais correntes.

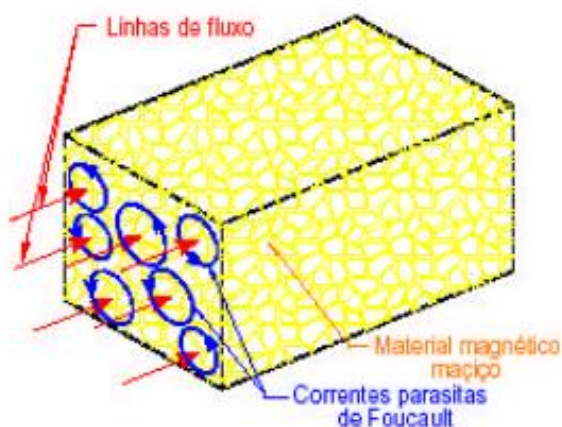


Figura 5 – Perdas por corrente parasita em um material magnético.
 Fonte: Filardo, (2003, p. 4)

A influência dessas correntes é praticamente nula em placas finas. No captador, tal interferência ocorre somente na placa do fundo do captador, que é mostrada na Figura 2, quando a mesma é feita com alguns metais susceptíveis, como é o caso do cobre e do alumínio (WACKER, 2007). Para evita-la, normalmente essa parte do captador é feita com plásticos, ou com chapas desses metais susceptíveis com espessura reduzida. Para determinar a espessura correta, pode-se utilizar a Equação 4, onde P_f (em Watts/Quilo, W/Kg) são as perdas por corrente parasita, f é a frequência da corrente de magnetização (em Hertz, Hz), B é a densidade de fluxo magnético (em Tesla, T) e d a espessura da chapa (em metros, m). O fator $2,2 \cdot 10^{-3}$ é uma constante que normalmente possui esse valor, podendo variar de acordo com a resistividade da chapa (FILARDO, 2003, p. 4).

$$(4) \quad P_f = 2,2f^2B^2d^210^{-3}$$

2.5.7 Mercado de captadores e custos envolvidos

O mercado da música é um mercado que está sempre em expansão. Para as guitarras, as vendas geralmente aumentam a cada ano. Por exemplo, para os EUA, é feito um censo anual sobre a indústria da música, pelo site *Music Trades Online*, que aponta um crescimento praticamente constante nas vendas das guitarras (nesse caso violão e guitarra elétrica), como visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Venda de guitarras e violões, assim como o capital gerado e o preço médio de vendas.

Ano	Unidades	% de variação	Dólares adquiridos	% de variação	Preço Médio
2015	2,630,950	6.4%	\$1,070,244,000	7.0%	\$433
2014	2,472,700	-.3%	\$1,000,676,130	11.4%	\$403
2013	2,489,390	-.3%	\$934,971,450	11.4%	\$372
2012	2,496,185	5.0%	\$839,000,000	2.2%	\$353
2011	2,377,310	1.5%	\$820,746,000	21.0%	\$361
2010	2,341,551	20.5%	\$903,261,000	-1.9%	\$386
2009	1,942,625	11.4%	\$921,057,000	1.3%	\$529
2008	1,742,498	5.6%	\$922,280,000	-0.1%	\$529
2007	1,648,595	23.3%	\$923,522,000	21.2%	\$560

Fonte: The Music Trades Online (2016)

Outro fator importante é que guitarras relativamente baratas compõem boa parte do comércio de guitarras nos EUA. Isso significa que, com tecnologias mais baratas, como a substituição de materiais, o número de vendas poderia ser ampliado ainda mais. O número de unidades vendidas de acordo com o intervalo de custo é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Unidades vendidas durante o ano de 2015 de violões e guitarras, divididos por preço de compra.

Violões		Guitarras	
Preço	Unidades	Preço	Unidades
Abaixo \$100	390,028	Abaixo de \$100	198,494

\$101 a \$200	410,030	\$101 a \$200	380,537
\$201 a \$350	181,628	\$201 a \$350	311,037
\$351 a \$500	40,003	\$351 a \$600	97,659
\$501 a \$1,000	225,810	\$601 a \$1,000	61,037
\$1,001 a \$1,500	226,001	\$1,001 a \$1,250	46,865
Acima \$1,501	25,200	\$1251 a \$1,600	13,185
Total	1,498,700	\$1,601 a \$2,000	12,207
		\$2,001 a \$3,000	11,229
		Total	1,132,250

Fonte: *The Music Trades Online* (2016)

3 METODOLOGIA

3.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

A Figura 6 exibe o fluxograma das atividades que foram adotadas durante a execução das atividades.

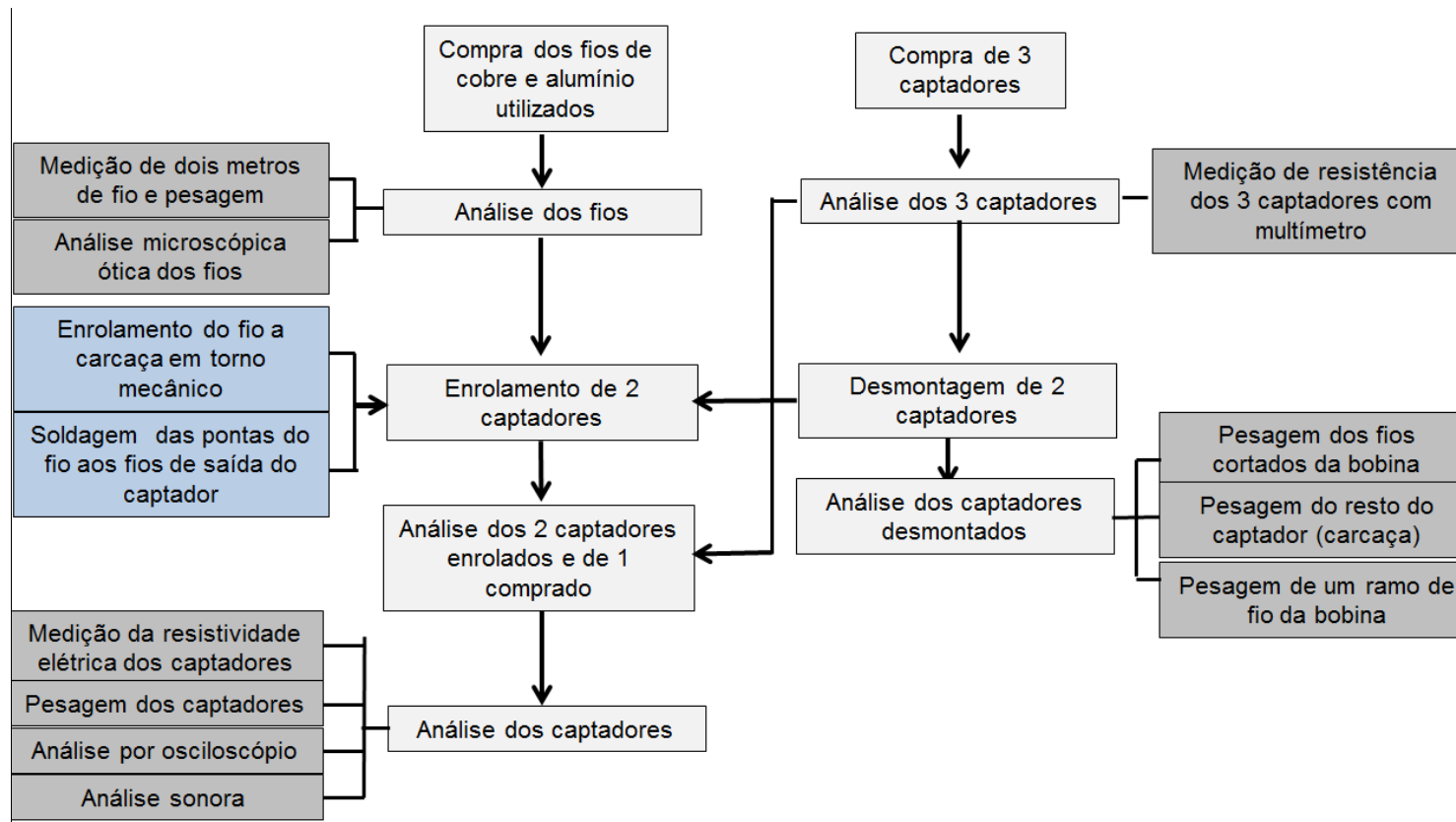


Figura 6 – Fluxograma de atividades, com os itens presentes na metodologia.

Fonte: Autoria própria

3.2 MONTAGENS DOS CAPTADORES

Adquiriu-se um *kit* de captadores no formato single, com três captadores, onde um dos captadores serviu como referência e os outros dois foram desmontados. As “carcaça” dos dois captadores desmontados foram utilizados para enrolar os captadores com os fios comprados (um de cobre e o outro de alumínio). Os testes foram comparativos entre os três captadores, porém o enfoque principal é avaliar o desempenho do captador montado com alumínio em relação ao de cobre de mesmo diâmetro.

Devido aos custos envolvidos, não foi possível obter mais amostras para estabelecimento de um padrão estatístico, onde seriam necessárias várias amostras para obterem-se valores médios das unidades.

