

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Desenvolvimento de um sensor optoeletrônico
para detecção e classificação de mosca-das-frutas
(Diptera: Tephritidae) em tempo real para uso em
armadilhas inteligentes**

Fabiano Sandrini Moraes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Computação da Universi-
dade Federal do Rio Grande, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
de Computação

Orientador: Prof. Dr. Vagner Santos da Rosa

Rio Grande, 2018

Ficha catalográfica

M827d Moraes, Fabiano Sandrini.

Desenvolvimento de um sensor optoeletrônico para detecção e classificação de mosca-das-frutas (*Diptera: Tephritidae*) em tempo real para uso em armadilhas inteligentes / Fabiano Sandrini Moraes. – 2018.

122 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Computação, Rio Grande/RS, 2018.

Orientador: Dr. Vagner Santos da Rosa.

1. Mosca-das-Frutas 2. Sensor Optoeletrônico 3. Agricultura de Precisão 4. Classificação de Insetos Automatizados 5. Monitoramento de Pragas I. Rosa, Vagner Santos da II. Título.

CDU 004:565.77



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

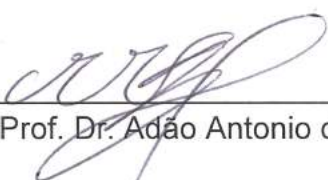
ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ata nº 27/2018

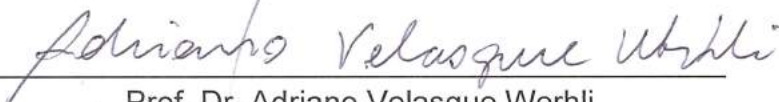
Na data de 19 de dezembro de 2018, às 10 horas, ocorreu a Sessão de Defesa de Dissertação de Mestrado de FABIANO SANDRINI MORAES, que apresentou a dissertação intitulada "Desenvolvimento de um Sensor Optoeletrônico para Detecção e Classificação de Mosca-das-Frutas (Diptera: Tephritidae) em Tempo Real para Uso em Armadilhas Inteligentes", realizada sob a orientação do Prof. Dr. Vagner Santos da Rosa. A banca examinadora foi constituída pelo Prof. Dr. Adão Antonio de Souza Junior (IFSUL), Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli (FURG) e Prof. Dr. Dori Edson Nava (EMBRAPA Clima Temperado), sob a presidência do orientador. Após a apresentação do trabalho, a banca arguiu o candidato e, a seguir, deliberou pela

- ☒ aprovação da Dissertação
- ☐ aprovação da Dissertação, sugerindo modificações no texto
- ☐ reprovação da Dissertação

Rio Grande, 19 de dezembro de 2018.



Prof. Dr. Adão Antonio de Souza Junior



Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli



Prof. Dr. Dori Edson Nava



Prof. Dr. Vagner Santos da Rosa
Orientador

Agradecimentos

Agradeço às pessoas mais importantes da minha vida: a minha família, pelo apoio e suporte durante essa jornada, à minha esposa Michele e ao meu filho Theo, pelo carinho, compreensão, incentivo e principalmente amor, que me levaram à essa conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Vagner Santos da Rosa pelo incentivo, ajuda e entusiasmo com o trabalho.

Agradeço aos amigos Prof. Dr. Guilherme Schwanke Cardoso (IFSUL) pelo apoio e troca de experiências no desenvolvimento na parte eletrônica do trabalho, ao Prof. Dr. Cláudio Luís d'Elia Machado (IFSUL) pela colaboração na concepção da estrutura do sensor, ao Pesquisador Dr. Dori Edson Nava (Embrapa Clima Temperado) e ao Doutorando Tiago Scheunemann (UFPEL) pelo apoio e conhecimento transmitido com relação as moscas-das-frutas sendo imprescindíveis na realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor optoeletrônico para ser utilizado na detecção e classificação das moscas-das-frutas *Anastrepha fraterculus* e *Ceratitis capitata* em tempo real para ser utilizado em uma armadilha inteligente. Uma revisão bibliográfica foi realizada buscando os fundamentos teóricos e o estado da arte do tema. Com base no estudo realizado foi projetado e construído o protótipo de um sensor para ser utilizado em uma armadilha inteligente. O protótipo desenvolvido foi testado e ajustado com um simulador de batimento de asas desenvolvido especificamente para este trabalho. Após os ajustes experimentos de laboratório foram conduzidos para verificar e comprovar o funcionamento do sensor com as moscas-das-frutas. Os ensaios experimentais produziram sinais amostrados em 16 bits a taxa de 192 *ksamples* gerando um *dataset* que é um dos resultados do trabalho. Foram estudadas e avaliadas a técnica do limiar em amplitude (RMS) para detecção da passagem do inseto pelo sensor e as técnicas da autocorrelação e transformada de Fourier para a realização da extração de características do sinal do batimento de asas das moscas-das-frutas. Os resultados obtidos demonstram que é possível detectar a passagem das espécies de moscas-das-frutas *Anastrepha fraterculus* e *Ceratitis capitata* com o uso do RMS e o discernimento delas através do sinal capturado do batimento de asas. Sendo considerada a frequência fundamental obtido pela técnica da autocorrelação o melhor método e que os melhores resultados são obtidos com o uso conjunto das técnicas da autocorrelação e FFT.

Palavras-chave: mosca-das-frutas. sensor optoeletrônico. agricultura de precisão. classificação de insetos automatizados. monitoramento de pragas.

Abstract

This work presents the development of an optoelectronic sensor to be used in the detection and classification of *Anastrepha fraterculus* fruit flies and *Ceratitis capitata* in real time to be used in an intelligent trap. A bibliographical review was carried out seeking the theoretical foundations and the state of the art of the theme. Based on the study carried out was designed and built the prototype of a sensor to be used in an intelligent trap. The developed prototype was tested and adjusted with a wing beat simulator developed specifically for this work. After adjusting the laboratory experiments were conducted to verify and prove the operation of the sensor with the fruit flies. The experimental tests produced 16-bit sampled signals at the rate of 192 ksamples generating a dataset which is one of the results of the work. The amplitude threshold technique (RMS) for detecting the passage of the insect by the sensor and the autocorrelation and Fourier transform techniques were studied and evaluated for the extraction of characteristics of the signal of the wings beating of fruit flies. The results obtained show that it is possible to detect the passage of species of fruit flies *Anastrepha fraterculus* and *Ceratitis capitata* with the use of RMS and their discernment through the captured signal of the wing beat. Considering the fundamental frequency obtained by the autocorrelation technique the best method and that the best results are obtained with the joint use of the autocorrelation and FFT techniques.

Keywords: fruit fly. optoelectronic sensor. precision agriculture. classification of automated insects. pest monitoring.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mosca-das-frutas <i>Ceratitis capita</i> e <i>Anastrepha fraterculus</i>	16
Figura 2 – Armadilha McPhail durante monitoramento.	17
Figura 3 – Base da armadilha McPhail com moscas capturadas.	17
Figura 4 – Método de monitoramento manual com o uso de armadilha McPhail.	17
Figura 5 – Diagrama do Tacômetro Ótico desenvolvido por Unwin e Ellington (1979).	20
Figura 6 – Sensor optoeletrônico proposto por Batista et al. (2011).	21
Figura 7 – Armadilha inteligente desenvolvida por Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014).	23
Figura 8 – Armadilha inteligente desenvolvida por Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017).	25
Figura 9 – Armadilha McPhail com seus componentes.	32
Figura 10 – Base da Armadilha McPhail com moscas capturadas.	32
Figura 11 – Diagrama em Blocos do Circuito do Sensor.	33
Figura 12 – Proposta conceitual da armadilha inteligente.	35
Figura 13 – Projeto da base do sensor optoeletrônico.	36
Figura 14 – Projeto da base do sensor optoeletrônico - Detalhes.	37
Figura 15 – Projeto da base do sensor optoeletrônico - A: Base Inferior, B: Tampas Frontal e Traseira.	37
Figura 16 – Circuito emissor do sensor optoeletrônico.	39
Figura 17 – Circuito receptor do sensor optoeletrônico.	41
Figura 18 – Configurações avaliadas para o circuito de transimpedância.	42
Figura 19 – Amplificador de transimpedância projetado.	43
Figura 20 – Resposta em frequência do filtro passa-altas de sexta ordem projetado.	44
Figura 21 – Resposta em frequência do filtro passa-baixas de sexta ordem projetado.	45
Figura 22 – Diagrama elétrico de um estágio do amplificador de sinal.	46
Figura 23 – Fonte corrente constante implementada para uma linha do circuito emissor.	48
Figura 24 – Base do sensor optoeletrônico implementada.	49
Figura 25 – Circuito implementado do emissor.	50
Figura 26 – Circuito implementado do receptor.	50
Figura 27 – Base do sensor optoeletrônico com os circuitos do receptor e emissor posicionados.	51

Figura 28 – Circuitos implementados do hardware do sensor optoeletrônico. . .	52
Figura 29 – Sensor optoeletrônico realizando a captura de sinal.	52
Figura 30 – Dispositivo para simulação do batimento das asas de moscas-das-frutas.	53
Figura 31 – Simulador do batimento das asas de moscas-das-frutas com tacômetro acoplado fixado ao sensor optoeletrônico.	53
Figura 32 – Sistema utilizado nos experimentos para medição do sinal gerado pelo batimento das asas de moscas-das-frutas, com o detalhe do posicionamento do cano e do sensor.	55
Figura 33 – Captura de tela do programa Audacity com uma faixa de sinal com uma hora de duração sendo analisada para remoção do tempo sem eventos de passagem.	56
Figura 34 – Captura de tela do programa Audacity com uma faixa de sinal com os tempos sem eventos de passagem retirados.	56
Figura 35 – Extrato de áudio capturado com flutuações de luminosidade em I, II, III, IV e V.	57
Figura 36 – Energia do sinal avaliada com o uso RMS com limiar de valor um e passagem detectada em I,II e V e desconsiderada em III e IV. . .	57
Figura 37 – Janela de sinal armazenada com base na detecção de passagem de inseto.	58
Figura 38 – Janela Blackman–Harris com seu gráfico temporal (esq.) e seu gráfico espectral (dir.).	59
Figura 39 – Sinal de Autocorrelação com frequência fundamental em 100 Hz. .	60
Figura 40 – Espectro de frequência do sinal analisado.	61
Figura 41 – Exemplo de avaliação gráfica de normalidade de análise estatística.	62
Figura 42 – Espectro frequência - sensor normal, sem excitação do simulador.	66
Figura 43 – Espectro frequência - sensor normal, sem luz ambiente, sem excitação do simulador.	66
Figura 44 – Espectro frequência - sensor com emissor desligado, sem excitação do simulador.	67
Figura 45 – Espectro frequência - sensor com emissor desligado, sem luz ambiente, sem excitação do simulador.	67
Figura 46 – Espectro frequência - sensor normal, com o simulador sobre o sensor.	68
Figura 47 – Espectro frequência - sensor com quatro linhas no emissor e no receptor, simulador com 12 V.	69
Figura 48 – Espectro frequência - sensor com quatro linhas no emissor e uma linha no receptor, simulador com 12V.	70
Figura 49 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 12V.	70

Figura 50 – Sinal medido com o osciloscópio no experimento de verificação do sinal medido pelo sensor.	72
Figura 51 – Espectro frequência - experimento de verificação do sinal medido pelo sensor.	72
Figura 52 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 16 V.	73
Figura 53 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 8 V.	73
Figura 54 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 4 V.	74
Figura 55 – Sinal de evento de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão. .	75
Figura 56 – Sinal de evento de passagem de <i>A. fraterculus</i> não rotulado para o grupo padrão.	76
Figura 57 – Sinal de evento de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão com a janela Blackman-Harris sobreposta.	76
Figura 58 – Sinal de evento de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão com a janela Blackman-Harris aplicada.	77
Figura 59 – Sinal de evento de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão com a janela Blackman-Harris aplicada e expandido até um segundo. 77	
Figura 60 – Gráfico da Autocorrelação do evento de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão.	78
Figura 61 – Gráfico da FFT do evento de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão.	78
Figura 62 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão.	80
Figura 63 – Gráfico da FFT com erro de localização do pico referente a frequência fundamental de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão.	82
Figura 64 – Gráfico da Autocorrelação com erro de localização do pico referente a frequência fundamental de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão. . . .	82
Figura 65 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão sem <i>outliers</i>	83
Figura 66 – Sinal de evento de passagem de <i>C. capitata</i> do grupo padrão. . . .	86
Figura 67 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de <i>C. capitata</i> do grupo padrão.	88
Figura 68 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de <i>C. capitata</i> do grupo padrão sem <i>outliers</i>	91

Figura 69 – Comparativo entre as curvas normais para frequência fundamental pela Autocorrelação (freq. fund. Aut.), frequência fundamental pela FFT (freq. fund. FFT) e frequência fundamental pela diferença entre as frequências do 2º harmônico e a fundamental pela FFT (F1-F0 FFT) dos eventos de passagem de <i>C. capitata</i> do grupo padrão e <i>A. fraterculus</i> do grupo padrão.	94
Figura 70 – Diagrama esquemático circuito amplificador de transimpedância	119
Figura 71 – Diagrama PCB circuito amplificador de transimpedância	120
Figura 72 – Diagrama esquemático circuito amplificador de sinais	120
Figura 73 – Diagrama PCB circuito amplificador de sinais	121
Figura 74 – Diagrama PCB circuito filtros passa-altas e passa-baixas	121
Figura 75 – Diagrama esquemático circuito filtros passa-altas e passa-baixas	122

Lista de tabelas

Tabela 1	– Resultados do algoritmo de classificação Bayesiano proposto por Chen et al. (2014).	22
Tabela 2	– Resultados de classificação <i>off-line</i> para <i>B. oleae</i> apresentado por Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017).	26
Tabela 3	– Informações obtidas dos trabalho principais deste capítulo.	28
Tabela 4	– Características de cada estágio do filtro passa-altas.	44
Tabela 5	– Características de cada estágio do filtro passa-baixas.	45
Tabela 6	– Resumo dos resultados obtidos no sensor optoeletrônico com os experimentos da variação da frequência do simulador.	74
Tabela 7	– Resumo dos resultados obtidos com a extração de características do sinal do batimento de asas da da <i>A. fraterculus</i> e <i>C. capitata</i> utilizados para avaliar a identificação das moscas-das-frutas. . . .	100
Tabela 8	– Medidas descritivas estatística dos dados brutos de frequência do grupo padrão da <i>A. fraterculus</i>	111
Tabela 9	– Medidas descritivas estatística dos dados brutos de energia do grupo padrão da <i>A. fraterculus</i>	112
Tabela 10	– Medidas descritivas estatística dos dados sem <i>outliers</i> por medição de frequência do grupo padrão da <i>A. fraterculus</i>	113
Tabela 11	– Medidas descritivas estatística dos dados sem <i>outliers</i> por medição de energia do grupo padrão da <i>A. fraterculus</i>	114
Tabela 12	– Medidas descritivas estatística dos dados brutos de frequência do grupo padrão da <i>C. capitata</i>	115
Tabela 13	– Medidas descritivas estatística dos dados brutos de energia do grupo padrão da <i>C. capitata</i>	116
Tabela 14	– Medidas descritivas estatística dos dados sem <i>outliers</i> por medição de frequência do grupo padrão da <i>C. capitata</i>	117
Tabela 15	– Medidas descritivas estatística dos dados sem <i>outliers</i> por medição de energia do grupo padrão da <i>C. capitata</i>	118

Lista de abreviaturas e siglas

FFT	<i>Transformada rápida de Fourier</i>
IR	<i>Infravermelho</i>
LED	<i>Diodo emissor de luz</i>
MFCC	<i>Mel-frequency cepstral coefficients</i>
SVM	<i>Support vector machines</i>
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
CC	<i>Corrente contínua</i>
SNR	<i>Relação sinal ruído</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
VCC	<i>Tensão de alimentação</i>
GND	<i>Tensão de referência</i>
MFB	<i>Multiple Feedback</i>
A/D	<i>Conversor Analógico para Digital</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	18
1.2	Estrutura do texto	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3	METODOLOGIA	31
3.1	Protótipo do sensor optoeletrônico	31
3.1.1	Base do sensor optoeletrônico	34
3.1.2	Hardware do sensor optoeletrônico	37
3.1.2.1	Circuito emissor e circuito receptor	38
3.1.2.2	Amplificador de transimpedância	40
3.1.2.3	Filtros passa-altas e passa-baixas	42
3.1.2.4	Amplificador de sinal	45
3.1.2.5	Sistema computacional	47
3.1.2.6	Acionamento LED-IR	47
3.2	Implementação do sensor optoeletrônico	48
3.3	Método de avaliação do sensor optoeletrônico	51
3.4	Método de medição de sinais gerados pelo batimento das asas de moscas-das-frutas <i>A. fraterculus</i> e <i>C. capitata</i>	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	Avaliação do sensor optoeletrônico	65
4.2	Medição do sinal gerado pelo batimento das asas da <i>A. fraterculus</i>	75
4.3	Medição do sinal gerado pelo batimento das asas da <i>C. capitata</i>	85
4.4	Comparação entre o sinal gerado pelo batimento das asas das moscas-das-frutas <i>A. fraterculus</i> e <i>C. capitata</i>	93
4.5	<i>Dataset</i>	95
4.6	Discussão	96
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	101
5.1	Trabalhos futuros	102
	REFERÊNCIAS	103