Os fios adquiridos para enrolar os dois captadores foram com diâmetro AWG 29 (vide Anexo I para conversões de AWG para milímetros), pois não foi possível adquirir fios mais finos, devido à falta de comercialização em baixas quantidades. Portanto, não foi possível adquirir fios AWG 42, tanto de alumínio como de cobre; o diâmetro mínimo encontrado no mercado para ambos os materiais foi o AWG 29. Fios de diâmetro inferior ao AWG 30 de cobre e alumínio só foram encontrados em sites internacionais de compra e em elevadas quantidades, o que seria inviável para o trabalho.

Procurou-se atingir a mesma resistência com os dois captadores enrolados. Desta forma, fixou-se algumas variáveis para análise.

Os captadores foram montados com o imã que acompanhou os captadores adquiridos - Alnico 5. O número de voltas não foi obtido, e o comprimento foi apenas estimado indiretamente pelo peso de fio enrolado através dos metros por quilos estimados durante os experimentos.

3.2.1 Testes com o Fio Adquirido para Enrolamento

A fim de obter-se o comprimento por quantidade de massa dos mesmos, os fios adquiridos tiveram dois metros de fio medidos e posteriormente pesados. Foram medidos também tanto o diâmetro externo dos fios como os internos, removendo a

superfície de isolamento. Estes dados foram comparados aos informados pelo fornecedor.

3.2.2 Desmontagem dos Captadores

Os captadores adquiridos tiveram sua resistência medida por um multímetro. Dois destes captadores foram desmontados, onde o fio do enrolamento dos mesmos foi cortado. Este fio foi pesado várias vezes, pois as condições em que o fio estava foram alteradas devido aos processos de limpeza da parafina⁴ em que os captadores são mergulhados.

Foi feita uma estimativa de comprimento por quantidade de massa dos fios utilizados, pois é necessário em diversos aspectos, como calcular o comprimento de fio enrolado no captador, estimar número de voltas do captador, entre outros. Deste modo, é possível estimar o comprimento de fio que é utilizado em um captador somente conhecendo o peso de sua bobina, assim como é possível estimar o peso de uma bobina para o captador que irá ter determinada resistência, considerando a equação (1).

3.2.3 Análise Microscópica Ótica do Fio

Foi realizado a análise microscópica ótica dos fios adquiridos a fim de analisar o seu estado topográfico. Para isso, foi analisada a camada interna do fio condutor, sem a camada isolante, que foi retirada com lixamento da superfície. Essas imagens foram úteis para avaliação da retirada da camada de isolante do fio para soldagens, assim como avaliar microscopicamente a adesão deste isolamento.

3.2.4 Montagem dos Captadores

Os dois captadores foram enrolados a partir da carcaça dos captadores abertos anteriormente, em um torno mecânico, de forma a se atingir uma resistência próxima para os dois. Foi enrolado o captador de cobre até atingir um tamanho bem

⁴ Captadores passam por banhos em parafina, pois experimentalmente foi descoberto que elas trazem benefícios como redução de ruído, redução de interferência magnética, entre outros.

próximo ao limite de diâmetro externo do captador e sua resistência foi medida com um multímetro. Para o captador de alumínio, estimou-se um peso para se atingir contando com a resistência ser aproximadamente a do captador de cobre. Desta forma, durante o procedimento de enrolamento, houveram constantes pausas para pesar até chegar no peso que resultaria teoricamente em uma resistência próxima ao do captador de cobre. Durante esse processo, foi estimado o comprimento necessário pela resistência elétrica por metros e chegando no comprimento em peso utilizando o fator “metros de fio por quilo”, onde os dois dados foram informados pelo fornecedor, e o segundo também foi estimado em experimento.

Finalmente, soldou-se a saída padrão do captador com os fios enrolados e mediram-se as resistências dos mesmos. A resistência dos captadores foi medida com um multímetro, como ilustrado na Figura 7. Os contatos do multímetro foram conectados aos fios que saem da bobina do captador, e a resistência foi medida.

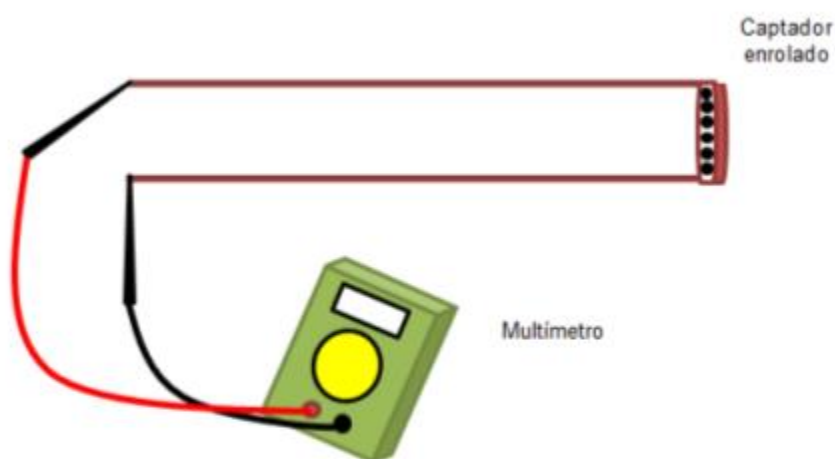


Figura 7 – Medição da resistência do captador, através das duas pontas do captador.
Fonte: Autoria própria.

3.2.5 Análise por Osciloscópio

Utilizou-se a análise por osciloscópio digital e analógico para determinação do comportamento da tensão dos captadores através do tempo. Um multímetro também foi utilizado como complemento, para visualizar os máximos obtidos de corrente e tensão para os captadores. O osciloscópio irá auxiliar na determinação do comportamento dos captadores em relação à tensão de saída e sua relação com o

tempo, já que o aparelho estima tais valores de tensão no eixo vertical (Y) e o tempo no eixo horizontal (X).

3.2.6 Testes Sonoros

Foram executados testes sonoros, para comparação sonora entre os captadores, a fim de obter suas características sonoras. O primeiro teste foi a análise dos captadores qualitativamente, onde os captadores foram aproximados de uma guitarra e seu som amplificado com um amplificador. O áudio foi gravado e analisado qualitativamente. O segundo teste foi a análise dos captadores via *software*. O sinal elétrico foi transferido via interface áudio RCA – USB, capturado e analisado com um *software* de áudio livre (Audacity) para determinar a amplitude de som do captador.

4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

4.1 TESTES COM O FIO ADQUIRIDO PARA ENROLAMENTO

As bobinas adquiridas, fio AWG 29 de cobre e de alumínio, têm 1730 metros por quilo e 5800 metros por quilo, respectivamente, de acordo com o fornecedor do produto. O valor informado pelo fornecedor para o fio de cobre é próximo ao normatizado, que é de 1735.1 metros por quilo. Valores adicionais constam no Anexo 2 e Anexo 3, que são certificados enviados pelo fornecedor do produto.

O diâmetro do fio AWG 29 é bem superior ao do fio AWG 42 (0,2859 mm x 0,0633 mm), o que resulta em resistências bem inferiores aos valores normalmente encontrados em captadores, que pode ser facilmente constatado pela Equação 1. Por efeito do maior diâmetro, há um menor número de voltas e, portanto, menos comprimento de fio é utilizado.

A medição a resistência da bobina não foi possível, pois o fio do começo da bobina não foi deixado para fora em nenhuma das duas bobinas adquiridas. Porém, o valor que poderia ser tirado deste experimento foi dado pelo próprio fornecedor do fio, pelo parâmetro de “resistência por metro de fio”.

Um parâmetro geralmente informado pelos fornecedores para fios é o comprimento por unidade de massa, geralmente metros por quilos, como já citado no tópico 3.2.2, foi estimado este valor para os fios adquiridos. Neste caso, foi estimado este valor medindo 2 metros de fio e pesando o mesmo em uma balança analítica (Bioscale Modelo 2204). Também foram medidos seus diâmetros externos e internos com um micrômetro (micrômetro Zaas). Diversas informações importantes sobre as bobinas são mostradas na Tabela 5. A resistividade foi calculada utilizando o diâmetro medido e a resistência por metros informada pelo fornecedor.

Tabela 5 – Informações relativas aos fios AWG 29.

	Peso de 2 metros de fio	Metros a cada quilo (estimado)	Metros a cada quilo (fornecido)	Metros a cada quilo (padrão)
Fio de Cobre	1,1793g	1695,2m	1730 m	1735,1
Fio de Alumínio	0,4121g	4853,2m	5700 m	-

	Diâmetro externo fio (fornecido)	Diâmetro interno fio (fornecido)	Diâmetro externo fio (medido)	Diâmetro interno fio (medido)
Fio de Cobre	0,326 mm	0,287 mm	0,33 mm	0,27 mm
Fio de Alumínio	0,334 mm	0,287 mm	0,33 mm	0,26 mm

	Resistência por metro (fornecido)	Resistividade (estimado)	Material de revestimento
Fio de Cobre	0,27 Ω /m	$1,59 \times 10^{-8} \Omega.m$	Poliesterimida
Fio de Alumínio	0,43 Ω /m	$2,29 \times 10^{-8} \Omega.m$	Não informado

Fonte: Autoria própria.

O valor de metros por quilo relatado pelo fornecedor durante a compra tem uma grande diferença em relação ao estimado, e por não estar presente nos certificados enviados, que constam no Anexo 2 e 3, foram desconsiderados.