	APÊNDICE A – SCRIPT SCILAB	106
A.1	Script Scilab experimento simulador de batimento de asas . . .	106
A.2	Script Scilab para extração de características experimento com moscas-das-frutas <i>A. fraterculus</i> e <i>C. capitata</i>	107
	APÊNDICE B – MEDIDAS DESCRITIVAS ESTATÍSTICA DOS DADOS REFERENTES AOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM AS MOSCAS-DAS-FRUTAS <i>A. FRATERCULUS</i> E <i>C. CAPITATA</i>	111
B.1	Medidas descritivas estatística dos dados referente ao grupo padrão da <i>A. fraterculus</i>	111
B.2	Medidas descritivas estatística dos dados referente ao grupo padrão da <i>C. capitata</i>	115
	APÊNDICE C – HARDWARE SENSOR OPTOELETRÔNICO	119

1 Introdução

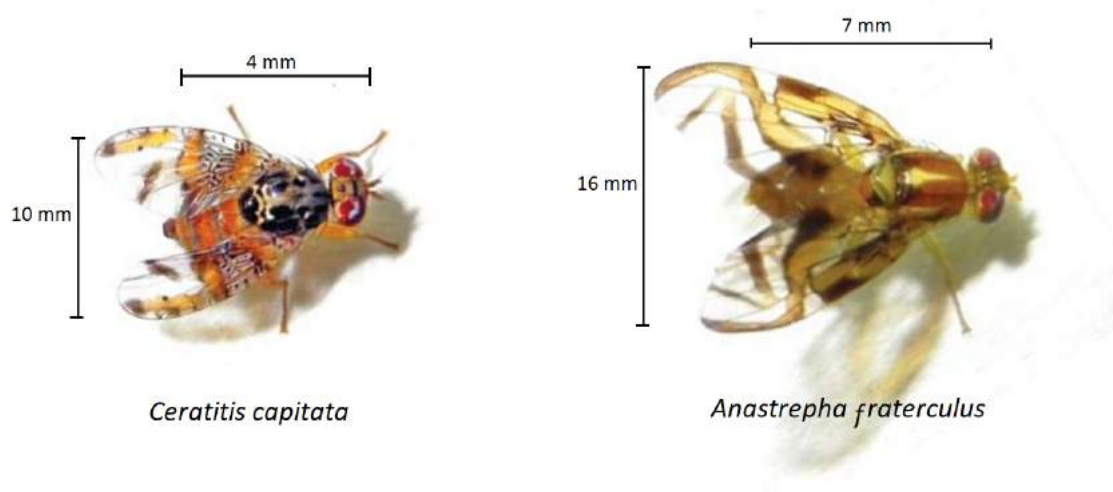
As moscas-das-frutas são consideradas as principais pragas que afetam a fruticultura mundial causando danos diretos e indiretos na produção. No Brasil, as principais espécies de moscas-das-frutas de importância econômica pertencem aos gêneros *Anastrepha*, *Bactrocera* e *Ceratitis*. Dentre as espécies de moscas-das-frutas presentes no Brasil, as que apresentam restrições quarentenárias para os países importadores são: *Anastrepha fraterculus* (Wiedemann, 1830), *Anastrepha obliqua* (Macquart, 1835), *Anastrepha grandis* (Macquart, 1846), *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) e *Bactrocera carambolae* (Drew e Hancock, 1994) (MALAVASI; NASCIMENTO, 2003).

Dados do Ministério da Agricultura (MAPA) mostram que as moscas-das-frutas causam um prejuízo anual de até US\$ 120 milhões aos produtores brasileiros entre perdas de produção e custos de controle. A presença das moscas também inviabiliza a exportação de frutas frescas para mercados mais exigentes e rentáveis como Japão, Estados Unidos e Chile (MAPA, 2015).

A mosca-das-frutas deposita seus ovos abaixo da casca das frutas onde permanecem até eclodirem. Após, as larvas constroem galerias e se alimentam da polpa reduzindo a produtividade e a qualidade dos frutos, deixando-os impróprios tanto para o consumo "in natura", como para a industrialização (PARANHOS, 2008).

As moscas-das-frutas possuem ampla distribuição geográfica e uma grande quantidade de hospedeiros. Na região Sul do Brasil *C. capitata* e *A. fraterculus* (Figura 1) desenvolvem-se em diversas frutíferas podendo inviabilizar a produção caso medidas de controle não sejam adotadas (NAVA; BOTTON, 2010).

O controle das moscas-das-frutas é feito de forma desregrada pelos fruticultores utilizando inseticidas na forma de iscas-tóxicas ou por cobertura sem conhecimento da espécie, dos níveis de infestação e da distribuição dos hospedeiros. Este tipo de controle tem várias consequências indesejáveis a cadeia de frutos como impacto ambiental, diminuição na qualidade fruto, restrições de exportação pela presença de resíduos químicos e um aumento no custo de produção (NAVA; BOTTON, 2010). Neste contexto surge a Agricultura de Precisão como uma tecnologia que utiliza um conjunto de ferramentas que combina sensores, sistemas de informação, máquinas adaptadas e gestão de conhecimento para aperfeiçoar a produção e minimizar a variabilidade e incerteza em sistemas agrícolas, proporcionando meios para controlar a cadeia de produção alimentar e gerenciar a quantidade e a qualidade dos produtos agrícolas (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010).

Figura 1 – Mosca-das-frutas *Ceratitis capitata* e *Anastrepha fraterculus*.

Fonte: Adaptado de Nava e Botton (2010).

A Agricultura de Precisão difere das formas tradicionais de agricultura, pois envolve a identificação e localização com maior exatidão das variações de produtividade e dos diversos fatores que a afetam, sugerindo assim ações de manejo localizado, fazendo com que o produtor e, ou assistente técnico veja o sistema produtivo de uma diferente forma, não mais tratando a lavoura como uma só, mas usando em cada parte um manejo diferenciado, visando redução nos custos, bem como aumento de produtividade e, consequente, proteção ambiental (BERGUEMAIER, 2016). Uma das áreas de uso da Agricultura de Precisão é o controle de pragas podendo ser utilizadas diretamente no controle, bem como no seu monitoramento auxiliando na tomada de decisão do melhor manejo e método de controle a ser aplicado (BERNARDI et al., 2014).

Para o manejo de mosca-das-frutas, dentre as técnicas propostas pela agricultura de precisão é fundamental a realização do monitoramento por meio de usos de armadilhas iscadas com atrativos. Um dos possíveis tipos de armadilhas é a McPhail que usa atrativos alimentares para capturar moscas-das-frutas adultas (Figura 2 e 3). Também é possível o uso de feromônios sexuais para atrair adultos e neste caso cita-se o exemplo do paraferomônio utilizado em armadilhas Deltas para atrair machos de *C. capitata*. Quando as armadilhas são utilizadas para monitoramento é necessário que um técnico realize a inspeção das armadilhas fazendo a classificação e a contagem das moscas capturadas (NAVA; BOTTON, 2010).

O procedimento realizado pelo técnico para o manejo de mosca-das-frutas tem início com a preparação da armadilha colocando-se o feromônio ou atrativo alimentar (Figura 4A). Após a armadilha é fixada em um árvore no pomar (Figura 4B). Para

Figura 2 – Armadilha McPhail durante monitoramento.



Fonte: Extraído de Sobrinho et al. (2001).

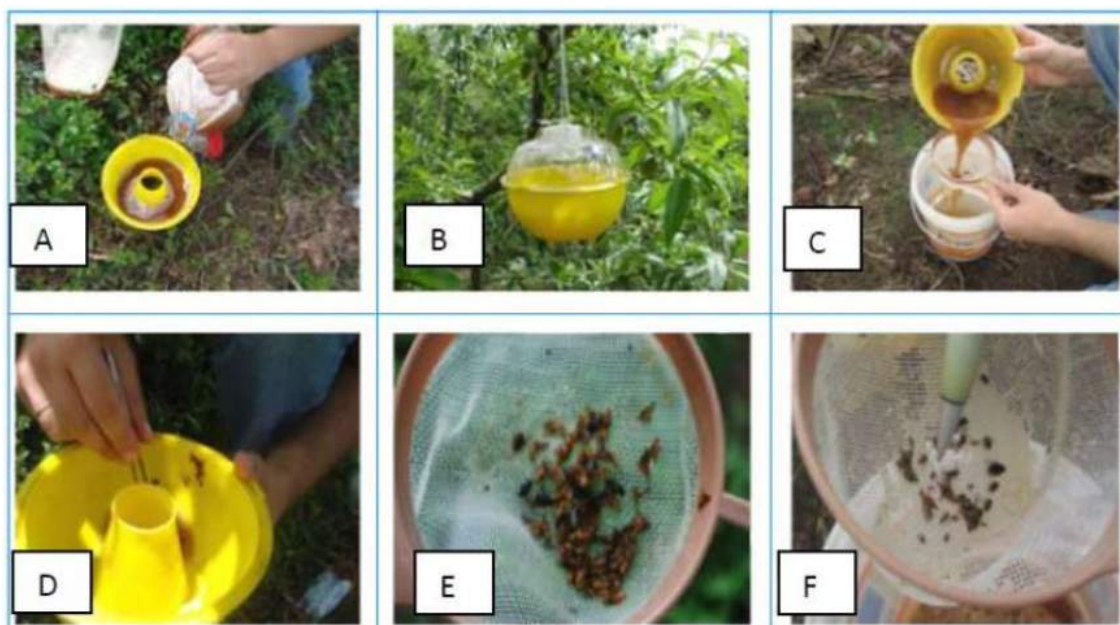
Figura 3 – Base da armadilha McPhail com moscas capturadas.



Fonte: Extraído de Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014).

o monitoramento da praga um técnico realiza a inspeção das armadilhas fazendo a classificação e contagem das moscas presas, para isto ele derrama o liquido do interior da armadilha em um balde passando por uma peneira onde ficam retidas as moscas (Figura 4C). Caso fique alguma mosca no interior da armadilha ela é colocada manualmente na peneira (Figura 4D). As moscas contidas na peneira (Figura 4E) são classificadas e contadas (Figura 4F) (QUEVEDO, 2017).

Figura 4 – Método de monitoramento manual com o uso de armadilha McPhail.



Fonte: Adaptado de Nava e Botton (2010).

No monitoramento extensivo a inspeção é realizada semanalmente e possui caráter preventivo. Em áreas que estão sob a ação da praga deve ser realizado o monitoramento intensivo. Nesta caso a inspeção deve ser realizada constantemente

para determinar se as ações de controle estão sendo efetivas (SOBRINHO et al., 2001).

Deste modo, surgiu a proposta do desenvolvimento de um sistema de monitoramento inteligente onde as moscas serão identificadas e contadas automaticamente. Este sistema irá diminuir a necessidade da intervenção do técnico no monitoramento, contribuindo para minimização do erro humano na identificação e contagem das moscas e uma redução no custo do programa de monitoramento. O sistema poderá ser utilizado tanto como meio auxiliar para corroborar o levantamento realizado pelo técnico, como poderá ser meio principal em situações que há dificuldades para a presença do técnico.

O presente trabalho apresenta o estudo de técnicas para detecção de insetos em tempo real e o desenvolvimento de um sensor optoeletrônico para uso em uma armadilha de monitoramento inteligente identificando e contando automaticamente as moscas-das-frutas capturadas. Está tecnologia poderá ser integrada a um sistema de informações de apoio aos produtores rurais para a escolha de uma técnica efetiva no controle da praga. Como também ser utilizada por entidades para um mapeamento da evolução da praga.

O uso de optoeletrônica para identificação de insetos foi apresentada por Unwin e Ellington (1979), onde foi utilizado um fotoreceptor para a captação da variação da luz ambiente gerada pelo batimento das asas do inseto durante o voo. Essa variação da luz é processada e determina a frequência do batimento das asas do inseto. Conforme Malavasi e Aquino (1996), esta frequência depende das características fisiológicas da espécie podendo ser utilizada para sua identificação.

Atualmente esta técnica foi empregada no desenvolvimento de armadilhas inteligentes para mosquitos (CHEN et al., 2014; BATISTA et al., 2011; SILVA et al., 2015). Sensores optoeletrônicos também foram utilizados na concepção da armadilha inteligente para moscas-das-frutas da oliveira *Bactrocera oleae* (Rossi, 1790) por Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014), Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2015), Potamitis e Rigakis (2015), Potamitis e Rigakis (2016), Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar técnicas para detecção de moscas-das-frutas em tempo real por meio do sinal gerado pelo batimento de asas e desenvolver um sensor optoeletrônico para ser aplicado em armadilhas inteligentes de monitoramento das moscas-das-frutas *Ceratitis capitata* e *Anastrepha fraterculus*.

Objetivos específicos:

- Realizar um estudo sobre a detecção optoeletrônica em tempo real de insetos;
- Desenvolver um sensor optoeletrônico para captação do sinal gerado pelo batimento das asas de moscas-das-frutas *Ceratitis capitata* e *Anastrepha fraterculus*;
- Avaliar o sensor optoeletrônico desenvolvido e os algoritmos para detecção de passagem e extração de características do sinal capturado;
- Caracterizar as moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata* através do sinal do batimento de suas asas capturado pelo sensor optoeletrônico;
- Elaborar um *dataset* do sinal referente ao batimento de asas de mosca-das-frutas capturado pelo sensor optoeletrônico desenvolvido.

1.2 Estrutura do texto

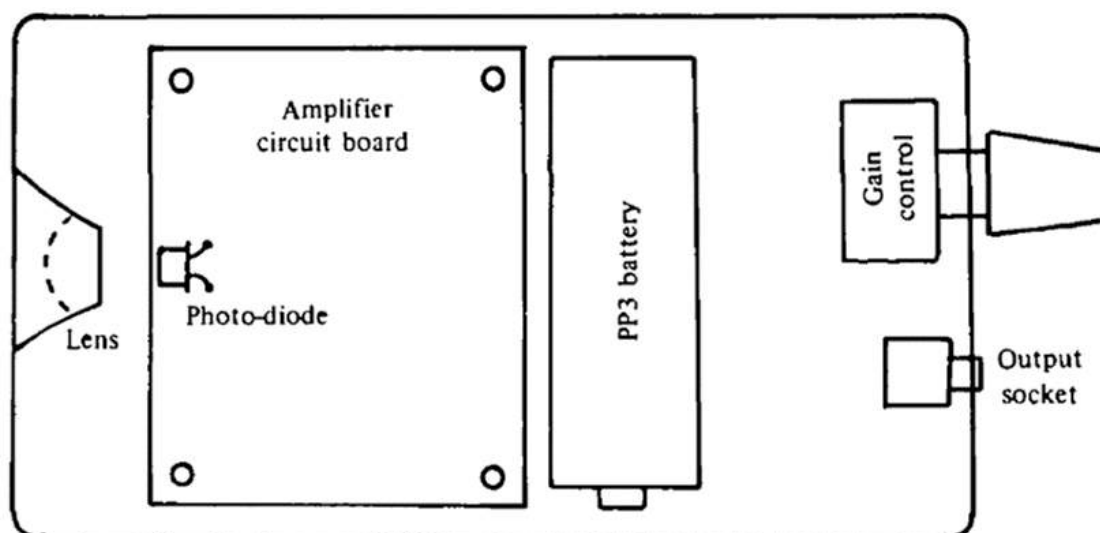
O capítulo 1 introduz a importância mundial do problema das mosca-das-frutas e como ele afeta a economia nacional, aponta os métodos de controle utilizados e como este trabalho pode contribuir neste contexto. No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre a detecção optoeletrônica. No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados para o projeto e implementação do sensor optoeletrônico para detecção em tempo real de insetos e a metodologia utilizada nos experimentos para avaliação do sensor e a metodologia para a medição do sinal de batimento de asas de moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*. No capítulo 4 são apresentados os resultados dos experimentos realizados para avaliar o desempenho do sensor, os resultados obtidos com a avaliação dos sinais captados através dos algoritmos de extração de características e classificação, a caracterização obtida das moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata* através do som do batimento de suas asas capturado pelo sensor optoeletrônico e é realizada uma discussão sobre os resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre o trabalho e são registradas possibilidades de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho foi realizada utilizando os sites de busca google acadêmico, google e o portal de periódicos da Capes. As palavras-chave pesquisadas foram *macphail trap fly*, *sensor optoacoustic*, *wing beat frequency*, *auto-mate insect classification*, *insect flight sound*, *optoelectronic sensors*. As referências consideradas de maior relevância são apresentadas a seguir.