4.2 DESMONTAGEM DOS CAPTADORES

Os captadores adquiridos foram numerados de acordo com a Tabela 6, com a terminação dos códigos de barras que vieram com os captadores, e sua resistência medida por um multímetro (multímetro UNI-T modelo UT30B), na escala de 20k. Os captadores foram vendidos como captadores com 3 posições definidas, como discutido no tópico 2.2.1; mas, tal posição não importa diretamente nesse caso, pois o que se altera é a resistência elétrica do captador, e isso depende somente do enrolamento do captador, e não de qualquer outra parte construtiva, o que não altera nada em relação a montagem nos novos captadores.

Tabela 6 – Tabela de identificação e resistência dos captadores adquiridos e sua posição na guitarra.

Identificação	Posição	Resistência (Ω)
149	Braço	5,28 K
150	Meio	5,47 K
151	Ponte	5,17 K

Fonte: Autoria própria.

O captador 151 foi aberto, removendo o isolamento externo do captador e retirou-se a ponta do fio que sai da bobina do captador, que é soldada a um fio que sai do captador que é utilizado na conexão a parte elétrica da guitarra. Mediu-se o diâmetro do fio da bobina com um paquímetro, onde se obteve o valor de aproximadamente de 0,06 mm, que bate com o valor comum encontrado na literatura (AWG 42). O fio estava envolto em parafina, que é comumente utilizado em captadores para isolamento e redução de ruídos, como é possível visualizar na Figura 8.

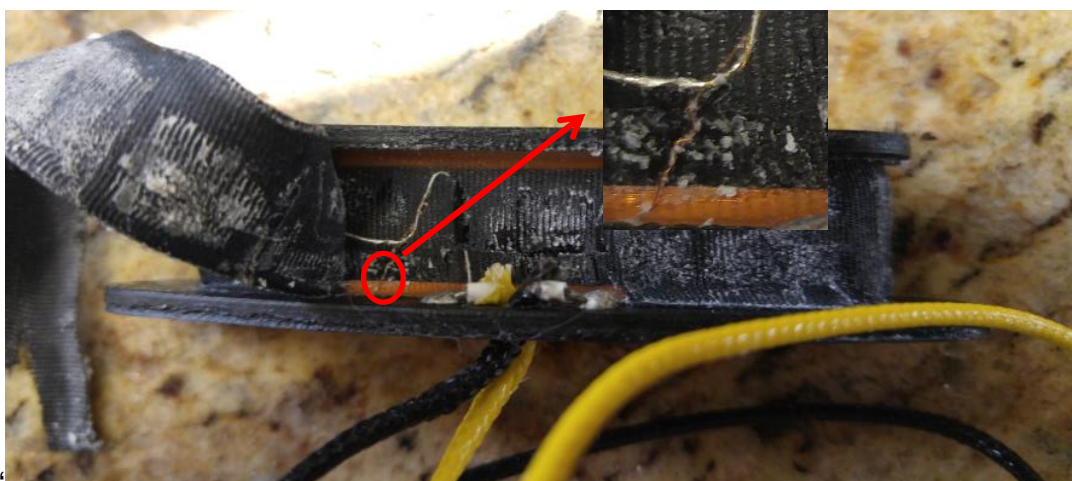
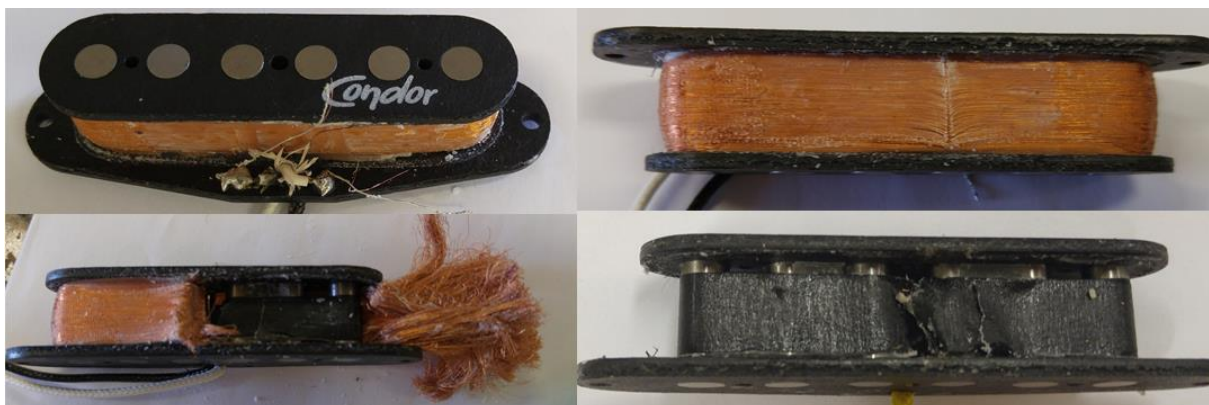


Figura 8 – Captador com sua proteção retirada parcialmente. Nota-se que o fio tem diâmetro pequeno, e pela aproximação da imagem o fio está envolto em parafina.

Fonte: Autoria própria.

Conforme colocado previamente, o captador 150 e 151 tiveram sua proteção⁵ retirada, para isso cortou-se a bobina com um estilete, com cuidado para não se perder parte dos fios dos mesmos (pois foram pesadas posteriormente). A Figura 9 mostra o padrão de corte dos fios em um dos captadores.

⁵ Captadores possuem um isolamento para protegê-los de interferência eletromagnética, assim como proteção a corrosão e outras degradações devido a exposição do fio.



**Figura 9 – Captador com sua proteção retirada à esquerda superior, na direita superior a região que foi cortada, na esquerda inferior o captador no meio do corte da bobina e na direita inferior o captador já com a bobina cortada retirada (Todas as imagens são do captador 151, tirando a inferior direita, do captador 150).
Fonte: Autoria própria.**

Primeiramente, as bobinas de fio foram pesadas sem a retirada do conteúdo de parafina. Visto que a massa de parafina poderia influenciar no peso da bobina de fio, retirou-se parte da parafina com etanol, como é visto na Figura 10, utilizando-se o secador para secagem do mesmo. Ainda sim, constatou-se presença de parafina no estereoscópio (estereoscópio Physis, modelo XTB-2B) mostrado na Figura 10. Para retirada dessa porção remanescente de parafina, levaram-se as bobinas de fio para a estufa (estufa microprocessada Sterillifer 200°C) a 50°C aproximadamente por 20 minutos e posteriormente a 80°C, durante 1 hora, onde boa parte da parafina degradou-se termicamente.



Figura 10 – A bobina após ser lavada com etanol, com destaque a um fio levado ao estereoscópio, onde as setas apontam a presença de parafina, também é destacada a parafina removida em uma placa de petri e a bobina após a secagem com secador (canto superior direito).

Fonte: Autoria própria.

Os valores de massa obtida estão na Tabela 7, assim como uma estimativa de quantos metros de fio cada captador possui, utilizando como base o valor médio estimado de comprimento por quilo de material – 33.785 metros por quilo. Ambos os captadores se aproximam de 1000 metros de fio enrolado, uma quantidade bem expressiva considerando o tamanho do captador.

Tabela 7 – Massa obtida das duas bobinas dos captadores.

Período	Massa (Bobina Captador 150) (g)	Massa (Bobina Captador 151) (g)		
Retirado do captador	31,1098	Não pesado		
Após lavagem com etanol	30,5826	29,6892		
Após uso da estufa (50°C)	30,5629	29,6892	Comprimento de fio estimado (Captador 150) (m)	Comprimento de fio estimado (Captador 151) (m)
Após o uso da estufa (80°C)	30,5444	29,6369	1031,94	1001,28

Fonte: Autoria própria.

Alguns fios de tamanhos bem próximos tiveram seus comprimentos medidos e foram pesados. Foram 35 fios de 123,09 mm de comprimento, cuja massa foi de 0,1275 g. Utilizando a precisão de 0,01 mm no paquímetro, e 0,001 g na balança,

tem-se um comprimento de aproximadamente 33,65-33,92 metros a cada 1 grama do captador (ou de 33650 m a 33920 m por kg, esse valor pode diferir bastante devido ao erro da balança e da própria medição do fio. Esse valor difere do normatizado, que é de 34892,2 metros por quilo, porém, por ser um método simples de estimativa, pode apresentar uma grande inexatidão.

O resto do captador (carcaça), constituído pelos imãs de Alnico, o carretel plástico, os fios de ligação, também foi pesado, e os resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Massa obtida do resto do captadores.

Massa (Resto do Captador 150) (g)	Massa (Resto do Captador 151) (g)
34,2752	34,5158

Fonte: Autoria própria.

4.3 ANÁLISE MICROSCÓPICA ÓTICA DO FIO

Foram realizadas análises microscópicas óticas para os dois fios recebidos, a fim de analisar a superfície dos fios adquiridos. Para isso, foram cortados fios de pequeno comprimento e retirado suas pontas por lixamento. Foi utilizado um microscópio ótico (microscópio ótico Carl Zeiss Modelo Axio Scope.A1).

Para o fio de cobre, a imagem retirada de seu estado topográfico está na Figura 11, à esquerda. É possível ver restos dos pigmentos do isolamento, de cor amarelada. A imagem da direita da Figura 11 é o estado topográfico do fio de alumínio, onde os restos dos pigmentos do isolamento são os pontos mais escuros. Estes restos de pigmento estão em menor quantidade que no fio de cobre, o que pode ser causado pela adesão do filme polimérico ao cobre ser maior, ou também do material de revestimento ser diferente. Foi possível verificar tal diferença inclusive ao manipular o material, onde o fio de alumínio perdia facilmente o isolamento.

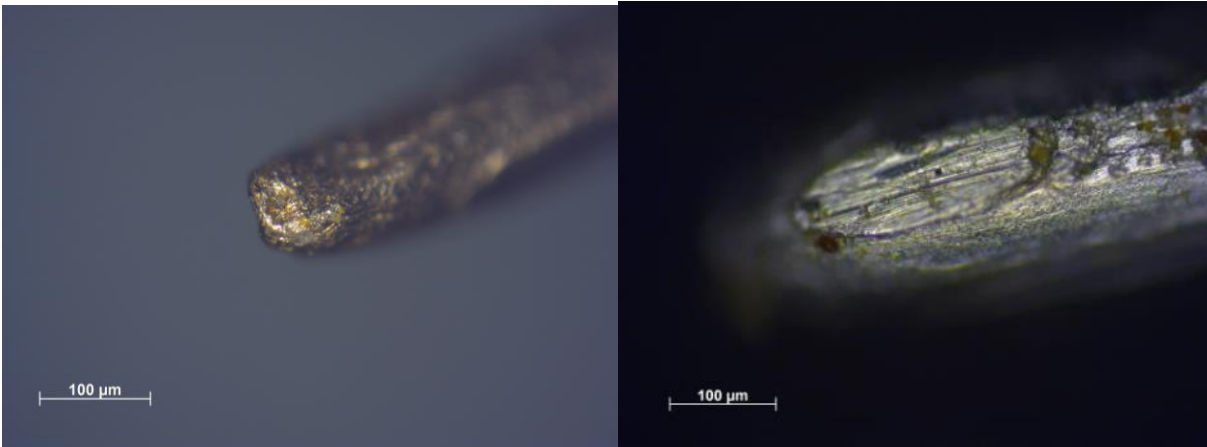


Figura 11 – À esquerda, fio de cobre sem o isolamento, e à direita, fio de alumínio sem o isolamento, ambos com destaque ao perfil longitudinal da superfície.

Fonte: A autoria própria.

4.4 MONTAGEM DOS CAPTADORES

Para o enrolamento do captador, utilizou-se o torno mecânico em baixa velocidade (48 rpm), onde as carcaças dos captadores desmontados foram fixadas com a trava do torno mecânico, como visto na Figura 12.



Figura 12 – O captador enrolado com cobre durante o processo de enrolamento no torno mecânico.

Fonte: A autoria própria.

O primeiro captador a ser enrolado foi o de cobre, onde se utilizou a carcaça do captador 150 como base para o enrolamento do novo captador. Enrolou-se o captador até atingir o limite de diâmetro do captador. Após enrolado, o captador teve sua resistência medida com um multímetro (multímetro Agilent modelo U1232A) porém o valor oscilou entre 20 – 25 ohms, utilizando o cabo jacaré e o cabo ponta durante a medição. Focou-se, para produção do captador de alumínio, em se atingir uma resistência próxima ao primeiro captador, fixando a resistência de 20 ohms. Através da quantidade de metros por quilo e a quantidade de ohms por metro, estimou-se o peso necessário de fio a ser enrolado neste captador para atingir a resistência desejada. O captador foi pesado diversas vezes até chegar próximo do peso pré-determinado. Esse captador foi enrolado na carcaça do captador 151. As carcaças foram pesadas, assim como o captador após ser enrolado, em uma balança de precisão centesimal (Balança Bel *Engineering* Modelo L4202).

Previendo possíveis alterações nos resultados, é importante relatar que durante o processo de enrolamento o captador 151, este caiu em um balde com limalha de ferro, e para retirada dessa limalha de ferro, foi utilizado um imã de neodímio. Os valores de peso obtidos e comprimentos calculados estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados obtidos dos captadores montados.

	Captador enrolado com cobre (150)	Captador enrolado com alumínio (151)
Massa da carcaça do captador (m_i)	32,15g	32,00g
Massa do captador enrolado (m_f)	76,04g	41,33g
Massa de fio enrolado ($m_f - m_i$)	43,89g	9,33 g
Metros de fio no captador (calculado pela informação do fornecedor)	74,45 m	45,28m

Fonte: Autoria própria.

Os dois captadores após enrolados tiveram as pontas de fio da entrada e saída soldadas aos fios de saída do captador, *hot* e *ground*. Para diferenciação visual, o captador 150 tem saída de fios pretos e amarelos, enquanto o captador 151 tem saída de fios pretos e brancos. A solda utilizada foi a solda Best, utilizada para aparelhos eletrônicos, e o Ferro de Soldar foi o Hikari Plus SC-30 de 30W, 127 V.

Após a soldagem, o captador foi isolado com fita isolante. Na Figura 13 tem-se a solda e o material utilizado para solda.

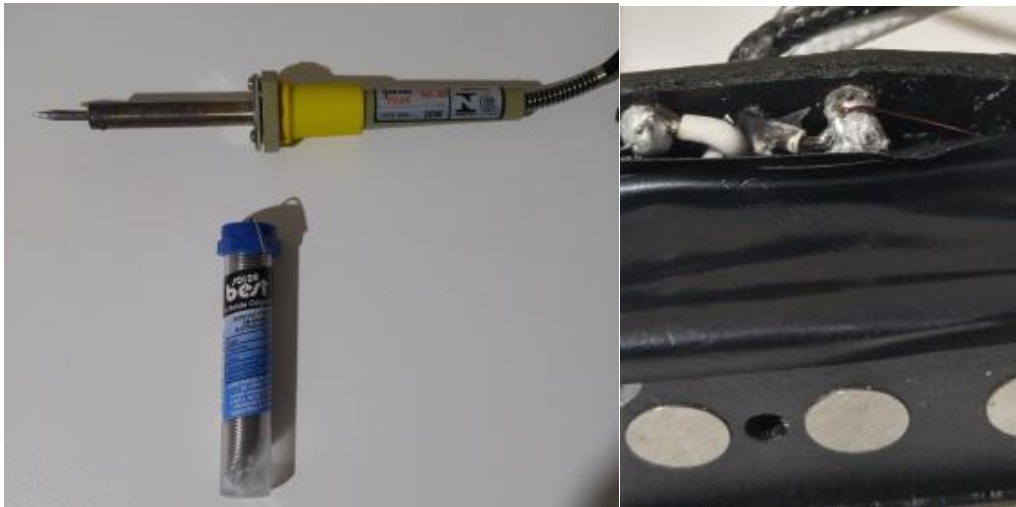


Figura 13 – Ferro de soldar e solda à esquerda, e solda do captador enrolado com alumínio.
Fonte: Autoria própria.

Os captadores, antes e após a soldagem, são mostrados na Figura 14.

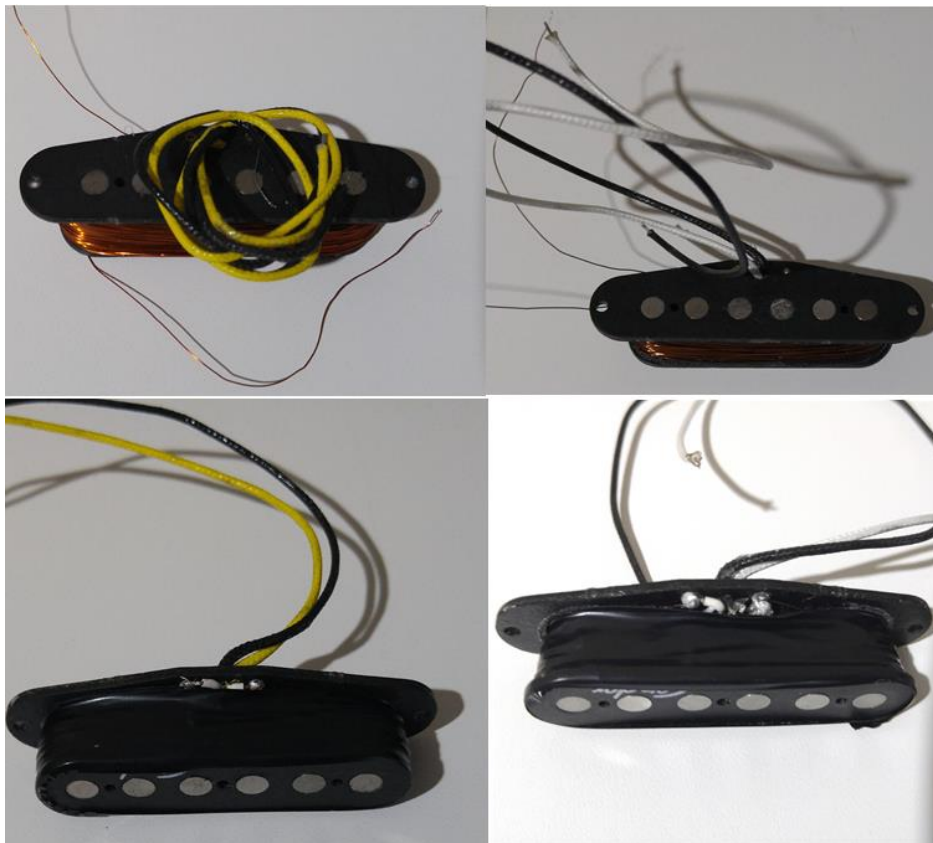


Figura 14 – Captadores antes e após soldagem e isolamento, na esquerda o captador 150 e a direita o captador 151, na parte de cima os anteriores a soldagem e isolamento e na parte inferior os após.