Unwin e Ellington (1979) apresentaram a utilização de sensores optoeletrônicos para substituir microfones. Nesta implementação (Figura 5) é utilizada a luz ambiente como fonte de luz, sendo direcionada através de uma lente para um fotodiodo que capta a luz com as flutuações causadas pelo batimento de asas do inseto e a converte em um sinal elétrico. No tratamento do sinal é utilizado um amplificador de dois estágios com ganho máximo de 10000. O ganho em baixas frequências é limitado por um circuito de acoplamento entre os dois estágios que tem uma resposta relativa a saída em 1 kHz de -3 dB em 500 Hz e -20 dB em 50 Hz. Com este equipamento os autores conseguiram medir a frequência de *Smittia aterrima* (Diptera: Chironomidae) a distância de 1 m, de uma *Drosophila melanogaster* (Diptera: Drosophilidae) a distância de 1 a 2 m e insetos maiores como *Calliphora vicina* (Diptera: Calliphoridae) a 7 m e a *Bombus impatiens* sp. (Hymenoptera: Apidae) a 10 m.

Figura 5 – Diagrama do Tacômetro Ótico desenvolvido por Unwin e Ellington (1979).



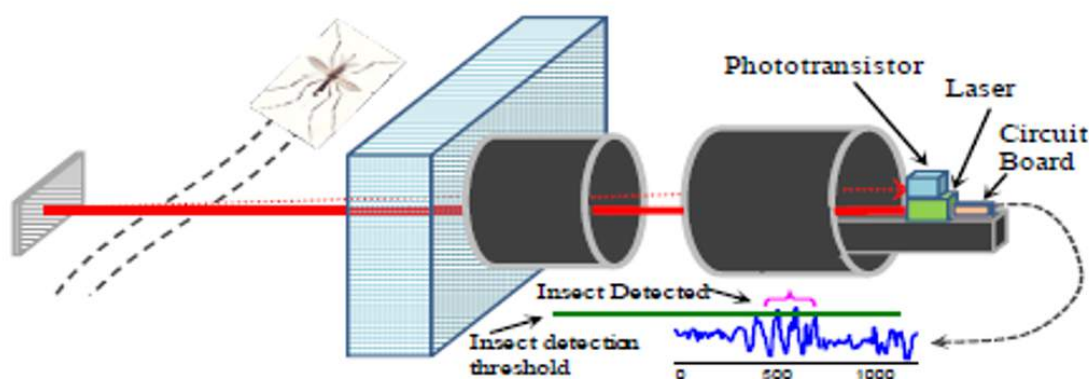
Fonte: Extraído de Unwin e Ellington (1979).

Atualmente a técnica optoeletrônica foi empregada no sistema de detecção de armadilhas inteligentes para mosquitos *Aedes aegypt* (Diptera: Culicidae) por Batista

et al. (2011), Chen et al. (2014) e Silva et al. (2015).

No trabalho apresentado por Batista et al. (2011) foi desenvolvido um sensor optoeletrônico de baixo custo no qual é criada uma barreira de luz com o uso de um laser de baixa potência (Figura 6). A luz criada é refletida por um refletor sendo captada por um fototransistor colocado ao lado do laser. Deste modo quando o inseto atravessa a barreira de luz ela é parcialmente ocluída pelo seu movimento de asas, sendo está variação captada pelo fototransistor, com o sinal gravado durante 1 s. Utilizando análise do espectro de frequência para localizar a frequência fundamental do sinal e um classificador Bayesiano simples foi atingido um índice de precisão na identificação de insetos de 100 % para o *B. impatiens*, de 97,34 % para o *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) e de 89,92 % para o *Ae. aegypti*.

Figura 6 – Sensor optoeletrônico proposto por Batista et al. (2011).



Fonte: Extraído de Batista et al. (2011).

Chen et al. (2014) apresentaram um estudo sobre a identificação de insetos usando o sensor desenvolvido por Batista et al. (2011). Neste trabalho, foram utilizados os insetos *Culex tarsalis* (Diptera: Culicinae), *Culex stigmatosoma* (Diptera: Culicidae), *Ae. aegypti*, *Cx. quinquefasciatus*, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) e *Drosophila simulans* (Diptera: Drosophilidae). Para a classificação dos insetos foi considerada como melhor opção a classificação Bayesiana que é uma técnica de classificação probabilística simples, baseada no teorema de Baves, que prediz probabilidade de um membro pertencer a uma classe. Como dados de entrada do classificador foram utilizados a transformada discreta de Fourier (FFT) para obtenção da frequência fundamental do sinal, ritmo circadiano de atividade de voo e localização geográfica. Os resultados obtidos na classificação são apresentados na Tabela 1.

Um estudo sobre a criação de um sistema de classificação de insetos é apresentado por Silva et al. (2015). No caso, o sinal é representado no domínio frequência e seu espectro é analisado avaliando-se a distância entre o sinal obtido e o sinal espe-

Tabela 1 – Resultados do algoritmo de classificação Bayesiano proposto por Chen et al. (2014).

Passo	Espécie adicionada	Precisão classificação
1	<i>Ae. aegypti</i> macho	N/A
2	<i>M. domestica</i>	98,99%
3	<i>Ae. aegypti</i> fêmea	98,27%
4	<i>Cx. stigmatosoma</i> macho	97,31%
5	<i>Cx. tarsalis</i> macho	96,10%
6	<i>Cx. quinquefasciatus</i> macho	92,69%
7	<i>Cx. stigmatosoma</i> fêmea	89,66%
8	<i>Cx. tarsalis</i> macho	83,54%
9	<i>Cx. quinquefasciatus</i> fêmea	81,04%
10	<i>D. simulans</i>	79,44%

Fonte – Adaptado de Chen et al. (2014).

rado. Neste trabalho foram estudadas técnicas de reconhecimento para a classificação de insetos sendo obtida a precisão de 87,33 % com a combinação de *Mel-Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC), para a extração de características e *Support vector machines* (SVM) com *Radial Basis Function* (RBF), para a classificação. Essa solução foi considerada a mais efetiva por possuir uma boa relação entre o poder de processamento necessário e a precisão obtida, uma característica importante em sistemas embarcados.

Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014) apresentam o desenvolvimento de um sensor optoeletrônico de baixo custo utilizando um sistema microcontrolado para detecção, contagem e transmissão dos dados obtidos. Este sensor é utilizado em uma armadilha inteligente do tipo McPhail para mosca-das-frutas da oliveira *B. oleae* (Figura 7). O circuito do sensor consiste em um LED-IR como emissor luz, como receptores de luz foram utilizados cinco fototransistores na configuração fotocondutiva ligados em paralelo, um filtro passa-alta com a frequência de corte em 60 Hz, um filtro passa-baixa com a frequência de corte em 4 kHz e um amplificador com ganho ajustável máximo de 25 dB. Como sistema microcontrolado foi utilizado uma placa microcontroladora Arduíno Mega2560.

O sinal gerado pelo receptor é digitalizado pelo conversor analógico-digital do sistema microcontrolado a uma taxa de amostragem de 4 kHz e o valor *Root-Mean-Square* (RMS) é extraído. Quando um evento de passagem é detectado são processadas as próximas 512 amostras do sinal. Neste trabalho, não foi abordado a identificação do inseto apenas o evento de passagem do inseto que teve 7,3 % de falsas detecções.

Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2015) realizaram uma comparação entre os

Figura 7 – Armadilha inteligente desenvolvida por Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014).



Fonte: Extraído de Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014).

sensores receptores (fotodiodos, fototransistores e microfones). Na comparação entre fotodiodos e fototransistores os autores concluíram que os dois sensores captaram satisfatoriamente a frequência fundamental da onda, mas na captação das harmônicas o sensor com fotodiodo obteve um resultado superior. Na comparação entre o sinal captado pelo microfone e o sinal captado pelo fotodiodo, o captado pelo fotodiodo acompanha o captado pelo microfone até a quarta ou quinta harmônica satisfatoriamente, perdendo desempenho para harmônicas superiores. Em locais com ruído acústico alto o microfone perde desempenho, sendo indicado para testes em laboratório com ambiente controlado, enquanto o sensor com fotodiodos capta apenas ruídos provenientes da luz ambiente, que no caso do uso em ambientes externos ou com iluminação CC não são representativos. O emissor foi composto por quatro LED-IR para obtenção de uma luz uniforme e foi diminuída a corrente de polarização dos emissores de 26 mA, utilizada por Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014), para 2,7 mA. O uso de mais LED's permitiu que o emissor ficasse mais próximo do sensor devido ao maior ângulo de dispersão da luz obtido. No receptor foram utilizados 10 fotodiodos em linha conectados em paralelo.

No processamento de sinal utilizado para a identificação do inseto, foi usada a FFT com uma janela Hamming para passagem do sinal para o domínio frequência com sua magnitude normalizada para evitar possíveis diferenças no ganho e o RMS para a detecção de passagem. A classificação foi realizada utilizando a comparação com uma referência com os grupos da *B. oleae* separados usando o algoritmo k-means, sendo obtida uma precisão de classificação 95 % em comparação com duas espécies de mosquitos *Anopheles gambiae* e *Culex pipiens molestus*, de 95 % em comparação com *A. mellifera*, de 90 % em comparação com a família *Chironomidae* (POTAMITIS; RIGAKIS; FYSARAKIS, 2015).

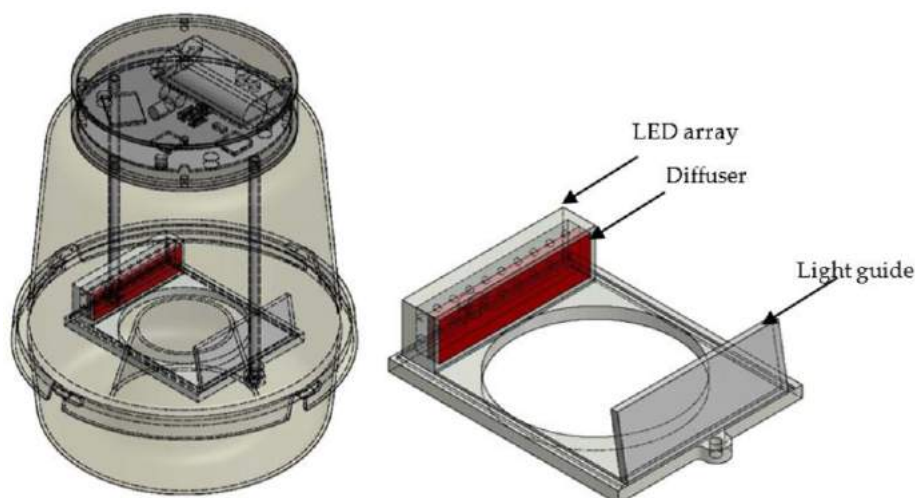
Na sequência de aprimoramento do sensor, foi apresentado por Potamitis e Rigakis (2015) um sensor optoeletrônico robusto a ruídos. Para isto, foi modificado o *hardware* do sensor sendo a emissão da luz modulada em 60 kHz. O receptor foi configurado no modo fotovoltaico e o sinal recebido é passado por um filtro passa-faixa de oitava ordem com frequência centrada em 60 kHz e largura de faixa de ± 10 kHz. Após o sinal é demodulado passando por um filtro passa-baixas com frequência de corte de 3 kHz. Sendo obtido um sensor imune a variações na iluminação, podendo operar tanto em lugares muito iluminados como em ambientes escuros.

No trabalho desenvolvido por Potamitis e Rigakis (2016) foram apresentadas duas possibilidades para aumentar a superfície receptora de luz, sendo elas o uso de uma matriz de fotodiodos ou a colocação de um guia de luz. Isto foi necessário devido a velocidade de voo dos insetos que ficavam pouco tempo expostos ao sensor, resultando em uma janela de amostragem do sinal pequena para um processamento de sinais eficiente. Outra melhoria foi a elevação da frequência de modulação de 60 kHz utilizada por Potamitis e Rigakis (2015), para 455 kHz, isto permitiu rejeitar uma faixa maior de frequências de luz. A utilização de um guia de luz tem a vantagem de possuir uma área de incidência maior que a da matriz de fotodiodos pois não possui os espaços entre as linhas, entretanto ocasionou uma taxa maior de falsos disparos sob luz intensa.

A armadilha inteligente para monitoramento de mosca-das-frutas *B. oleae* desenvolvida por Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017) é apresentada na Figura 8. O emissor do sensor foi composto por uma matriz de duas colunas e oito linhas de LED-IR e um difusor para tornar a luz mais uniforme, no receptor do sensor foi utilizada uma linha com treze fotodiodos com um guia de luz. O hardware utilizado foi o mesmo apresentado por Potamitis e Rigakis (2016), diferenciando-se apenas pelo uso de um microcontrolador MSP432P401R da Texas Instruments.

Os pulsos de luz são enviados pelo emissor com um período de 250 μ s, sendo ativo por 1,6 μ s. Com o receptor e o emissor sincronizados são armazenados os 800ns finais do pulso. Para a detecção de passagem foi utilizada uma janela de 128 amostras (16 ms) de 14 bits a uma taxa de amostragem de 4 kHz onde é aplicada a técnica RMS e caso o resultado ultrapasse um valor estabelecido um evento de passagem é detectado. Na identificação da espécie após um evento de passagem ser detectado são armazenadas 1024 amostras (256 ms) de 14 bits a uma taxa de 4 kHz, estas amostras são processadas utilizando FFT e seu espectro de frequência é analisado para identificar a espécie do inseto. Sendo utilizado todo o espectro de frequência do sinal como evidência biométrica para classificação de espécies. Além da frequência fundamental são utilizados diferenças entre os harmônicos reais e os harmônicos teóricos, a energia nos harmônicos e a amplitude do sinal próxima da frequência de

Figura 8 – Armadilha inteligente desenvolvida por Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017).



Fonte: Extraído de Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017).

DC relacionado ao tamanho do corpo. Embora as áreas espectrais mencionadas sejam as mais informativas, as informações de identidade de espécies são distribuídas em todo o espectro, sendo sugerido o seu uso em oposição a estimar apenas a frequência fundamental e os harmônicos.

Para a classificação em tempo real utilizando feromônios na armadilha foi utilizada uma abordagem baseada em duas regras simples que, simultaneamente, devem ser satisfeitas para indicar a presença de *B. oleae*. Regra 1: Verificar se a amplitude do sinal no domínio do tempo está dentro dos limites para *B. oleae*. Insetos que possuem asas maiores que *B. oleae* retornarão uma maior flutuação na amplitude do sinal e, ao contrário, insetos menores (por exemplo, mosquitos) modulam a luz em amplitudes menores. Regra 2: Verificar as frequências entre 170 e 230 Hz, onde a frequência fundamental do sinal da *B. oleae* isto e, se a energia dessa largura de banda excede um limite. Esta solução foi considerada simples e eficiente, desde que não haja outras moscas-das-frutas, pois esta regra não pode, por padrão, definir a diferença entre *B. oleae*, *C. capitata* e *Lonchaea aristella* (Diptera: Lonchaeidae) cujos espectros se sobrepõem totalmente. No entanto, a abordagem rejeitou 80 % dos casos de *Drosophila* e 100 % de todos os casos de mosquitos.

Nos casos de classificação entre as espécies de moscas-das-frutas a classificação foi realizada *off-line* com os dados transmitidos para um servidor, sendo analisados os classificadores *Linear Support Vector Classifier* (Linear SVC), *Radial Basis Function Support Vector Machine* (RBF SVM), *Random Forests* (RF), *Ada-boost Meta classifier* (ADABOOST), *Extra Randomized Trees* (X-TREE), *Gradient boosting Classifier* (GBC) e *Convolutional Neural Network* (CNN). Os resultados são apresentados na Tabela 2, sendo o melhor resultado obtido com o classificador GBC.

Tabela 2 – Resultados de classificação *off-line* para *B. oleae* apresentado por Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017).

Classificador	% Precisão média/Desvio padrão
Linear SVC	88,46/1,24
RBF SVM	90,52/0,99
RF	91,05/1,55
ADABOOST	88,62/1,01
X-TREE	91,13/1,21
GBC	91,63/1,31
CNN	90,40/1,18

Fonte – Adaptado de (POTAMITIS; RIGAKIS; TATLAS, 2017).

Hyatt e Maughan (1994) utilizaram um tacômetro óptico adaptado de Unwin e Ellington (1979) para avaliar os efeitos de alterações genéticas da estrutura muscular do voo em insetos da família Diptera. Para a análise os autores realizaram a captura do sinal por 3,28 s e com uma taxa de amostragem do A/D de 20 kHz, o que corresponde a 65536 pontos. A janela de 65536 pontos foi dividida em segmentos de 16384 pontos com uma sobreposição de 75 %, resultando em 12 segmentos de 0,8192 s. Cada segmento foi analisado utilizando a FFT (algoritmo radix-2 Cooley-Tukey) com janela *Blackman-Harris*, sendo obtida uma resolução de 1,2207 Hz no espectro de frequência. pois apresenta menores lóbulos laterais no espectro.

Para análise da variação da frequência de batimento de asas foi utilizado um índice H dado por

$$H = \frac{\sum_{k=\max-3}^{\max+3} F(k)}{\sum_{k=\max-14}^{\max+14} F(k)} \quad (2.1)$$

onde $F(k)$ são os valores dos coeficientes de Fourier e $k=\max$ é a frequência de base para análise, sendo avaliado o desvio da relação dos somatórios de seis coeficientes de Fourier por 28 coeficientes de Fourier ambos centrados na frequência de interesse. Este índice H indica alterações genéticas na estrutura muscular de voo dos insetos.