Fonte: Autoria própria.

Após serem soldados, os captadores puderam ter sua resistência medida por um multímetro Instrutherm MD-390 em escala automática, incluindo o captador não alterado, que serviu como uma referência. Este multímetro foi mais preciso, onde não se teve variações como no teste anterior. A Tabela 10 mostra a resistência obtida dos captadores, além das calculadas por resistência por metro onde a resistência por metro é a informada pelo fornecedor e o comprimento de fio é o estimado experimentalmente.

Tabela 10 – Resistência dos captadores enrolados e do captador de referencia, além da resistência teórica.

Identificação	Resistência (Ω)	Resistência teórica (Ω)
149	5,16 K	-
150	20,8	19,91 Ω
151	19,4	19,52 Ω

Fonte: Autoria própria.

Nota-se uma diferença considerável do valor da resistência do captador 149 da primeira medição (multímetro UNI-T UT30B) e da segunda medição (multímetro Instrutherm MD-390), provavelmente pelo segundo ser mais preciso. Além disso, há uma leve variação dos valores teóricos para os medidos, que podem ser por erros experimentais ou dos valores relatados pelo fornecedor.

4.5 ANÁLISE POR OSCILOSCÓPIO

Após a montagem do captador, o mesmo foi analisado em dois osciloscópios: o osciloscópio analógico ICEL OS-21 20 MHz e o osciloscópio digital Tektronix TBS 1102B-EDU. Em conjunto com essas análises, foi realizada também a análise de corrente/tensão gerada com o multímetro Instrutherm MD-390.

Para essas análises foi necessário construir um aparato para oscilação de uma corda sobre o captador, semelhante ao que se encontra em uma guitarra. O aparato montado é constituído por uma corda de guitarra presa por uma ponte fixa de guitarra (feitos de madeira) e um cilindro metálico como *nut*⁶ do braço. Uma

⁶ *Nut* é a parte da guitarra que segura a corda da guitarra fixa e ajuda no tensionamento da mesma. Geralmente fica entre o braço e a mão da guitarra.

tarraxa metálica foi utilizada para controlar a afinação da corda (que auxilia no tracionamento das cordas por meio de movimento rotacional). Afinou-se⁷ a corda em Lá, sobre frequência de 440 Hz, com um afinador Strinberg Digital *Guitar Tuner* ST-12. A Figura 15 mostra o aparato e o afinador.



**Figura 15 – Aparato criado para utilização do captador no osciloscópio, assim como o afinador à esquerda, durante a afinação em Lá (A).
Fonte: Autoria própria.**

O aparato funciona basicamente da mesma forma que uma guitarra, a corda sofre vibração e sua oscilação gera um sinal elétrico no captador. Esse sinal sai pelos polos do captador e podem ser visualizados graficamente pelo osciloscópio como ondas sonoras. Assim, uma batida mais forte na corda do aparato resulta em uma onda de maior amplitude no osciloscópio.

Apesar de se utilizar os valores máximos obtidos de tensão durante os ensaios, não é possível afirmar que eles são os maiores possíveis, já que uma batida pode fazer a corda oscilar mais, e não há nenhum sistema que controle a oscilação da corda limitando-a.

Para realização do experimento, os captadores foram posicionados com os ímãs na direção da corda da guitarra, bem próximo da ponte, e foi oscilado a corda em um ponto único, aproximadamente a 35 cm a partir da ponte do aparato (indicado com uma fita crepe). As saídas do captador foram conectadas aos osciloscópios pelas pontas de prova dos aparelhos.

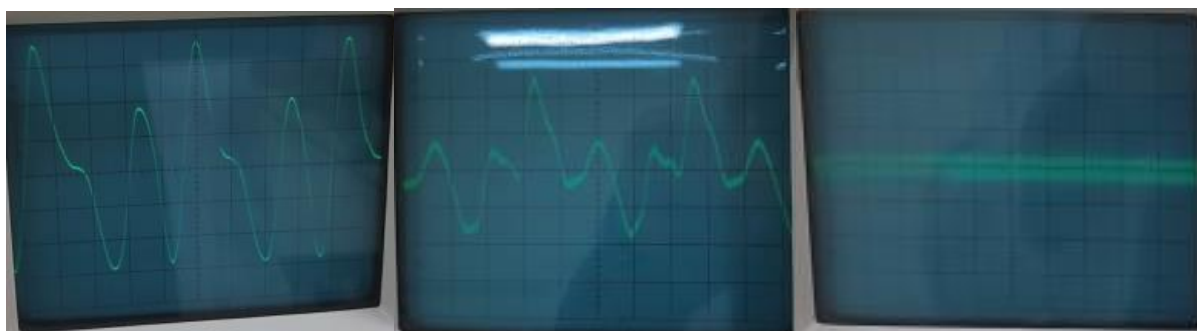
Como mencionado no tópico 3.2.5, o osciloscópio é um aparelho que apresenta a tensão (na escala vertical) em relação ao tempo (na escala horizontal). As imagens que constituem este tópico foram retiradas de vídeos realizados durante o experimento, pois cada oscilação da corda gera diferentes resultados numéricos ao longo de sua oscilação.

⁷ A corda é afinada manualmente com o auxílio das tarraxas e do *nut*.

4.5.1 Análise por Osciloscópio Analógico

Um osciloscópio analógico também foi utilizado para analisar o comportamento de tensão dos captadores. Alguns dados importantes, como magnificação e escalas foram ajustados no próprio aparelho, diferentemente do osciloscópio digital, que isso é informado diretamente na tela. O modo utilizado do osciloscópio é o de AC, pois o captador possui corrente alternada. Os valores obtidos foram calculados a partir das divisões da tela manualmente, e não são automáticos, como no osciloscópio digital. Este osciloscópio é utilizado em medidas dinâmicas, como é o caso deste experimento. Em todos os experimentos deste tópico, exceto o do captador 151, a escala horizontal foi ajustada a 2 milisegundos/divisão.

O captador 149, configurado na escala vertical com 0.1 volt/divisão, sem magnificação, teve comportamento de onda como mostrado na Figura 16, à esquerda. Nessa escala, essa imagem apresenta tensão pico a pico de 0,66 V, tensão máxima de 0,36 V e tensão mínima de -0,3V. Alterando a escala vertical para 50 mV/divisão, e utilizando a magnificação x5, tem-se o comportamento da tensão do captador 150, presente no centro da Figura 16. O perfil da onda gerado é bem semelhante ao do captador de cobre enrolado de fábrica, o que indica que o material gera este tipo de comportamento de onda, porém com intensidade diferente, dependendo das características de enrolamento do captador (número de voltas, diâmetro do fio, comprimento do fio, entre outros). Tem-se nesse caso uma tensão pico a pico de 0,22V, uma tensão máxima de 0,13V e uma tensão mínima de -0,09 V. Por último, o captador 151, enrolado com fio de alumínio, também foi analisado, obteve-se somente ruído neste captador, como mostrado à direita na Figura 16. Ao se oscilar a corda sobre o captador, não houve diferença no comportamento de onda do captador no osciloscópio, independe da escala vertical ou horizontal.



**Figura 16 – Imagem da tela do osciloscópio analógico, mostrando o comportamento de onda presente nos captadores 149 (esquerda), 150 (centro) e 151 (direita) após a oscilação da corda metálica (captador 151 está em uma escala vertical diferente dos demais).
Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 11 reúne os valores máximos extraídos das imagens do osciloscópio analógico, além dos valores obtidos com o multímetro (multímetro Instrutherm Modelo MD-390). O multímetro também mostra a corrente máxima, que não é obtida através de osciloscópio.

Tabela 11 – Tensões e correntes máximas obtidas nos osciloscópios e multímetro ao se oscilar a corda sobre o captador.

Captador 149	Tensão pico a pico	Tensão máxima	Tensão mínima	Frequência	Corrente máxima
Osciloscópio analógico	0,66 V	0,36 V	-0,3 V	-	-
Multímetro	-	0,400 V	-	-	80,4 uA

Captador 150	Tensão pico a pico	Tensão máxima	Tensão mínima	Frequência	Corrente máxima
Osciloscópio analógico	0,044 V	0,026 V	-0,018 V	-	-
Multímetro	-	0,017V	-	-	21,7 uA

Captador 151	Tensão pico a pico	Tensão máxima	Tensão mínima	Frequência	Corrente máxima
Osciloscópio analógico	*	*	*	-	-
Multímetro	-	0,001V	-	-	4,4 uA

Fonte: Autoria própria.

Os valores presentes na Tabela 11 não são necessariamente os maiores obtidos durante o experimento, mas sim os que foram visíveis durante os vídeos gravados. Estes valores podem ser maiores caso haja uma oscilação de corda com maior intensidade. Os valores com * indicam que não houve alteração no comportamento de onda após oscilação da corda.

É percebido pela tabela que somente os valores obtidos pelo multímetro indicam que há uma resposta do captador de alumínio aparente, embora com valores inferiores ao captador de cobre de mesma resistência.

4.5.2 Análise por Osciloscópio Digital

O osciloscópio digital é caracterizado por apresentar os valores importantes da análise diretamente em sua tela e também pela facilidade com armazenamento de dados. Porém, para utilização de tal facilidade, a função de onda deve ser constante, pois para armazenar os dados em uma mídia USB deve-se apertar um botão, e o aparelho geralmente trava por alguns segundos. Considerando que o comportamento de onda dos captadores não é constante, foi necessário filmar a tela do aparelho. Este aparelho foi utilizado somente para visualização da curva de tensão em relação ao tempo obtida, e seus valores de tensão foram desconsiderados, pois estes valores diferem bastante do obtido no osciloscópio analógico e multímetro, que são mais confiáveis. Isso pode ter acontecido devido a algum ajuste do aparelho, que tem configuração bem complexa.

O primeiro captador a ser apresentado é o 149, enrolado de fábrica, utilizado como referência. Primeiramente, verificou-se o comportamento da tensão emitida pelo captador em relação ao tempo sem oscilação da corda metálica, como visto na Figura 17, à esquerda. É possível ver um ruído pequeno, porém constante. Esse ruído, que foi visível em todos os captadores, é proveniente do próprio captador e pode advir também do equipamento, sem qualquer oscilação da corda. Posteriormente verificou-se o comportamento da tensão em relação ao tempo após oscilar-se a corda metálica, como visto na Figura 17, à direita. O sinal tem um comportamento de onda, que assume tal formato durante as batidas na corda.

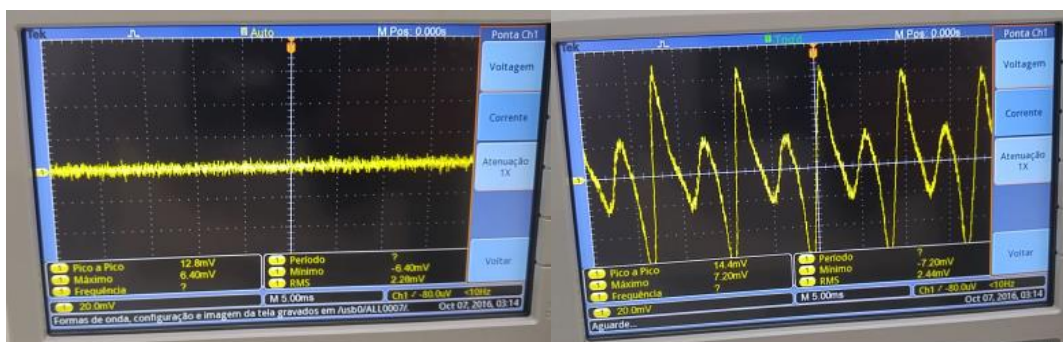


Figura 17 – Fotografia da tela do aparelho, mostrando o comportamento da tensão emitida pelo captador 149, à esquerda sem qualquer oscilação na corda, e à direita com a oscilação da corda.

Fonte: Autoria própria.

O captador 150, apresentou um comportamento em geral parecido com o captador 149, por ser do mesmo material, porém em uma escala menor. A Figura 18, à esquerda, mostra o ruído gerado por este captador. À direita na figura tem-se a resposta do captador ao oscilar a corda. Esse comportamento em menor escala em relação a tensão obtida deve-se a indução do mesmo ser bem inferior ao do captador 149, pois há um número inferior de voltas em torno do captador.



Figura 18 – Fotografia da tela do aparelho, mostrando o comportamento da tensão emitida pelo captador 150, à esquerda sem qualquer oscilação na corda, e à direita com a oscilação da corda.

Fonte: Autoria própria.

O último captador avaliado no osciloscópio digital foi o captador 151, enrolado em alumínio, produzido em experimento. O captador não obteve resposta visível no osciloscópio, ou seja, os valores obtidos estavam abaixo do ruído ou fora do mínimo em que o aparelho consegue detectar, que indica que a oscilação da corda resulta em uma baixa variação de tensão.

4.6 TESTES SONOROS

O primeiro teste sonoro foi para verificação da resposta sonora dos captadores. Os captadores tiveram suas saídas conectadas sem solda a um conector de áudio P10 fêmea. Foi utilizado um amplificador e um pedal de efeitos (esse sem nenhum efeito de áudio, com o som limpo), e o captador foi conectado ao pedal por um cabo P10 macho de duas pontas. O áudio foi gravado com um *software* para celular próximo à caixa de som. O volume no amplificador não foi alterado durante todo o teste e o posicionamento do captador foi na 12^o traste⁸ da guitarra presente na Figura 19.



**Figura 19 – Guitarra utilizada no experimento.
Fonte: Autoria própria.**

O resultado obtido é qualitativo, mas indicou uma resposta do captador 149 com volume e ruídos padrões para um captador comum; já o captador 150 teve uma resposta com volume mais baixo e mais limpo; e, por fim, o captador 151, enrolado com alumínio, teve uma resposta com volume limpo porém bem inferior aos outros dois captadores. O captador de alumínio, mesmo com os resultados baixos para os valores de tensão e corrente obtidos no multímetro, teve uma resposta sonora audível e relativamente boa, ficando próximo ao captador enrolado de cobre, porém com menor volume.

Outra análise realizada foi a gravação com uma interface USB, da empresa Behringer, modelo UCA222, utilizando o aparato que foi utilizado no experimento com osciloscópio. Os captadores foram conectados a interface USB, a interface foi conectada a um computador e o áudio gerado pelos captadores foi gravado pelo

⁸ O braço da guitarra é dividido normalmente em 21 casas, chamados de trastes. Essa divisão é assimétrica, as casas do braço para a ponte vão diminuindo de tamanho.

programa de obtenção de áudio padrão (gravador de áudio) do sistema operacional Windows 10, da empresa Microsoft. O aparato, assim como a interface USB ligada ao captador e ao computador, estão presentes na Figura 20.



**Figura 20 – Interface USB, em vermelho, o aparato e o captador posicionado próximo a ponte.
Fonte: Autoria própria.**

A gravação de áudio dos três captadores foi importada para o programa Audacity da empresa Audacity Team, e o programa gerou a linha de áudio dos mesmos, onde a amplitude de áudio vai de 1 a -1 no eixo das ordenadas e o tempo aumenta para a direita no eixo da abscissa, conforme visto na Figura 21, na parte superior. A resposta do captador 149 e 150 são bem visíveis em relação à amplitude e também em relação a duração do sinal, e a resposta do captador de alumínio foi tão baixa a ponto de não aparecer se comparado aos outros nesta escala. No *software*, é possível mudar a amplitude (no eixo das ordenadas), e deixar mais claro o comportamento do som em relação ao tempo, na parte de baixo da figura.

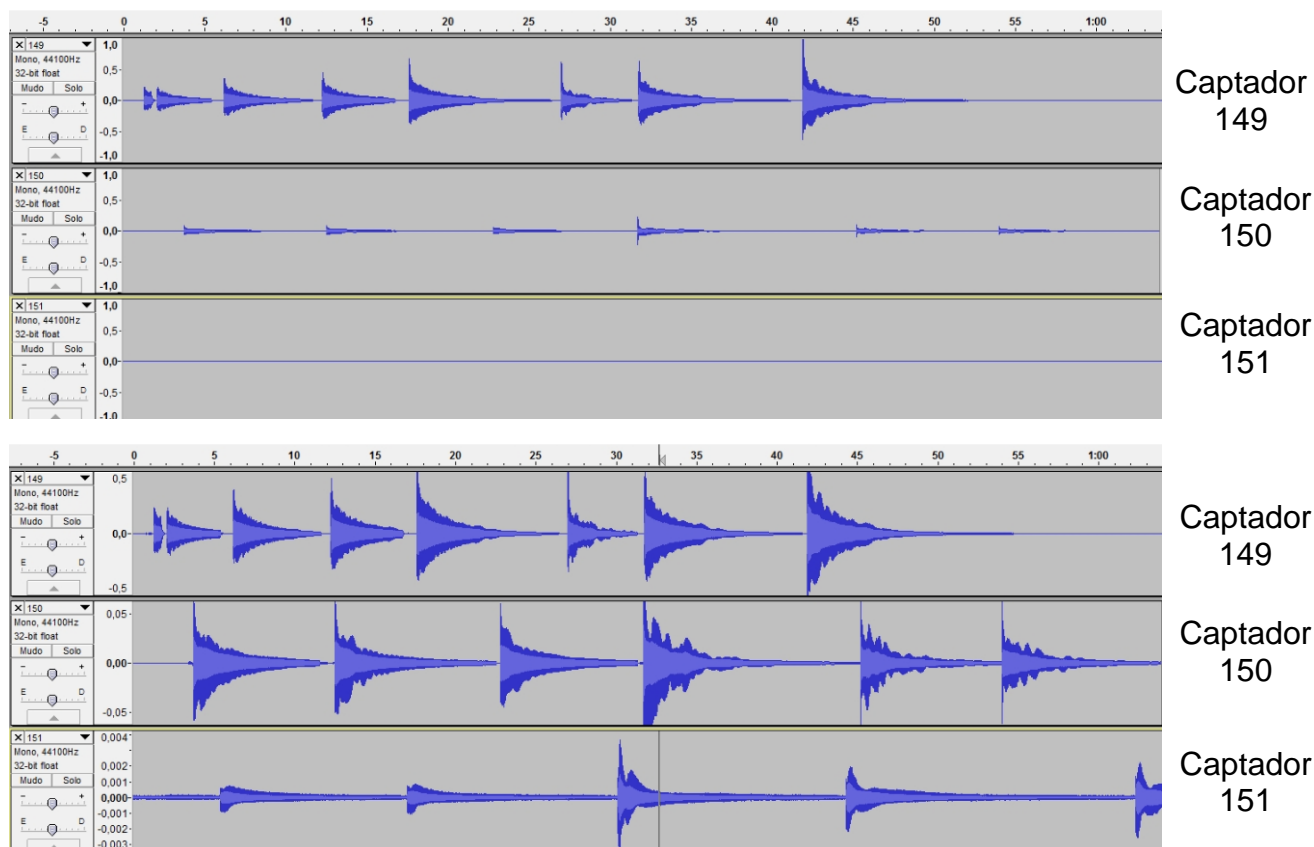


Figura 21 – Resposta dos captadores 149 (primeira linha, superior), 150 (segunda linha, meio) e 151 (terceira linha, inferior) no Audacity, na parte superior, e na parte inferior a resposta dos 3 captadores com ampliação diferente, sob mesma ordem.