Uma análise do som produzido pelo batimento das asas de quatro espécies de *Anastrepha* no Brasil é apresentado por Malavasi e Aquino (1996). Neste trabalho, foi utilizado como sensor um microfone e como resultado foi obtido para *A. fraterculus* de São Paulo a frequência fundamental de $89,1 \pm 4,5$ Hz, para *A. fraterculus* da Bahia a frequência fundamental de $94,4 \pm 3,1$ Hz, para *A. obliqua* a frequência fundamental de $91,0 \pm 6,8$ Hz, para *Anastrepha sororcula* (Zucchi, 1979) a frequência fundamental de $185,6 \pm 4,5$ Hz e para *A. grandis* a frequência fundamental de $82,2 \pm 2,7$ Hz. A

frequência fundamental do som produzido pelo batimento das asas da *C. capitata* é de aproximadamente 180 Hz (POTAMITIS; RIGAKIS; TATLAS, 2017).

Um resumo dos principais trabalhos encontrados durante a revisão bibliográfica realizada é apresentada na Tabela 3, onde é descrito o nome do trabalho, autor e ano de publicação, sensor utilizado, características do sinal observadas, classificador empregado e resultados obtidos.

Tabela 3 – Informações obtidas dos trabalhos principais deste capítulo.

Trabalho	Autor e ano	Sensor	Características do sinal observadas	Classificador	Resultados
An optical tachometer for measurement of the wing-beat frequency of free-flying insects	Unwin e Ellington (1979)	Luz ambiente e fotodiodos.	O artigo não propõe.	O artigo não propõe.	Realiza a captura do sinal à distância de 1 a 2 m para <i>D. melanogaster</i> .
SIGKDD demo: sensors and software to allow computational entomology, an emerging application of data mining	Batista et al. (2011)	Laser de baixa potência e fototransistor.	Frequência fundamental, não especifica o método.	Classificador Bayesiano.	Precisão na classificação de 100 % (<i>B. impatients</i>), 89,92 % (<i>A. aegypti</i>) e 97,34 % (<i>C. quinquefasciatus</i>).
Flying insect classification with inexpensive sensors	Chen et al. (2014)	Sensor desenvolvido por Batista et al. (2011).	Frequência fundamental (FFT), ritmo circadiano de atividade de voo e localização geográfica	Classificador Bayesiano	Considera o classificador Bayesiano como melhor opção, resultados da classificação Tabela 1.
Exploring low cost laser sensors to identify flying insect species	Silva et al. (2015)	Laser de baixa potência e fototransistor.	<i>Mel-frequency cepstral coefficients</i> (MFCC).	<i>Support vector machines</i> (SVM) <i>Radial Basis Function</i> (RBF)	Precisão na classificação de 87,33 % (<i>A. aegypti</i>).

Continuação da página anterior

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Trabalho	Autor e ano	Sensor	Características do sinal observadas	Classificador	Resultados
The electronic McPhail trap	Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014)	Um LED-IR e cinco fototransistores.	RMS.	O artigo não propõe classificador, apenas detecção de passagem utilizando o RMS	Apresenta uma taxa de falsos disparos de 7,3 %.
Insect biometrics: Optoacoustic signal processing and its applications to remote monitoring of McPhail type traps	Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2015)	Quatro LEDs-IR em linha conectados em série e dez fotodiodos em linha conectados em paralelo.	RMS e FFT com janela Hamming.	Comparação com espectro de referência obtido com o algoritmo K-means	Fotodiodo apresentou resultado superior ao fototransistor e a classificação de <i>B. oleae</i> com precisão de 95 % em comparação <i>Anopheles gambiae</i> , <i>Culex pipiens molestus</i> e <i>A. melifera</i> e de 90 % com <i>Chironomidae</i> .
Novel noise-robust optoacoustic sensors to identify insects through wingbeats	Potamitis e Rigakis (2015)	LEDs-IR e fotodiodos com emissão de luz modulada em 60 kHz.	O artigo não propõe.	O artigo não propõe.	Sensor imune a variações na iluminação.

Continuação da página anterior

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Trabalho	Autor e ano	Sensor	Características do sinal observadas	Classificador	Resultados
Large Aperture Optoelectronic Devices to Record and Time-Stamp Insects Wingbeats	Potamitis e Rigakis (2016)	LEDs-IR com emissão de luz modulada em 455 kHz e fotodiodos com aumento de superfície com uso de matriz ou guia de luz .	RMS.	Detecção com o uso RMS.	O uso de 455 kHz melhorou a imunidade à ruídos e o uso da guia de luz possui maior área de captação mas gera falsos disparos em relação a matriz .
Automated surveillance of fruit flies	Potamitis, Rigakis e Tatlasi (2017)	LEDs-IR matriz de 2x8 com um difusor de luz e 13 fotodiodos em linha com guia de luz com modulação em 4 kHz .	FFT para obtenção da frequência fundamental, diferenças entre os harmônicos reais e os harmônicos teóricos, a energia nos harmônicos e a amplitude do sinal próxima da frequência de DC relacionado ao tamanho do corpo	Classificação com um conjunto de regras para armadilhas com feromônio e sem presença de outras moscas-das-frutas ou classificação <i>off-line</i> com (Linear SVC, RBF SVM, RF, ADABOOST, X-TREE, GBC e CNN	Uma rejeição de 80 % dos casos de <i>Drosophila</i> e 100 % de todos os casos de mosquitos na classificação <i>on-line</i> e uma precisão em torno de 91 % com os classificadores <i>off-line</i> .

Fonte – Elaborado pelo autor.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta o projeto do sensor optoeletrônico, o seu funcionamento e os softwares utilizados para o desenvolvimento do protótipo. Na sequência são apresentados os métodos utilizados para avaliação do protótipo e os métodos utilizados na medição dos sinais gerados pelo batimento das asas das moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*.

3.1 Protótipo do sensor optoeletrônico

A primeira etapa foi a análise das diversas soluções apresentadas no Capítulo 2 para o desenvolvimento de um sensor optoeletrônico. Para a determinação da solução utilizada foi levado em consideração o tipo de armadilha ao qual o sensor poderá ser acoplado, as espécies de moscas-das-frutas a serem detectadas, o custo de fabricação do sensor e a facilidade de obtenção dos componentes no comércio local.

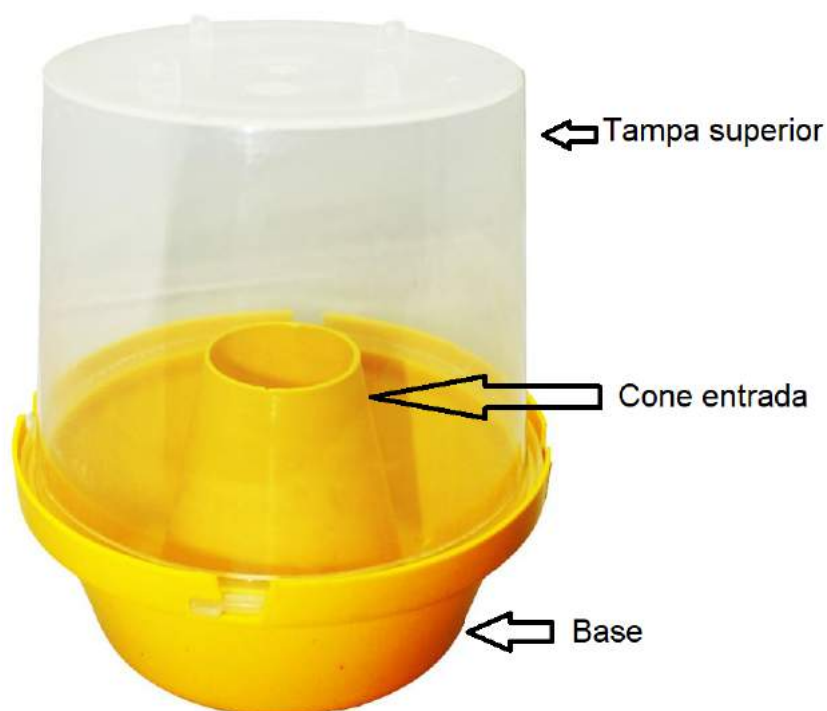
O sensor optoeletrônico proposto foi baseado nos trabalhos apresentados por Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2014), Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2015), Potamitis e Rigakis (2015), Potamitis e Rigakis (2016), Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017). Nesta série de trabalhos foram apresentadas as etapas do desenvolvimento de uma armadilha inteligente para mosca-das-frutas *B. oleae*.

O sensor optoeletrônico desenvolvido teve como objetivo a detecção e reconhecimento das moscas-das-frutas *C. capitata* e *A. fraterculus* que são as principais pragas para a fruticultura na região Sul do Brasil, podendo ser utilizado em conjunto com uma armadilha McPhail (Figura 9) para a construção de uma armadilha inteligente de monitoramento em tempo real.

A armadilha McPhail é um tipo de armadilha comumente utilizada no monitoramento de moscas-das-frutas, sendo composta de uma base amarela com uma entrada em cone no seu centro e uma tampa superior transparente (Figura 9). Este tipo de armadilha foi escolhida pois permite uma fácil acoplagem do sensor em seu cone de entrada, sendo fechada protege o sensor do meio ambiente e pelo seu funcionamento, explicado na sequência, permite a entrada de insetos em um único sentido dificultando a sua saída.

No funcionamento de uma armadilha McPhail as moscas são atraídas a distância pelo amarelo de sua base e pelo atrativo. Quando se aproximam o feromônio ou o atrativo alimentar as atraem em direção ao cone de entrada, onde as moscas entram voando em direção ao topo da armadilha, pois são atraídas pela iluminação

Figura 9 – Armadilha McPhail com seus componentes.



Fonte: Adaptado de Sobrinho et al. (2001).

natural que entra na armadilha pela tampa superior transparente. Após entrarem elas não conseguem retornar devido ao formato em cone da entrada e ao fato de serem atraídas pela luz natural ficando presas (Figura 10) (SOBRINHO et al., 2001).

Figura 10 – Base da Armadilha McPhail com moscas capturadas.

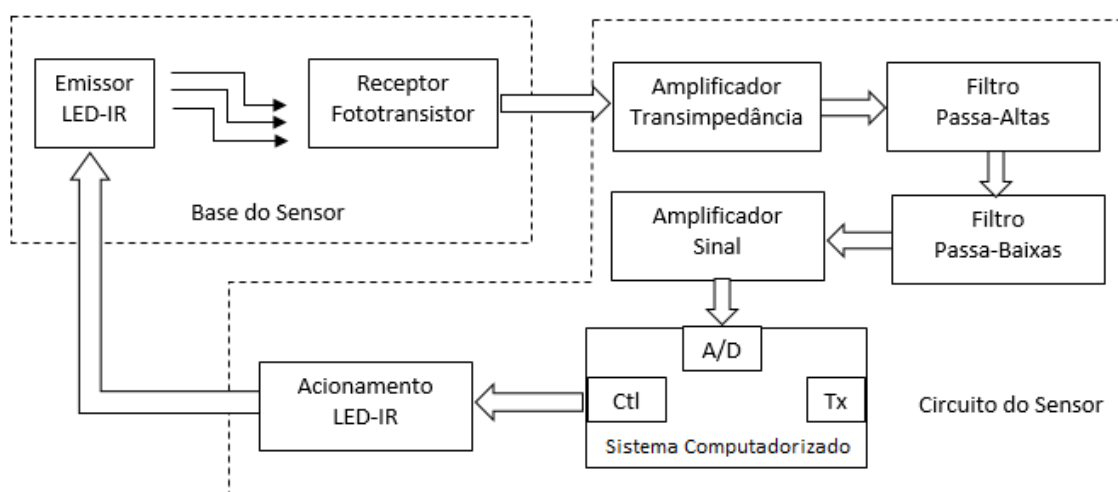


Fonte: Extraído de Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2015).

Com isto a base do sensor foi projetada levando em conta as dimensões, formato e o funcionamento de uma armadilha McPhail. A base foi desenvolvida para ser acoplada no interior da armadilha sobre seu cone de entrada buscando influenciar o mínimo possível no funcionamento da armadilha, apenas alongando o trajeto de entrada, permitindo monitorar a entrada das moscas com uma possibilidade mínima que alguma saia da armadilha passando novamente pelo sensor.

Os requisitos estabelecidos para desenvolvimento do hardware necessário para a aquisição, tratamento e processamento do sinal gerado pelo batimento de asas dos insetos foram baseados no estudo realizado no Capítulo 2 sobre a morfologia das moscas-das-frutas de interesse, técnicas de processamento de sinais utilizadas e características do emissor e receptor utilizados. Assim, o hardware do sensor optoeletrônico foi dividido em blocos funcionais baseado no diagrama apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama em Blocos do Circuito do Sensor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na base do sensor ficam localizados o circuito do bloco do emissor IR e o circuito do bloco do receptor IR, tendo o bloco do emissor IR a função de gerar uma luz de base à qual o inseto atravessará. A luz de base com as variações causadas pelo batimento de asas do inseto será captada pelo bloco do receptor e convertida em um sinal de corrente elétrica. A saída do bloco do receptor é conectada ao bloco do amplificador de transimpedância que fará a conversão da corrente gerada pela luz incidente no receptor em uma tensão (GRAEME, 1995).

O sinal obtido na saída do bloco do amplificador de transimpedância é filtrado pelo bloco do filtro passa-altas, que tem por função eliminar o nível DC gerado pela iluminação de base fornecida pelo emissor e atenuar a interferência gerada pela

frequência da rede elétrica de 60 Hz. A frequência de corte foi definida em 70 Hz, devido a frequência da rede elétrica de 60 Hz e a frequência de $89,1 \pm 4,5$ Hz que é a frequência fundamental da *A. fraterculus* obtida por Malavasi e Aquino (1996).

O bloco do filtro passa-baixas teve sua frequência de corte definida em 5000 Hz permitindo a análise de frequências até 1000 Hz, o que corresponde a frequência da quinta harmônica do sinal de batimento de asas da *C. capitata* (frequência fundamental de 180 Hz). A sugestão da análise de frequências até o quinto harmônico foi sugerido por Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2015).

O sinal condicionado obtido na saída do bloco do filtro passa-baixas é amplificado até o fundo de escala do conversor A/D pelo bloco do amplificador de sinal. Após o sinal é convertido pelo conversor A/D do bloco do sistema computadorizado, onde será processado utilizando técnicas de processamento de sinais e caso seja identificado a passagem de um inseto de interesse este evento será contado e posteriormente transmitido para análise. O bloco do sistema computadorizado também será responsável por controlar o bloco de acionamento dos LED-IR.

O bloco de acionamento dos LED-IR será responsável pelo controle da luminosidade de cada linha de LED-IR do emissor. Para isto, foi definido o uso de uma fonte de corrente independente em cada linha do bloco do emissor, isto permite que se possa ter uma quantidade de luz gerada diferente em cada linha podendo ser controlada com o uso de um PWM no bloco do sistema computadorizado. A opção pela alimentação dos LED-IR por fontes de corrente é devido que a intensidade luminosa gerada é diretamente proporcional a corrente que circula no LED. Assim garantindo uma corrente fixa a luminosidade gerada para o receptor será constante diminuindo o ruído do sensor.

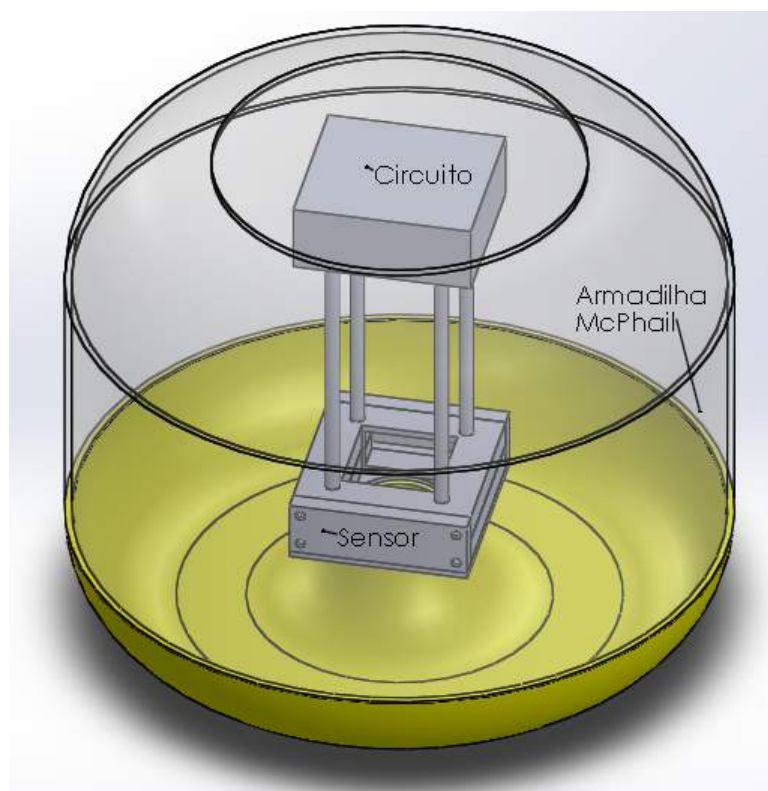
A proposta conceitual da armadilha inteligente composta pelo sensor optoeletrônico e uma armadilha McPhail é apresentada na Figura 12. Onde, nota-se a base do sensor acoplada ao cone de entrada da armadilha e acima a caixa onde ficará o circuito do *hardware* do sensor.

3.1.1 Base do sensor optoeletrônico

A base do sensor foi dividida em quatro peças para facilitar a sua produção e montagem. Uma base inferior que será acoplada ao cone de entrada da armadilha, uma tampa frontal e uma tampa traseira que irão vedar os circuitos do sensor e a base principal do sensor onde estarão os circuitos emissor e receptor com a zona de passagem das moscas.

A base principal do sensor (Figura 13) teve sua abertura para passagem das moscas definida com 70 mm de largura e 70 mm de comprimento, estas dimensões

Figura 12 – Proposta conceitual da armadilha inteligente.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

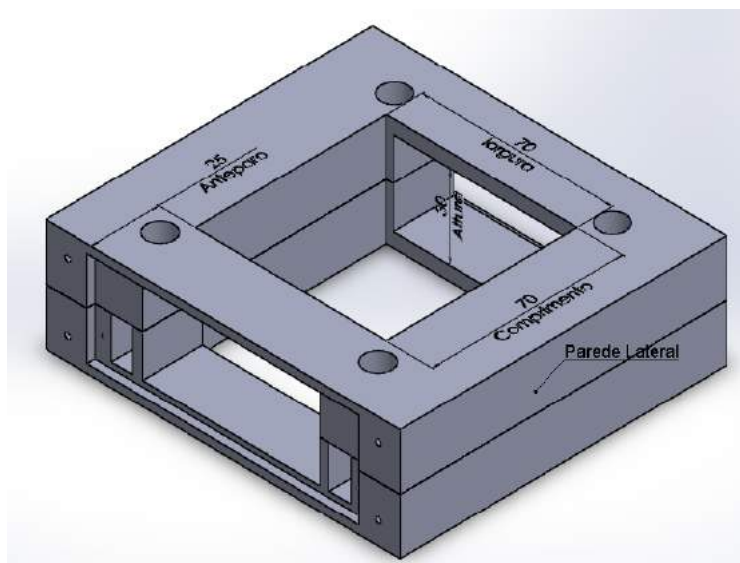
são devido ao tamanho do orifício de entrada da armadilha McPhail. A altura da peça foi definida levando consideração o tempo de aquisição de 100 ms sugerido por Potamitis, Rigakis e Tatlas (2017) e a velocidade de voo de 0,25 m/s obtida em Vogel (1966). A altura mínima é dada por

$$h = \frac{0,25 \text{ m}}{s} 0,1 \text{ s} = 25 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Devido a variação dos parâmetros de voo por condições climáticas, apresentado por Meng, Liu e Sun (2017), foi definido uma altura de 30 mm, permitindo uma tolerância a possível variação na velocidade de voo. Para diminuir a possibilidade de ruído gerado por interferência de luzes externas ao sensor, foi inserido um anteparo de 25 mm de comprimento e colocadas as paredes laterais. Assim, tanto o emissor quanto o receptor ficam isolados da luz do ambiente. Os parâmetros indicados e as dimensões da peça são mostrados na Figura 13.

Para isolar os componentes eletrônicos do emissor e do receptor do ambiente foi colocada uma borda no final do anteparo onde foram colocadas placas de acrílico transparente para realizar a vedação, impedindo que as moscas entrem no anteparo e que a placa de circuito impresso com seus componentes fiquem expostas as agressões do ambiente como umidade, produtos químicos, sujeira, dentre outros (Figura 14

Figura 13 – Projeto da base do sensor optoeletrônico.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Borda acrílico).

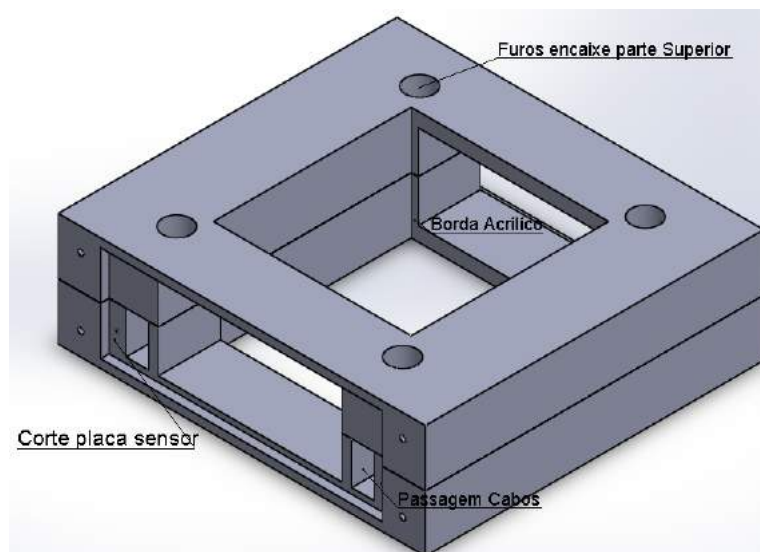
Na parte superior existem quatro furos para fixar os tubos ocos que servem de suporte para o circuito da armadilha inteligente e de dutos de passagem para os fios necessários a ligação do sensor com o circuito (Figura 14 Furos encaixe parte Superior). Tanto na parte frontal quanto na parte traseira foi realizado um corte onde foi encaixada as placas do emissor e do receptor (Figura 14 Corte placa sensor). Também foram projetados dois furos quadrados na parte frontal e dois na parte traseira que se conectarão com os furos superiores e tem como função a passagem dos fios que conectam o sensor com o circuito da armadilha (Figura 14 Passagem cabos).

A base inferior (Figura 15A) tem por objetivo permitir o encaixe do sensor com o orifício de entrada permitindo que o mesmo sensor possa ser utilizado em armadilhas de tamanhos diferentes, personalizando apenas está peça. Na parte superior foram projetados quatro pinos para encaixe nos quatro furos guias da base principal. O orifício central tem o diâmetro e a curvatura do modelo da armadilha em uso.

As tampas frontal e traseira (Figura 15B) tem por finalidade fechar a base do sensor, vedando a parte traseira dos circuitos do emissor e do receptor evitando que eles fiquem expostos as agressões do ambiente como umidade, produtos químicos, sujeira, dentre outros.

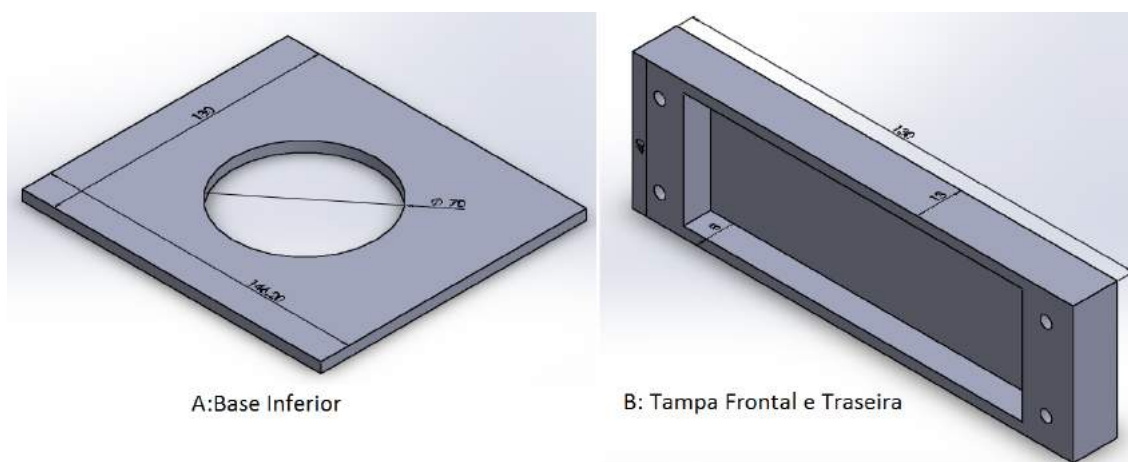
No desenvolvimento do sensor optoeletrônico optou-se pelo uso de materiais de baixo custo e facilidade de implementação. Deste modo na construção da base

Figura 14 – Projeto da base do sensor optoeletrônico - Detalhes.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 15 – Projeto da base do sensor optoeletrônico - A: Base Inferior, B: Tampas Frontal e Traseira.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

do sensor optoeletrônico foi utilizada uma impressora 3D xyz Da Vinci 1.0, com um filamento de PLA. A impressora foi configurada para uma impressão com preenchimento de 50% estilo colmeia, casca grossa, altura da camada de 0,1 mm e velocidade lenta.

3.1.2 Hardware do sensor optoeletrônico

O desenvolvimento do hardware do sensor foi separado por blocos funcionais (Figura 11) que será detalhado a seguir. Para o projeto dos circuitos eletrônicos foi utilizado o *software* Eagle versão 6.4.4

3.1.2.1 Circuito emissor e circuito receptor

No emissor do sensor optoeletrônico foram utilizados LED-IR TIL32. Segundo UsinaInfo (2017a), o LED-IR TIL32 possui como características principais:

- Comprimento de onda de 940 nm;
- Ângulo de dispersão da luz de 35° ;
- Corrente direta de 20 mA;
- Tensão direta de 1,3 V;
- Preço de mercado de R\$ 2,25.

Optou-se pelo uso do LED-IR TIL32 devido a facilidade no controle da iluminação gerada, espectro de luz compatível com o receptor, baixo custo e facilidade de obtenção no mercado local.

Os LED-IR que compõem o emissor do sensor foram dispostos em forma de matriz para que a intensidade de luz dentro da área de passagem do sensor fosse o mais uniforme possível. Para que o sensor possa ser utilizado na concepção de uma armadilha inteligente foi previsto que ele será alimentado com uma bateria de 9 V, sendo utilizada uma profundidade de descarga até 8 V.

Para a determinação do número de linhas da matriz do circuito do emissor levou-se em consideração o ângulo de dispersão da luz do TIL32 ($\alpha=35^\circ$), o tamanho do anteparo ($l_a=25$ mm) e a altura da zona de passagem para os insetos ($h_p=30$ mm). O número de linhas foi definido fazendo

$$N^\circ Linhas = \frac{h_p}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot l_a} = 3,80 \quad (3.2)$$

para garantir a presença de luz em toda a zona de passagem o número de linhas foi arredondando para o inteiro superior sendo utilizadas quatro linhas na matriz do circuito emissor.

O número de colunas foi definido levando em consideração a máxima eficiência energética do circuito e que os TIL32 de uma mesma linha sejam controlados por uma única fonte de corrente. Deste modo foi definido que os TIL32 de uma mesma linha seriam ligados em série e o número de elementos da coluna foi definido fazendo

$$N^\circ Colunas = \frac{b_l}{V_d} = 6,15 \quad (3.3)$$

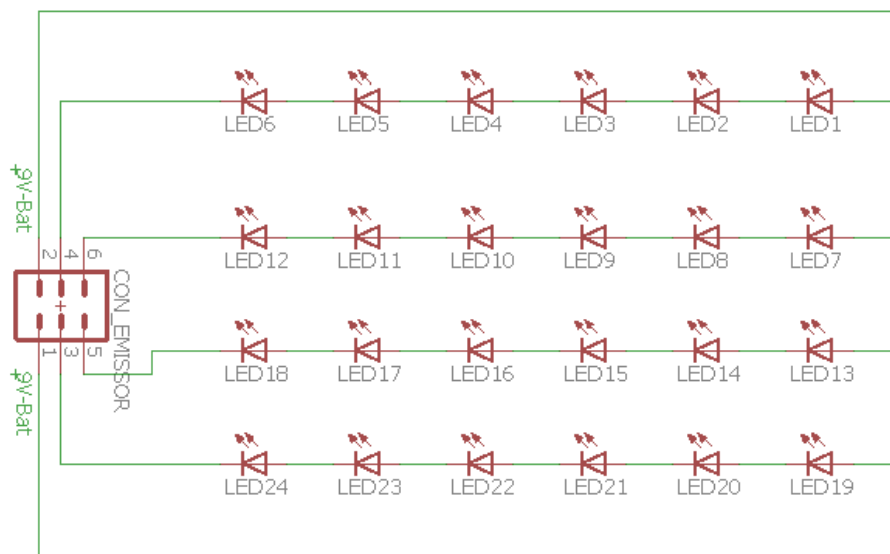
onde os 8 V e os 1,3 V correspondem, respectivamente, a mínima tensão que a fonte de alimentação pode atingir (b_l) e a tensão direta de um TIL32 (V_d). Para garantir que

a tensão necessária no acionamento dos TIL32 não seja maior que os 8 V definidos da fonte de alimentação, o número de colunas foi arredondando para o inteiro inferior, sendo utilizadas seis colunas na matriz do circuito emissor.

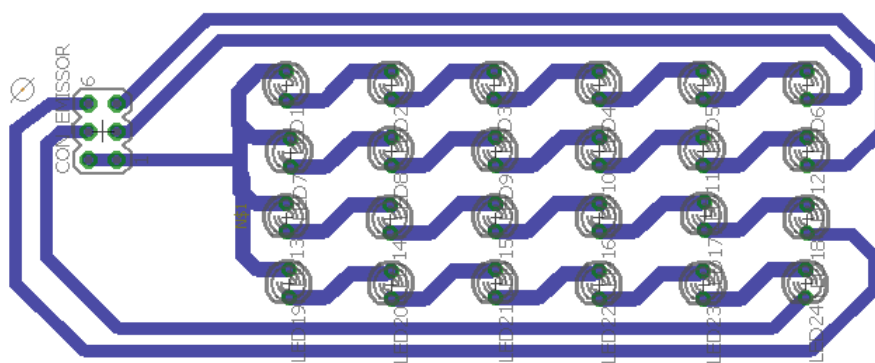
Com isto, o circuito do emissor foi implementado com uma matriz de quatro linhas por seis colunas. O seu esquema elétrico é apresentado na Figura 16a, o leiaute da placa é apresentado na Figura 16b.

Figura 16 – Circuito emissor do sensor optoeletrônico.

(a) Esquema elétrico do emissor.



(b) Leiaute da placa do emissor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para o receptor do sensor optoeletrônico foram utilizados fototransistores TIL78, optou-se pelo seu uso devido ao baixo custo e facilidade de obtenção no mercado local. Conforme UsinaInfo (2017b), o fototransistor TIL78 possui como características principais:

- Comprimento de onda de 940 nm;
- ângulo de recepção de luz de 40°;
- Corrente mínima gerada com luz de 1 mA;
- Corrente gerada no escuro de 20 nA;
- Preço de mercado de R\$ 1,50.

Para a determinação do número de colunas da matriz do circuito receptor foi levado em consideração a largura da zona de passagem da base do sensor ($l_p=70$ mm), tamanho do anteparo da base do sensor ($l_a=25$ mm) e o ângulo de recepção de luz do TIL78 ($\beta=40^\circ$). O número de colunas foi obtido fazendo

$$N^\circ Colunas = \frac{l_p}{\tan(\frac{\beta}{2}) \cdot l_a} = 7,69 \quad (3.4)$$

para garantir que não ocorra áreas de sombra na zona de passagem o número de colunas foi arredondando para o inteiro superior, sendo utilizadas oito colunas na matriz do circuito receptor.

No número de linhas da matriz do circuito receptor optou-se que seja simétrica ao do circuito emissor, sendo utilizadas quatro linhas na matriz do circuito receptor. Assim, o circuito receptor foi implementado com uma matriz de quatro linhas por oito colunas, com os fototransistores ligados em paralelo para que a corrente gerada no sensor seja a soma das correntes geradas por cada fototransistor. O seu esquema elétrico é apresentado na Figura 17a, o leiaute da placa é apresentado na Figura 17b.