Fonte: Autoria própria.

Por último, o captador 151 teve sua amplitude aumentada com o ganho de 36 decibéis, através de uma das ferramentas do *software*. Qualitativamente, utilizou-se o *software* Windows Media Player para se ouvir o áudio amplificado. Tanto o ruído como o som gerado ao oscilar a corda foram amplificados, ficando bem audíveis, porém o ruído ficou bem aparente.

4.7 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS

Apesar dos resultados obtidos no osciloscópio para o captador enrolado com alumínio não serem tão conclusivos, a medição de corrente e tensão com o multímetro e os resultados sonoros foram mais conclusivos. A saída de som do captador enrolado com alumínio foi bem inferior a dos outros, até comparado ao captador de mesma resistência (captador 150), porém, com um sistema eletrônico

de amplificação e/ou maior comprimento de fio enrolado e/ou menor diâmetro do fio, a saída de som pode alcançar valores próximos ao dos captadores normais.

Em relação aos custos envolvidos, as duas bobinas de fio, de 1 quilo, custaram aproximadamente 50 reais cada. A bobina de alumínio tinha aproximadamente, pelo cálculo estimado, 4700 metros, enquanto a bobina de cobre aproximadamente 1700 metros. Isso significa que uma única bobina de alumínio equivale a aproximadamente três de cobre. Supondo que um captador de alumínio fosse feito com o mesmo comprimento do de cobre, seria possível fazer aproximadamente 3 captadores de alumínio pelo mesmo custo que um de cobre. Para um fio mais fino, como o AWG 42, que resultaria em um maior número de voltas e uma resposta de áudio mais expressiva, os valores de um quilo de fio de cobre são aproximadamente de 11 dólares por quilo, enquanto de um quilo de fio de alumínio são aproximadamente de 6 dólares por quilo⁹.

Porém, um captador de alumínio, mesmo que enrolado com o número de voltas que um de cobre, tem resposta bem menor como visto nos experimentos sonoros. Então haveria uma necessidade de amplificação, seja pelo aumento no número de voltas, que é restrito pelo tamanho do captador ou por uma amplificação por um sistema elétrico. Ambas as alternativas podem ser economicamente viáveis, porém requerem um estudo maior.

Dentre as vantagens da troca por alumínio, além dos custos, tem-se a redução considerável de peso. Porém como desvantagens, tem-se uma resistência mecânica menor, notada durante o enrolamento dos captadores - o fio de alumínio era bem mais quebradiço que o de cobre.

Por fim, algo que também pode ser considerado é que pode ter ocorrido a desmagnetização do ímã de Alnico do captador 151, por parte do ímã de neodímio utilizado na remoção da limalha de aço durante a montagem deste captador. Caso isso tenha acontecido, há uma diminuição considerável nas linhas de fluxo magnético, já que o campo magnético do ímã de Alnico gera um campo magnético na corda, e essa oscilação de campo magnético ao se vibrar a corda que induz a

⁹ Conforme pesquisado no site Alibaba, nos links <https://www.alibaba.com/product-detail/Competitive-price-awg-42-heavy-formvar_60435354309.html> e <https://www.alibaba.com/product-detail/transformer-42-awg-plain-enamel-cooper_60515408753.html> na data de 18/10/2016, as 18:35.

corrente, portanto com um menor fluxo magnético, menor a corrente resultante de indução eletromagnética.

5 CONCLUSÃO

Em relação aos custos e em relação ao peso do captador, esta substituição é viável, porém, em relação às características sonoras, ainda é necessário um estudo mais aprofundado, pois sua resposta sonora ainda é relativamente inferior aos de captadores de cobre.

Considera-se, com os resultados obtidos, que foi alcançado o objetivo geral deste trabalho. Justificou-se a substituição do cobre por alumínio, pois foi possível determinar que existe uma resposta sonora, porém, que deve ser aperfeiçoada em trabalhos futuros.

Ao longo deste trabalho procurou-se justificar a utilização do alumínio como um material para enrolamento de captadores, e concluiu-se que esta substituição é viável.

6 ESTUDOS POSTERIORES

De acordo com os resultados obtidos é indicada a análise da resistência mecânica de fios de menores diâmetros, que são os que compõem normalmente os captadores magnéticos, isso pode indicar se o fio de alumínio é possível de ser utilizado neste tipo de aplicação, sem qualquer tipo de alteração no maquinário de montagem dos captadores. Esta avaliação da conformabilidade do fio de alumínio é indicada visto que em laboratório o comportamento mecânico do fio de alumínio foi inferior ao do cobre, pois foi mais quebradiço ao cisalhamento durante o corte dos fios, e menos resistente a tração ao retirar-se a camada polimérica, feito para algumas análises e soldagem, o que, em menores diâmetros pode representar um problema maior. Também é indicado o estudo do aumento da resposta sonora dos captadores de alumínio.

Outro fator que pode complementar este trabalho é promover uma análise do aumento da resistividade do fio do captador devido à conformação mecânica durante o enrolamento da bobina, que no caso deste estudo foi desconsiderado, mas pode ser uma fonte de aumento de resistividade dos fios dos captadores, assim como a influência das impurezas e da temperatura de operação.

Um estudo que pode ampliar a área a qual este trabalho se aplica é da substituição do cobre por alumínio em captadores de ondas sonoras em geral, como captadores de outros instrumentos, como, por exemplo, baixo, violino e microfones, que também funcionam por indução.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Características físicas e químicas. **ABAL**, 2016. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 08 maio 2016.

BEAUCHAMP, G. D. **Electrical stringed musical instrument**. US 2089171 A, 02 Junho 1934.

BROSNAC, D. **Guitar Electronics for Musicians: A Workbook**. [S.l.]: D B Music Co, 1980.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

FILARDO, J. V. **Perdas Magnéticas**. UFPR. Curitiba, p. 5. 2003.

INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION LATIN AMERICA. O Cobre. **International Copper Association Latin America**, 2016. Disponível em: <<http://procobre.org/pt/o-cobre/propriedades/>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

KING, K. THE ZEPHYR SILVER PICKUPS. **Seymour Duncan**, 2014. Disponível em: <<http://www.seymourduncan.com/blog/product-news/the-zephyr-silver-pickups>>. Acesso em: 15 abr. 2016.

LUIGHI, E. **Guia Ilustrado da Guitarra: Manual de conhecimentos e reparos essenciais**. São Paulo: HMP Editora, 2005.

LUIGHI, E. **Guia Ilustrado da Guitarra: Tudo sobre captadores**. São Paulo: HMP, 2005.

MALAGOLI CAPTADORES. Esquemas para captadores singles. **Malagoli captadores**, 2016. Disponível em:

<http://www.malagoli.com.br/#!/untitled/zoom/c10ct/image_1s0t>. Acesso em: 06 maio 2016.

MALAGOLI CAPTADORES. Loja. **Malagoli Captadores**, 2016. Disponível em: <<http://www.captadores.com.br/>>. Acesso em: 06 maio 2016.

MALAGOLI CAPTADORES. Questões técnicas sobre captadores. **Malagoli Captadores**, 2016. Disponível em: <<http://www.malagoli.com.br/#!/questes-tcnicas/c1x5e>>. Acesso em: 03 maio 2016.

MCDONALD, K. T. **Electric Guitar Pickups**. Joseph Henry Laboratories, Princeton University. Princeton, p. 7. 2007.

PAGLIARINI, C. R. **Captadores de instrumentos musicais elétricos e Lei de Faraday**. Unicamp. Campinas, p. 18. 2004.

ROCHA, F. F. D. **Inovação na utilização de cabos de alumínio em chicotes elétricos automotivos na indústria brasileira**. São Caetano do Sul: [s.n.], 2014.

SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de Transformadores para redes de média tensão**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2012.

TABELA de medidas de fios esmaltados - PY2BBS. **Site PY2BBS**, 2016. Disponível em: <http://www.py2bbs.qsl.br/fios_esmaltados.php>. Acesso em: 19 out. 2016.

THE MUSIC TRADES ONLINE. Census. **The Music Trades Online**, 2016. Disponível em: <<http://www.musictrades.com/census.html>>. Acesso em: 19 out. 2016.

WACKER, D. Beefing Up Single Coils. **Premier Guitar**, 2007. Disponível em: <<http://www.premierguitar.com/articles/beefing-up-single-coils-1>>. Acesso em: 08 maio 2016.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: Eletromagnetismo**. 12a ed. ed. São Paulo: Pearson, v. 3, 2009.