3.1.2.2 Amplificador de transimpedância

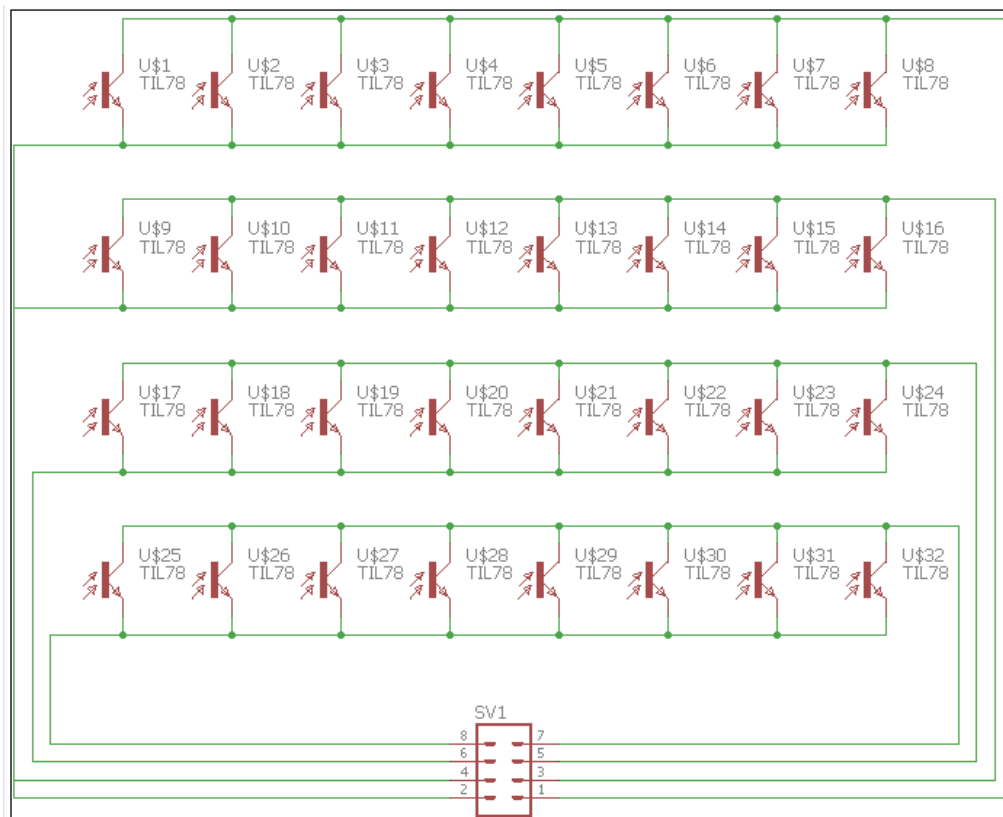
O bloco do amplificador de transimpedância tem a função de converter a corrente gerada pela incidência de luz sobre os fototransistores em uma tensão.

Para o circuito do amplificador de transimpedância foram avaliadas três configurações (Figura 18) sendo a que apresentou melhor desempenho nos experimentos com relação ao ruído e distorção do sinal foi a configuração A.

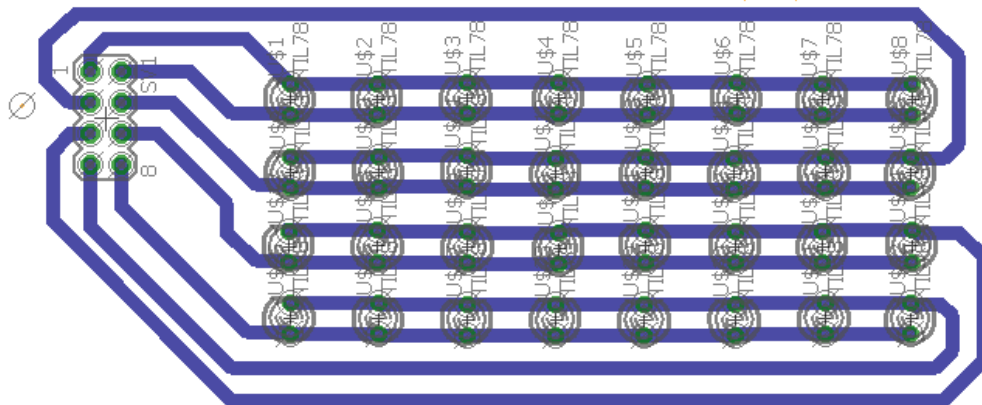
No seu projeto foi conectado um potenciômetro a saída do circuito receptor que corresponde ao coletor dos fototransistor, utilizando a configuração emissor comum. O potenciômetro foi utilizado para que a polarização dos fototransistores pudesse ser regulada conforme a luz de base do emissor fosse regulada, sendo a polarização definida em $V_{CC}/2$. Deste modo no coletor dos fototransistores resulta um sinal de tensão proporcional a corrente gerada nos fototransistores.

Figura 17 – Circuito receptor do sensor optoeletrônico.

(a) Esquema elétrico do receptor.



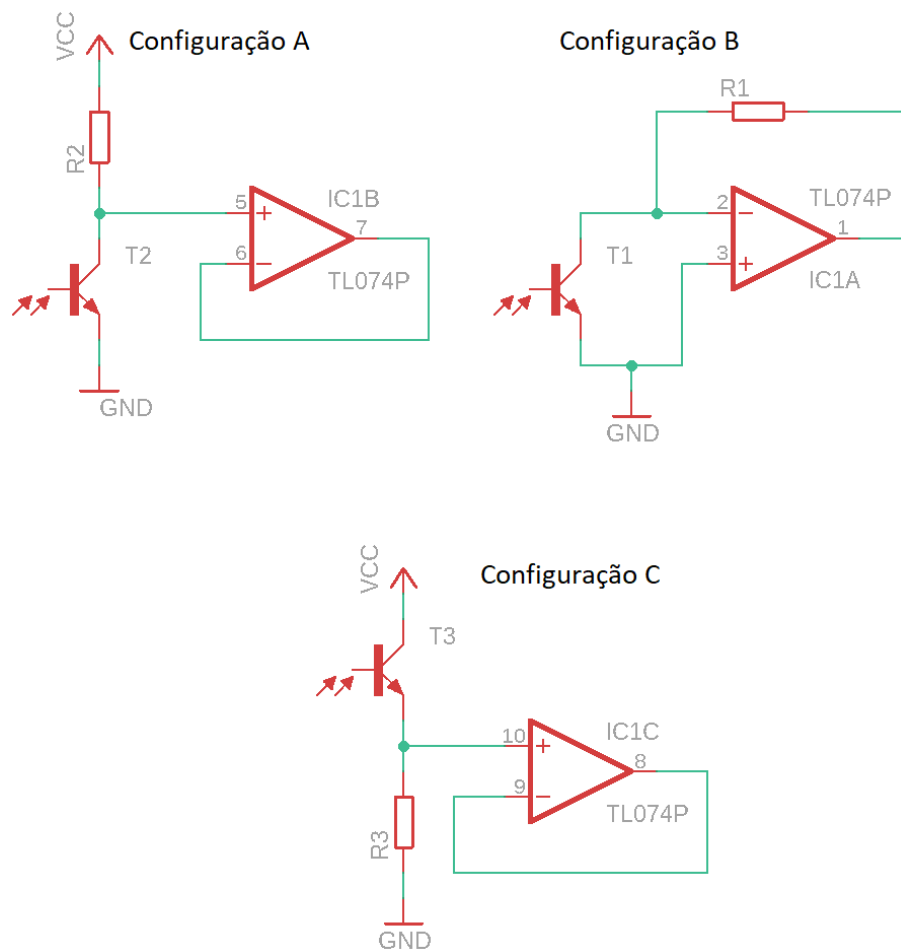
(b) Leiaute da placa do receptor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na sequência o sinal de tensão é amplificado com ganho determinado por R3 e R2, sendo de 10 e banda passante com frequência de corte inferior determinado por R2 e C2, sendo de 0,72 Hz e frequência de corte superior determinado por R3 e C2, sendo de 48,2 kHz. O projeto completo do amplificador de transimpedância com seu esquema elétrico e leiaute da placa é apresentado no Apêndice C.

Figura 18 – Configurações avaliadas para o circuito de transimpedância.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

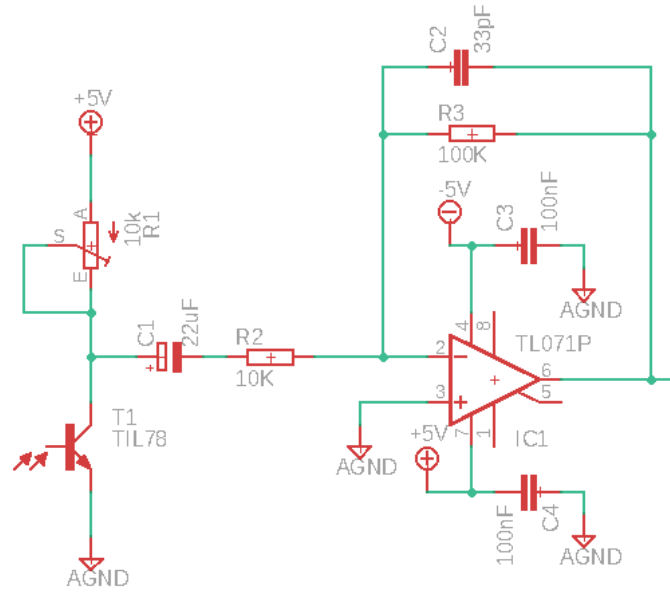
3.1.2.3 Filtros passa-altas e passa-baixas

No cálculo dos filtros analógicos foi utilizado o software FilterPro Desktop Versão 3.1.0.23446 desenvolvido pela Texas Instruments. Sendo utilizada a aproximação *Butterworth*, pois ela tem como característica uma resposta em frequência plana na banda passante sem a presença de *ripple* na frequência de corte. Essa característica é importante devido a proximidade da frequência de corte do filtro passa-altas (70 Hz) com a menor frequência de interesse ($89,1 \pm 4,5$ Hz).

O filtro passa-altas tem como função a eliminação no nível DC gerado pela luz de base emitida pelos TIL32, permitindo a passagem apenas do sinal elétrico correspondente a variação da luz causada pelas batidas das asas dos insetos.

A ordem do filtro implementado foi definida experimentalmente, assim verificou-se a necessidade de um filtro de sexta ordem devido a proximidade da frequência de corte (70 Hz) com a frequência do ruído gerado pela rede elétrica (60 Hz), assim foi obtida uma atenuação em torno de -10 dB em 60 Hz.

Figura 19 – Amplificador de transimpedância projetado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Utilizando a aproximação *Butterworth*, frequência de corte em 70 Hz, ganho unitário na banda de passagem, atenuação de -60 dB por década e um *ripple* de 0 dB na banda de passagem foi obtida a seguinte função de transferência para o filtro passa-altas

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-s^6}{s^6 + 1772s^5 + 1,56 \cdot 10^6 s^4 + 8,66 \cdot 10^8 s^3 + 3,19 \cdot 10^{11} s^2 + 7,43 \cdot 10^{13} s + 8,64 \cdot 10^{15}} \quad (3.5)$$

Para o projeto do filtro foi escolhida a topologia MFB com uma implementação em três estágios de segunda ordem conectados em cascata, com o uso de componentes passivos com tolerância de 10 % e o amplificador operacional TL074 Texas Instruments (1978 – revisado em 2017). A escolha da topologia MFB foi devido a sua maior robustez à variação dos valores dos componentes, sendo mais indicada a projetos de baixo custo, Jr (2015). As características de cada estágio são apresentadas na Tabela 4.

A resposta em frequência do filtro projetado é apresentada na Figura 20 , onde nota-se a frequência de corte de 70 Hz, uma atenuação aproximada de -10 dB na frequência e 60 Hz, o ripple de 0 dB na banda de passagem e o ganho unitário na banda de passagem, atendendo aos requisitos do projeto.

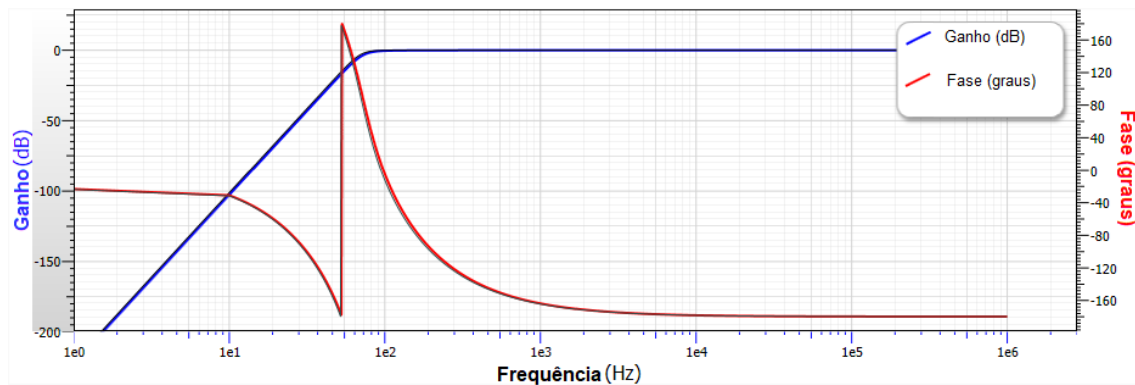
O filtro passa-baixas tem como função a limitação da frequência superior da banda passante, servindo como um filtro *anti-alias*. Assim, foi definido o uso de um filtro passa-baixas de sexta ordem, frequência de corte de 5000 Hz, ganho unitário na banda de passagem e *ripple* de 0 dB na banda de passagem. Deste modo o filtro

Tabela 4 – Características de cada estágio do filtro passa-altas.

Característica	1º estágio	2º estágio	3º estágio
Ganho banda de passagem	1	1	1
Frequência de corte	70 Hz	70 Hz	70 Hz
Fator de qualidade	0,52	0,71	1,93

Fonte – Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Resposta em frequência do filtro passa-altas de sexta ordem projetado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

possibilita a passagem das frequências de interesse que são abaixo de 1000 Hz e uma taxa de amostragem no conversor A/D de no mínimo 10 kHz.

Utilizando a aproximação *Butterworth* e os requisitos do projeto foi obtida a seguinte função de transferência para o filtro passa-baixas

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-8,73 \cdot 10^{26}}{s^6 + 1,20 \cdot 10^5 s^5 + 7,25 \cdot 10^9 s^4 + 2,75 \cdot 10^{14} s^3 + 6,94 \cdot 10^{18} s^2 + 1,10 \cdot 10^{23} s + 8,73 \cdot 10^{26}} \quad (3.6)$$

O projeto do filtro passa-baixas foi realizado utilizando a topologia MFB com uma implementação em três estágios de segunda ordem conectados em cascata, com o uso de componentes passivos com tolerância de 10 % e o amplificador operacional TL074. As características de cada estágio são apresentadas na Tabela 5.

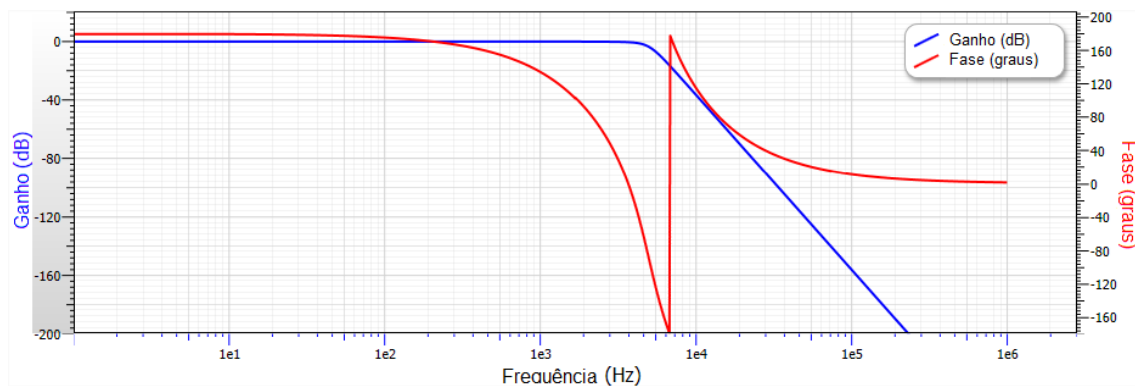
A resposta em frequência do filtro projetado é apresentada na Figura 21, onde nota-se a frequência de corte de 5000 Hz, ripple de 0 dB na banda de passagem e ganho unitário na banda de passagem, atendendo aos requisitos do projeto. O projeto completo do circuito do filtro passa-altas e filtro passa-baixas com seu esquema elétrico e leiaute da placa é apresentado no Apêndice C.

Tabela 5 – Características de cada estágio do filtro passa-baixas.

Característica	1º estágio	2º estágio	3º estágio
Ganho banda de passagem	1	1	1
Frequência de corte	5 kHz	5 kHz	5 kHz
Fator de qualidade	0,52	0,71	1,93

Fonte – Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Resposta em frequência do filtro passa-baixas de sexta ordem projetado.



Fonte – Elaborado pelo autor.

3.1.2.4 Amplificador de sinal

O bloco amplificador de sinal tem por função a amplificação do sinal condicionado pelos filtros analógicos até o fundo de escala do conversor A/D. Deste modo é possível obter uma maior resolução da intensidade do sinal durante a conversão.

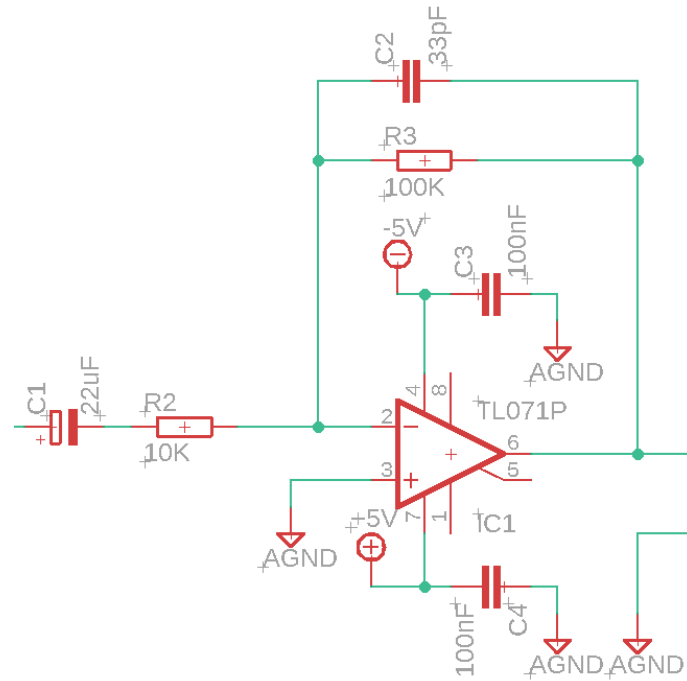
Este bloco é composto por um amplificador de dois estágios. Ambos os estágios foram projetados utilizando um amplificador operacional TL074 configurado como amplificador inversor (Figura 22).

Optou-se pela configuração de dois estágios para minimizar a influência de *offset* no sinal, que é originada por um amplificador de um único estágio de alto ganho. Deste modo a cada estágio de amplificação o *offset* é eliminado pelo filtro passa-altas composto por C1 e R2. O filtro passa-baixas composto por R3 e C2 tem por função limitar o ganho em altas frequências funcionando como um filtro *anti-aliasing*.

Para determinação do ganho total necessário no amplificador de sinal foi levado em consideração:

- A tensão de fundo de escala da entrada de linha da placa de som utilizada como conversor A/D. Sendo obtido experimentalmente o valor de 2 Vpp para

Figura 22 – Diagrama elétrico de um estágio do amplificador de sinal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

a tensão de fundo de escala;

- A intensidade da luz de base sobre o emissor foi gerada por uma linha do emissor com uma corrente de polarização de 20 mA;
- No ajuste do ganho foi utilizada como referência a passagem da *A. fraterculus*, que por ser o inseto de maior tamanho causou a maior variação na amplitude do sinal.

Considerando que o ganho de um amplificador operacional na configuração amplificador inversor é determinado por

$$A_v = -\frac{R_3}{R_2} \quad (3.7)$$

e que as frequências de corte inferior e superior são dadas por

$$freq_{inf} = \frac{1}{2\pi C_1 R_2} \text{ e } freq_{sup} = \frac{1}{2\pi C_2 R_3}, \quad (3.8)$$

o primeiro estágio teve um ganho determinado de 100, com frequência de corte inferior de 0,72 Hz e frequência de corte superior de 48,2 kHz. O segundo estágio possui um ganho de 2,7 com frequência de corte inferior de 0,72 Hz e frequência de corte superior de 49,1 kHz.

Assim o circuito do amplificador de sinal possui um ganho total de 270 com uma frequência de corte inferior de 0,72 Hz e frequência de corte superior de 48,2 kHz

O projeto completo do circuito amplificador de sinal com seu esquema elétrico e leiaute da placa é apresentado no Apêndice C, sendo o primeiro estágio projetado na placa dos filtros passa-baixas e passa-altas e o segundo estágio na placa do amplificador de sinal.

O *hardware* do sensor composto pelo amplificador de transimpedância, filtro passa-altas, filtro passa-baixas e amplificador de sinal, possui um ganho total de 405.10^6 , frequência de corte inferior de 70 Hz e frequência de corte superior de 5 kHz.

3.1.2.5 Sistema computacional

Na implementação do bloco do sistema computacional foi utilizado um computador Dell Optiflex 9010, com processador Intel(R) Core(TM) i5-3570M 3,40 GHz, memória ram de 8,00 GB, sistema operacional Windows 10 PRO, placa de som Realtek High Definition Audio versão 6.0.1.6075.

Assim, a saída do amplificador de sinal foi conectada a entrada de linha do computador, utilizando o conversor A/D da placa de áudio para a conversão do sinal gerado. Na gravação dos arquivos áudio foi utilizado o *software* Audacity versão 2.1.3. A gravação foi realizada em arquivos do formato WAV, com uma taxa de amostragem de 192000 Hz, mono e com resolução de 16bit float.

O processamento digital dos sinais de áudio capturados foi realizada utilizando o software SciLab versão 6.0.0. Onde foram implementados os scripts apresentados no Apêndice A.

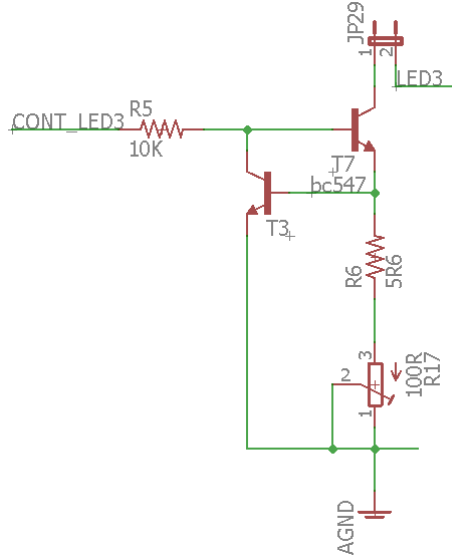
3.1.2.6 Acionamento LED-IR

O bloco de Acionamento dos LED-IR foi projetado utilizando fontes de corrente constante, sendo desenvolvida uma fonte para cada linha do emissor. Isto possibilitou o acionamento independente de cada linha do sensor com intensidades de corrente diferentes. Optou-se por esta técnica para obter uma maior eficiência energética e um controle preciso na intensidade luminosa gerada que é proporcional a corrente que percorre o LED-IR. Deste modo são minimizadas variações na luz gerada ocasionadas por variação da tensão da fonte ou ruídos elétricos.

Na Figura 23, é apresentado o esquema elétrico de uma das fontes de corrente implementadas para uma linha do circuito sensor. O *label* CONT_LED3 indica a ligação com o bloco do sistema computadorizado que irá ativar a linha colocando nível logico alto ou desativar a linha colocando nível logico baixo, outra possibilidade será

a implementação do acionamento modulado por pulsos de alta frequência (PWM). O *label* LED3 indica qual linha do circuito emissor será controlada, neste caso será a terceira linha.

Figura 23 – Fonte corrente constante implementada para uma linha do circuito emissor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A corrente da fonte é determinada pela tensão V_{BE} do transistor T_3 e pela resistência da associação entre o resistor R_6 e o potenciômetro R_{17} , sendo determinada por

$$I_{fonte} = \frac{V_{BE}}{R_6 + R_{17}} \quad (3.9)$$

, considerando $V_{BE}=0,7$ V, $R_6=5,6\Omega$ e R_{17} variando de 0Ω até 100Ω . A fonte de corrente pode ser ajustada de $6,62$ mA até 125 mA.

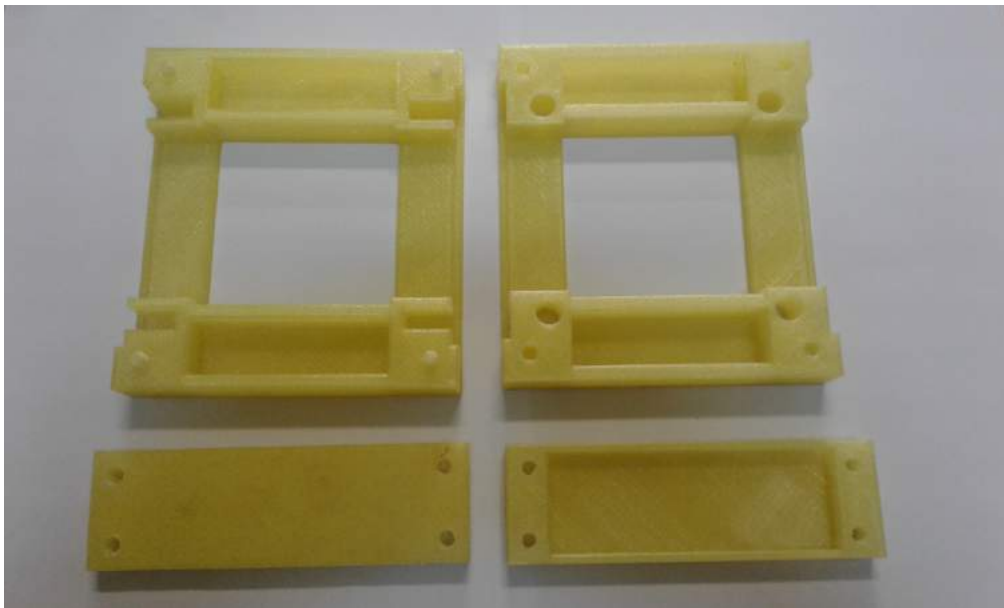
3.2 Implementação do sensor optoeletrônico

A base principal do sensor foi dividida em duas peças facilitando a sua impressão e montagem. Assim foram produzidas quatro peças a tampa frontal, tampa traseira, base inferior e a base superior. Para as tampas frontal e traseira levou-se em torno de 7 horas para a impressão, para as bases inferior e superior foram necessárias 13 horas para a impressão. As peças da base do sensor produzidas são mostradas na Figura 24a. A base do sensor montada é apresentada na Figura 24b.

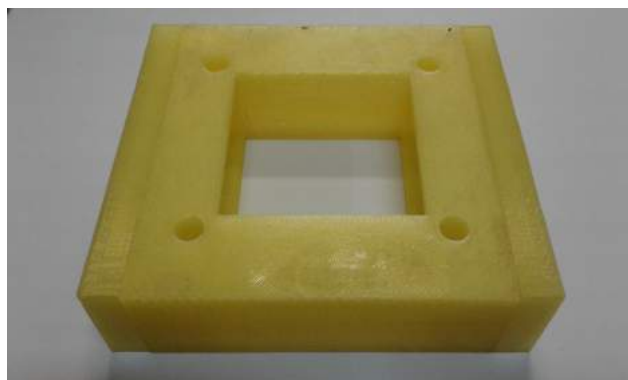
O circuito do emissor foi implementado na forma de uma matriz de LED-IR com uma configuração de quatro linhas por seis colunas (Figura 25). Com uma distância entre colunas de 8 mm e uma distância de 5 mm entre as linhas. Sendo

Figura 24 – Base do sensor optoeletrônico implementada.

(a) Peças da base do sensor.



(b) Base do sensor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

posicionada a uma distancia de 8 mm das bordas laterais da base e a uma distancia de 10 mm das bordas superior e inferior da base, esse posicionamento foi baseado no número de linhas e colunas da matriz definido na subseção 3.1.2.1 e nas dimensões da base do sensor definidas na subseção 3.1.1 permitindo um luz de base uniforme na zona de passagem. Para a conexão com o circuito de acionamento LED-IR foram utilizados seis fios, sendo dois para a conexão com VCC e quatro fios para a conexão de cada linha do emissor com sua fonte de corrente no circuito de acionamento LED-IR correspondente.

O circuito do receptor foi implementado na forma de uma matriz de fototransistores com uma configuração de quatro linhas por oito colunas (Figura 26). Com uma distância entre colunas de 5 mm e uma distância de 5 mm entre as linhas. Sendo

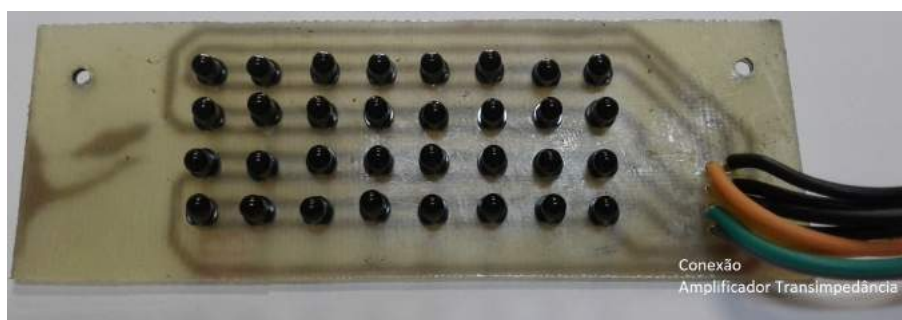
Figura 25 – Circuito implementado do emissor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

posicionada a uma distancia de 8 mm das bordas laterais da base e a uma distancia de 10 mm das bordas superior e inferior da base, esse posicionamento foi baseado no número de linhas e colunas da matriz definido na subseção 3.1.2.1 e nas dimensões da base do sensor definidas na subseção 3.1.1, com o objetivo que não ocorra áreas de sombra na captura da luz. Para a conexão com o circuito de transimpedância foram utilizados oito fios, sendo quatro fios correspondentes a conexão dos emissores dos fototransistores por linha ao GND do circuito e quatro fios correspondentes a conexão dos coletores dos fototransistores por linha ao circuito do amplificador de transimpedância. Essa configuração para conexão permitiu a seleção de quais linhas do receptor serão utilizadas.

Figura 26 – Circuito implementado do receptor.



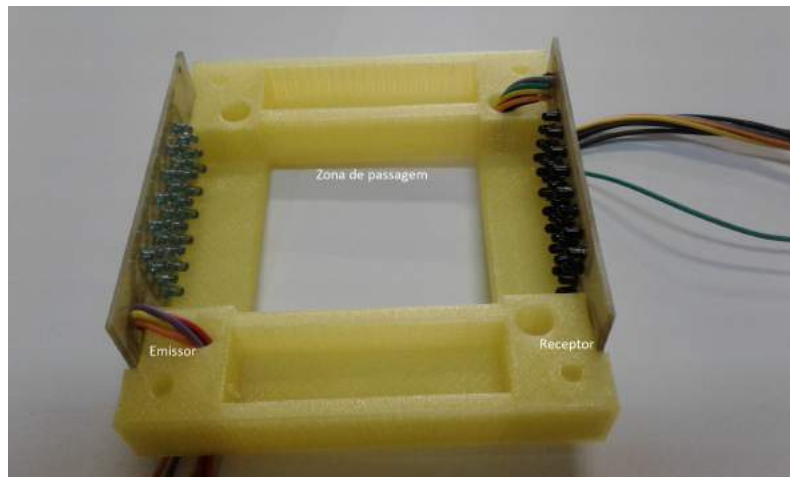
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para montagem dos circuitos do emissor (direita) e receptor (esquerda) na base do sensor optoeletrônico (Figura 27a), optou-se pela sua fixação apenas na metade superior da base. Isto permitiu que os fios para conexão com os circuitos do amplificador de transimpedância e acionamento LED-IR fossem passados pelos furos para encaixe dos suportes para a parte superior da armadilha, onde eles ficarão localizados. Na Figura 27b é apresentada a base do sensor finalizada com a metade inferior da base fixada e com as conexões para o circuito de acionamento dos LED-IR

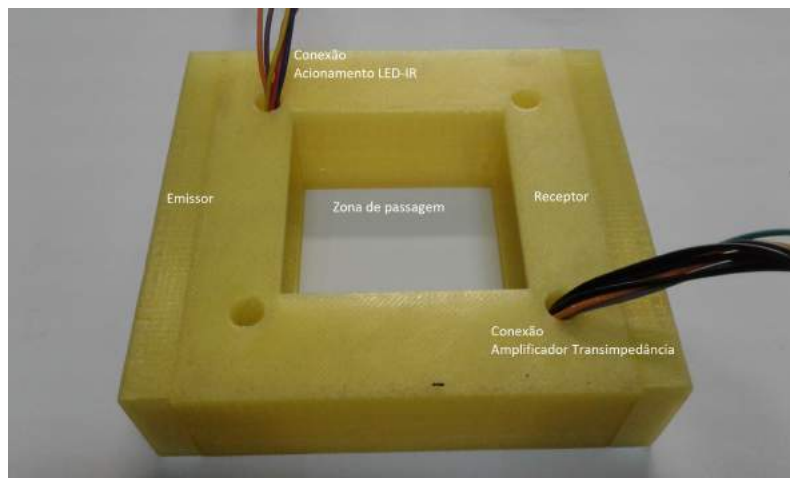
e o circuito do amplificador de transimpedância através dos furos para encaixe dos suportes para a parte superior.

Figura 27 – Base do sensor optoeletrônico com os circuitos do receptor e emissor posicionados.

- (a) Detalhe da montagem dos circuitos do emissor (direita) e receptor (esquerda).



- (b) Base do sensor optoeletrônico montada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 28 são apresentados os circuitos do hardware do sensor e suas conexões. O sensor optoeletrônico realizando captura de sinal é apresentado na Figura 29.