Anexo 1 – Tabela de dados importantes para fios esmaltados de cobre, como classificação, diâmetro, comprimento por peso, entre outros.

AWG ou B & S	Seção (mm²)	Diâmetro (mm)	Espiras por cm	Peso g/m	Comprimen to m/kg	Resistência (ohms/m)
0000	107,2	11,86	0,84	948	1,05	0,000158
000	85,30	10,39	0,96	750	1,33	0,000197
00	67,43	9,226	1,08	596	1,67	0,000252
0	53,48	8,252	1,21	474	2,11	0,000317
1	42,41	7,348	1,36	375	2,66	0,0004
2	33,63	6,544	1,52	295	3,39	0,0005
3	26,67	5,827	1,71	237	4,22	0,00063
4	21,15	5,189	1,93	188,40	5,31	0,000815
5	16,76	4,620	2,16	149,35	6,70	0,001028
6	13,23	4,115	2,43	118,48	8,44	0,001296
7	10,55	3,665	2,73	93,99	10,64	0,001634
8	8,367	3,264	3,06	74,54	13,41	0,002061
9	6,633	2,906	3,44	59,09	16,92	0,002600
10	5,260	2,588	3,86	46,86	21,34	0,003278
11	4,169	2,304	4,34	37,14	26,92	0,004135
12	3,307	2,052	4,87	29,46	33,94	0,005213
13	2,627	1,829	5,44	23,41	42,72	0,006562
14	2,081	1,628	6,14	18,54	53,54	0,008283
15	1,651	1,450	6,90	14,71	67,98	0,010441
16	1,307	1,290	7,75	11,64	85,88	0,013192
17	1,040	1,151	8,69	9,270	107,9	0,016570
18	0,8235	1,024	9,76	7,337	136,3	0,020935
19	0,6533	0,912	10,9	5,820	171,8	0,026393
20	0,5191	0,813	12,3	4,625	216,2	0,033212
21	0,4117	0,724	12,8	3,668	272,7	0,041880
22	0,3247	0,643	15,5	2,893	345,7	0,053096
23	0,2588	0,574	17,4	2,305	433,8	0,066628
24	0,2051	0,511	19,6	1,827	547,3	0,084070
25	0,1626	0,455	22,0	1,449	690,3	0,106037
26	0,1282	0,404	24,7	1,142	845,6	0,134499
27	0,1024	0,361	27,7	0,912	1096,7	0,168449
28	0,0804	0,320	31,2	0,716	1395,7	0,214379
29	0,0647	0,287	34,8	0,576	1735,1	0,266513
30	0,0507	0,254	39,3	0,451	2215,2	0,340263
31	0,0401	0,226	44,2	0,357	2798,2	0,429799

32	0,0324	0,203	49,2	0,288	3468,1	0,532709
33	0,0254	0,180	55,5	0,227	4411,1	0,677543
34	0,0201	0,160	62,5	0,179	5582,7	0,857516
35	0,0158	0,142	70,4	0,141	7087,8	1,088693
36	0,0127	0,127	78,7	0,113	8861,0	1,361052
37	0,0102	0,114	87,7	0,0909	10997,1	1,689166
38	0,0082	0,102	98,0	0,0728	13736,9	2,109997
39	0,0062	0,089	112	0,0554	18043,0	2,771419
40	0,0049	0,079	126	0,0437	22899,9	3,517450
41	0,0040	0,071	141	0,0353	28351,2	4,354772
42	0,0032	0,064	156	0,0287	34892,2	5,359474
43	0,0025	0,056	178	0,0219	45573,5	7,000129
44	0,0020	0,051	196	0,0182	54947,5	8,439987
45	0,00157	0,045	222	0,0142	70577,0	10,84069
46	0,00125	0,040	250	0,0112	89324,0	13,72025
47	0,00100	0,036	278	0,00907	110276,5	16,93858
48	0,00078	0,032	312	0,00716	139568,7	21,43790
49	0,00062	0,028	357	0,00549	182293,9	28,00052
50	0,00049	0,025	400	0,00437	228669,4	35,12385
51	0,00039	0,022	454	0,00339	295285,9	45,35621
52	0,00031	0,020	500	0,00280	357296,0	54,88102

Fonte: Adaptado de PY2BBS (2016)

Anexo 2 – Certificado fornecido pela empresa JF Pasqua para o fornecedor, sobre o fio de cobre esmaltado adquirido para os experimentos.



JF PASQUA CONDUTORES ELETRICOS LTDA
 AVENIDA JOÃO FRANCISCO PASQUA, 5841 / SITIO SAO JOÃO / 37800-000 - MG
 Tel.: (35) 3559-6777 Fax.: (35) 3559-6789
 CNPJ.: 03.981.899/0001-69 I.E.: 287.105.286.0022

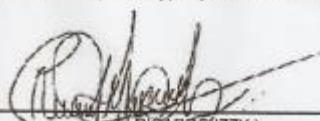
CERTIFICADO DE QUALIDADE

Nº certificado: 173 Data do certificado: 19/04/2016 Contrl. interno: 212680
 Cliente: METAL FIO CONDUTORES Número NF: 98316

Produto..... PASQUATERM Soldável (Sim/Nao): N
 Tipo..... CIRCULAR Teor de cobre mínimo: 99,9%
 Classe térmica.... H 180°C Isolação: POLIESTERIMIDA
 Bitola..... 29 Escala... AWG
 Classificação: Grau: 2 Tipo.... R
 Norma..... NM 60317-8 Lote AM.: EH03-66

ENSAIOS: NBR NM 60851-1 A 60851-6	ENCONTRADO	UNIDADES	ESPECIFICAÇÕES		
			Mínimo	Nominal	Máximo
Diâmetro do fio isolado	0,326	mm	0,319	0,329	0,339
Diâmetro fio nú	0,287	mm	0,284	0,287	0,290
Acréscimo de esmalte	0,039	mm	0,035	_____	_____
Alongamento a ruptura	25	%	23	_____	_____
Rigidez dielétrica	5668	V	4100	_____	_____
Pin Hole	0	(nº falhas)	_____	_____	5
Coefficiente de atrito	0,078	_____	_____	_____	0,100
Resistência elétrica	0,2674452	ohm/m	0,2610220	_____	0,2721680
Continuidade	0	(nº falhas 30m)	_____	_____	5
Ângulo de recuo	46	Graus	_____	_____	55
Termoplasticidade	336	°C	300	_____	_____
Tangente delta	187	°C	185	_____	200
Abrasão unidirecional	6,324	N	4,600	_____	_____
Soldabilidade	(N.A.) / (N.A)	°C / s	+/- 5 °C máximo: s		
Choque térmico:	Ok	_____	Alongamento(%): 0 Diâm.Mandril(mm)0,71 30min. 200°C		
Aderência e flexibilidade	Enrolamento em mandril	OK	% / mm	Alongamento %: Q.A. Diâmetro do mandril: 0,287	
	Alongamento	N.A.	_____	O isolamento não deve apresentar trincas após ser alongado 32%	
	Along. brusco a ruptura	OK	_____	A isolação não deve apresentar trincas ou perda de adesão.	
	Descascamento	N.A.	_____	O isolamento não deve apresentar perda de adesão após o fio ser submetido a um número de torções.	
Aspecto	Ok	_____	Liso uniforme, isento de bolhas.		

(N.A. = Não Aplicável)
 Acesso o manual técnico do consumidor em : http://www.jfpasqua.com.br/downloads/Manual_Tecnico_Consumidor.pdf


 (RICARDO IZZY)
 AUXILIAR DE LABORATORIO

Anexo 3 – Certificado fornecido pela empresa Metal Fio para o fornecedor, sobre o fio de alumínio esmaltado adquirido para os experimentos.



ALUMÍNIO



CERTIFICADO DE QUALIDADE

Incoice Nº	TLJL14088	Test Standard: NEMA	
Size	AWG 29 / 0.287 mm	Date	07/11/2014
Type	QZYL-2/180		
Test Items		Specification	Test Result
Size	Maximum Overall Diameter	≤ 0.338 mm	0.334 mm
	Conductor Diameter	0.287 mm (0.284 ~ 0.290 mm)	0.287 mm
	Film Thickness	≥ 0.038 mm	0.047 mm
Conductor resistance at 20°C		0.41822 - 0.44468 Ω/m	0.43118 Ω/m
Elogation		≥ 12 %	26.0 %
Flexibility & Adherence	Mandrel winding	Winding 3D, no Cracks	Ok
	Sudden Jerk	No cracks visible in the film coating	Ok
Cut Through		300°C, 2 min	Ok
Heat Shock		Sudden Jerk 20 %, 200°C, 30 min, no cracks visible in the film coating	Ok
Room Temperature Breakdown Voltage		≥ 4.27 KV	6.9-7.7
Continuity	High Voltage Hole	10 / 30 m	0
	Pin-Hole	5 / 6 m	0
Conclusion		Ok	

Metal Fio Ind. e Com. De Materiais Elétrico e Isolantes Ltda
 Rua: Amazonas da Silva, 263 – Vila Guilherme CEP: 02051-000 – São Paulo – SP
 Fones: (11)2901-4630 – 2909-6137 – Fone Fax: (11)2909-6137
 Site: www.metalfiocondutores.com.br