3.3 Método de avaliação do sensor optoeletrônico

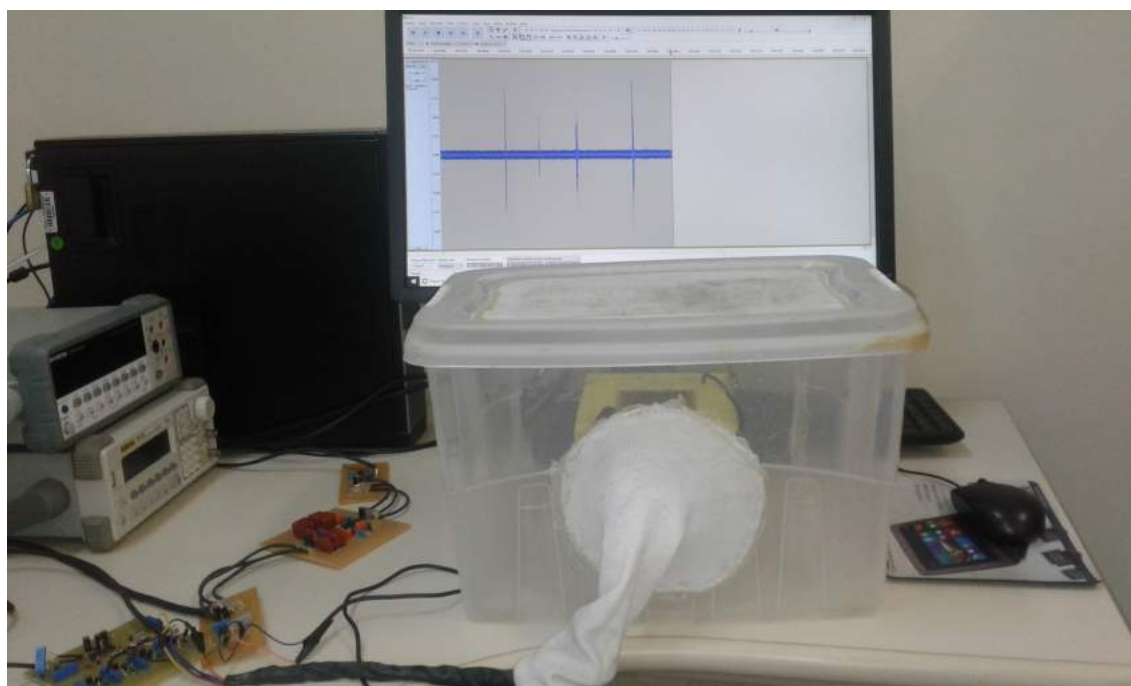
O experimento utilizado para a avaliação do sensor optoeletrônico consistiu em submeter o sensor a um estímulo controlado, podendo assim ser avaliado o ruído

Figura 28 – Circuitos implementados do hardware do sensor optoeletrônico.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 29 – Sensor optoeletrônico realizando a captura de sinal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

gerado no sistema, diferença de desempenho entre as configurações das matrizes do receptor e do sensor, capacidade de captar diferentes frequências de oscilação na luz e a verificação das medições realizadas.

Para a realização destes experimentos foi desenvolvido um dispositivo para causar pequenas obstruções na luz captada pelo sensor, simulando o batimento das asas de um inseto (Figura 30). O simulador de batidas de asas de insetos consiste

em um motor DC com um fio de 0,5mm de diâmetro fixado em seu eixo, o fio será o elemento responsável por ocasionar a variação da luz. O motor utilizado é o RK-370C que tem como características uma tensão de alimentação de 12 V, com uma curva de resposta de velocidade por tensão linear, com uma velocidade de 6000 rpm a uma tensão de 12V e 3000 rpm a uma tensão de 6 V.

Figura 30 – Dispositivo para simulação do batimento das asas de moscas-das-frutas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Deste modo o simulador foi fixado ao sensor e acoplado um tacômetro Minipa modelo MDT-2245B para medição da rotação e posterior comparação com o valor medido no sistema (Figura 31).

Figura 31 – Simulador do batimento das asas de moscas-das-frutas com tacômetro acoplado fixado ao sensor optoeletrônico.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para a verificação do sinal obtido na saída do amplificador de sinal foi utilizado um osciloscópio Textronix modelo TBS 1062. Assim, pode-se verificar o sinal capturado com o osciloscópio com o capturado pelo sistema computadorizado.

Na análise do sinal foi utilizada a FFT, com o uso da função `fft()` do Scilab, com o objetivo de caracterizar as frequências que compõem o sinal capturado. Para avaliação do sensor foi utilizada a relação entre o sinal de interesse e as distorções encontradas para comparação entre as diferentes configurações das matrizes do sensor.

Os experimentos para avaliação do sensor perante a estímulos controlados foram conduzidos com as fontes de corrente que alimentam os LED-IR reguladas em 20 mA, utilizando uma fonte de alimentação regulada, em um laboratório com iluminação produzida por lâmpadas fluorescente tubular com temperatura de cor de 6500 K e com uma intensidade luminosa sobre o sensor de 7010 lux.

O *script* utilizado para a realização dos experimentos de avaliação do sensor é apresentado no Apêndice A.1.

3.4 Método de medição de sinais gerados pelo batimento das asas de moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*

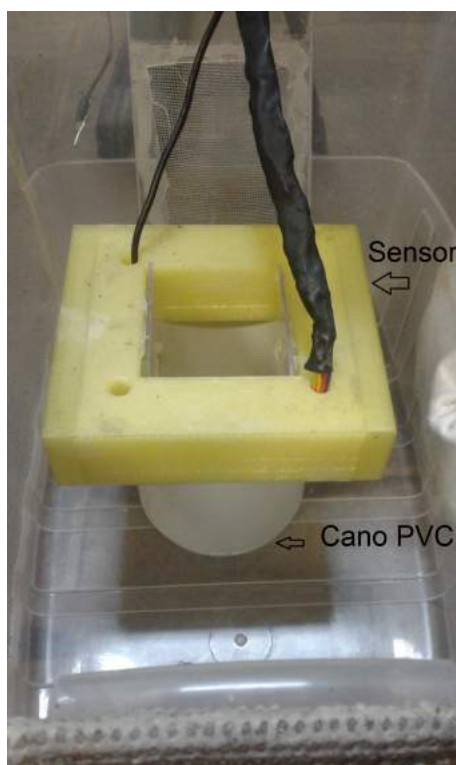
Nos experimentos foram utilizadas moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata* produzidas em laboratório pela Embrapa Clima Temperado - Pelotas/RS, sendo utilizados pupários durante a emergência. Isto possibilitou o uso de insetos com menores chances de apresentarem defeitos físicos, como por exemplo, perda de asas.

O sistema utilizado no experimento de medição de sinais de moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata* (Figura 32) consistiu em uma gaiola adaptada onde foram colocados pupários dentro de um cano de 10 cm de comprimento por 10 cm de diâmetro posicionado sob a área de passagem do sensor. No interior do cano de PVC foi passado talco branco para evitar que as moscas subissem caminhando e assim as moscas foram obrigadas a realizar um voo vertical para cima para sair do cano passando pelo sensor. Os experimentos foram realizados somente com iluminação natural e com uma temperatura ambiente de 28 °C. As

Para a gravação do sinal a saída do amplificador de sinal do sensor foi conectada a entrada de linha do sistema computadorizado, sendo utilizado o *software* Audacity na gravação. A gravação foi finalizada quando observado, por inspeção visual, que os insetos restantes não realizavam a tentativa de sair voando do cano. A gravação foi realizada em faixas de sinal com o tempo de uma hora cada.

Com o objetivo de reduzir o tamanho da faixa de sinal e com isso facilitar o processamento de sinais, cada faixa de sinal foi examinada manualmente e retirado o intervalo de tempo entre os eventos de passagem. Este procedimento é apresentado na Figura 33, onde tem-se uma captura de tela do programa Audacity com uma

Figura 32 – Sistema utilizado nos experimentos para medição do sinal gerado pelo batimento das asas de moscas-das-frutas, com o detalhe do posicionamento do cano e do sensor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

faixa de sinal de uma hora sendo analisada. No espaço selecionado é exemplificado um intervalo de tempo entre dois eventos de passagem que foi localizado e retirado manualmente. A faixa de sinal processada é apresentada na Figura 34 e nota-se que o tempo da faixa foi reduzido para em torno de três minutos permitindo o seu processamento no programa Scilab.

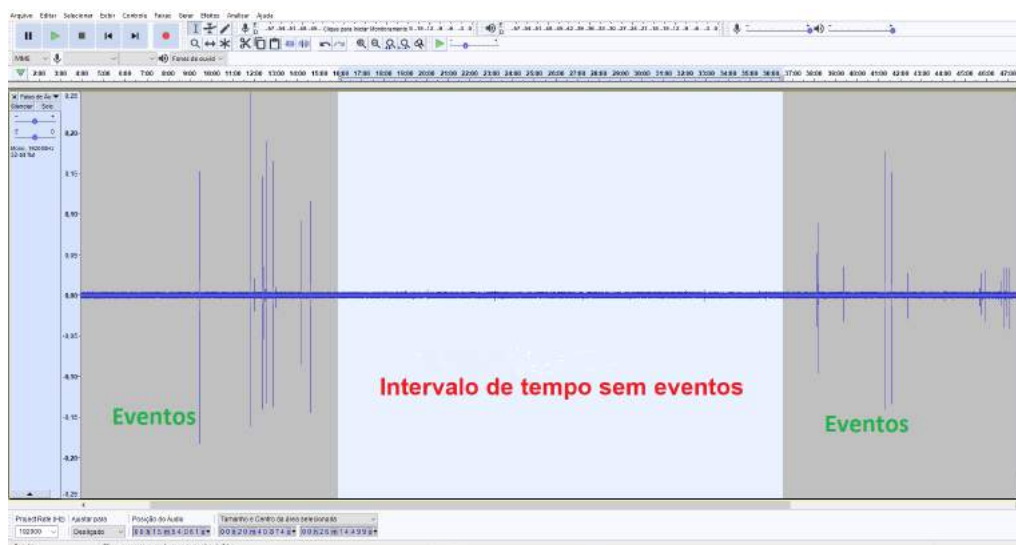
Após a realização deste pré-processamento em cada faixa de sinal gravada é realizada a busca de eventos de passagem dos insetos. Para isto foi realizada a avaliação da energia do sinal utilizando o valor RMS, através da Equação 3.10, sendo considerada uma janela de avaliação deslizante de 30 ms com uma sobreposição de 10 ms.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.10)$$

onde n representa a quantidade de amostras da janela de avaliação.

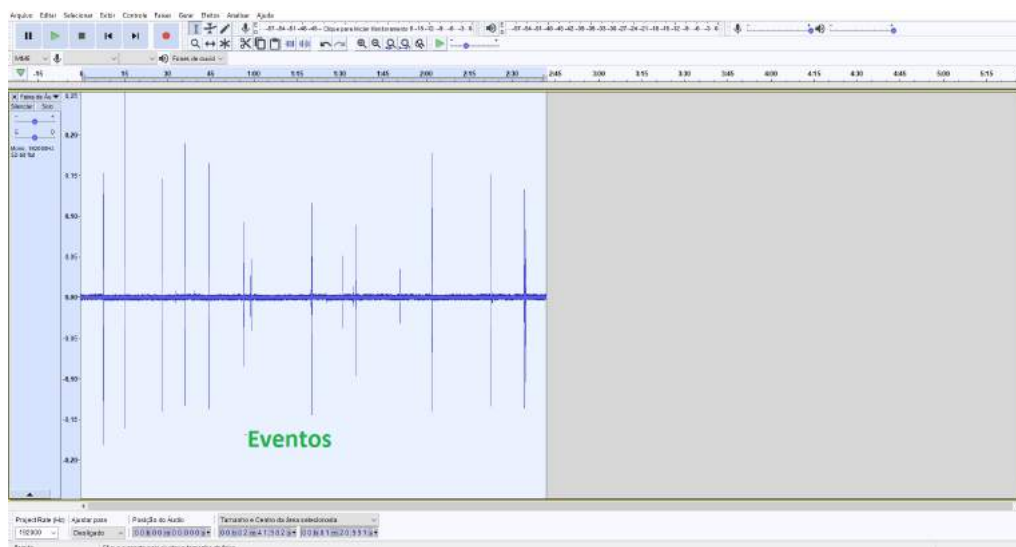
A cada nova faixa de sinal capturada foi realizada a sua medida de energia e comparada ao valor de limiar estabelecido, quando este valor foi superado é detectada uma passagem de inseto pelo sensor. Na Figura 35 é apresentado um extrato de sinal capturado, onde nota-se o ruído de fundo e as flutuações da luminosidade (I, II, III,

Figura 33 – Captura de tela do programa Audacity com uma faixa de sinal com uma hora de duração sendo analisada para remoção do tempo sem eventos de passagem.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 34 – Captura de tela do programa Audacity com uma faixa de sinal com os tempos sem eventos de passagem retirados.

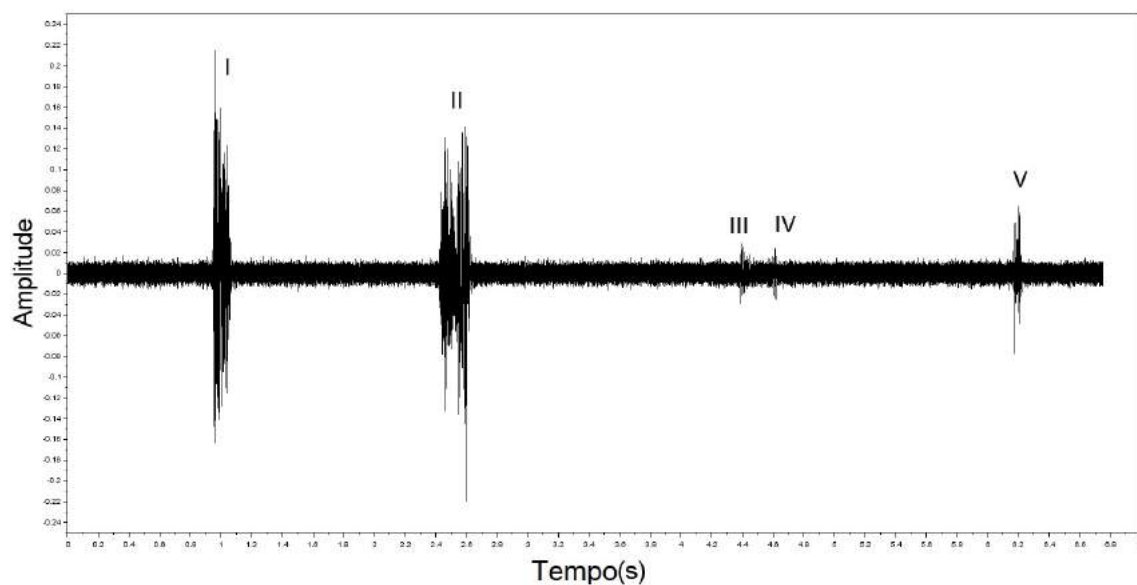


Fonte: Elaborado pelo Autor.

IV e V).

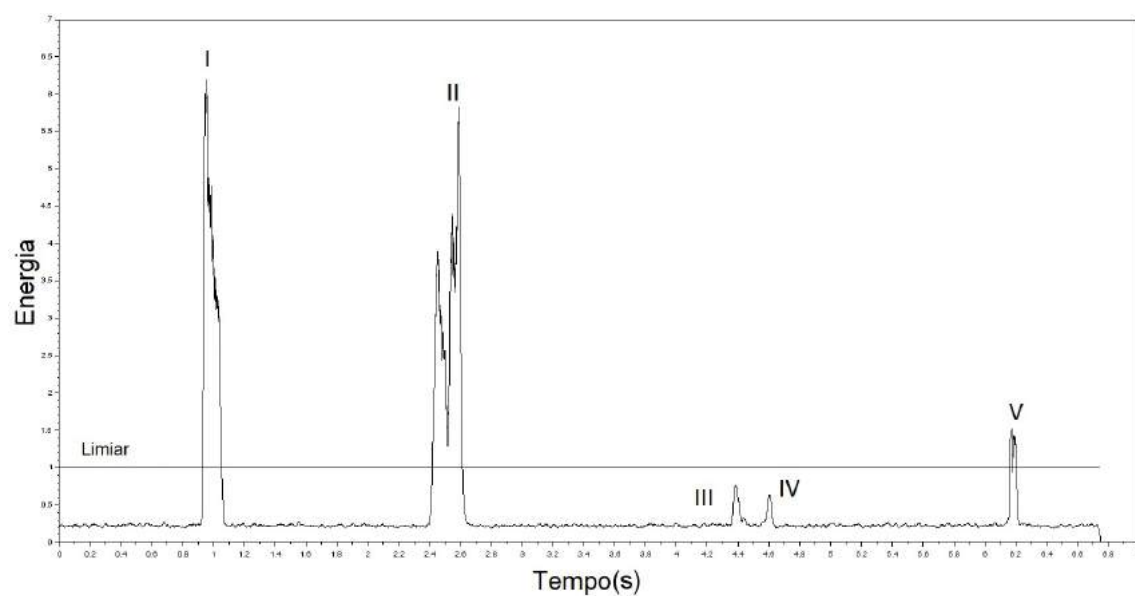
Na Figura 36 é apresentado um exemplo de um resultado da avaliação da energia do sinal com um limiar de valor um. Nota-se eventos de passagem de insetos superando limiar considerado (I, II e V) e flutuações de insetos que tentaram passar pelo sensor e não obtiveram sucesso ficando abaixo do limiar considerado (III e IV).

Figura 35 – Extrato de áudio capturado com flutuações de luminosidade em I, II, III, IV e V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

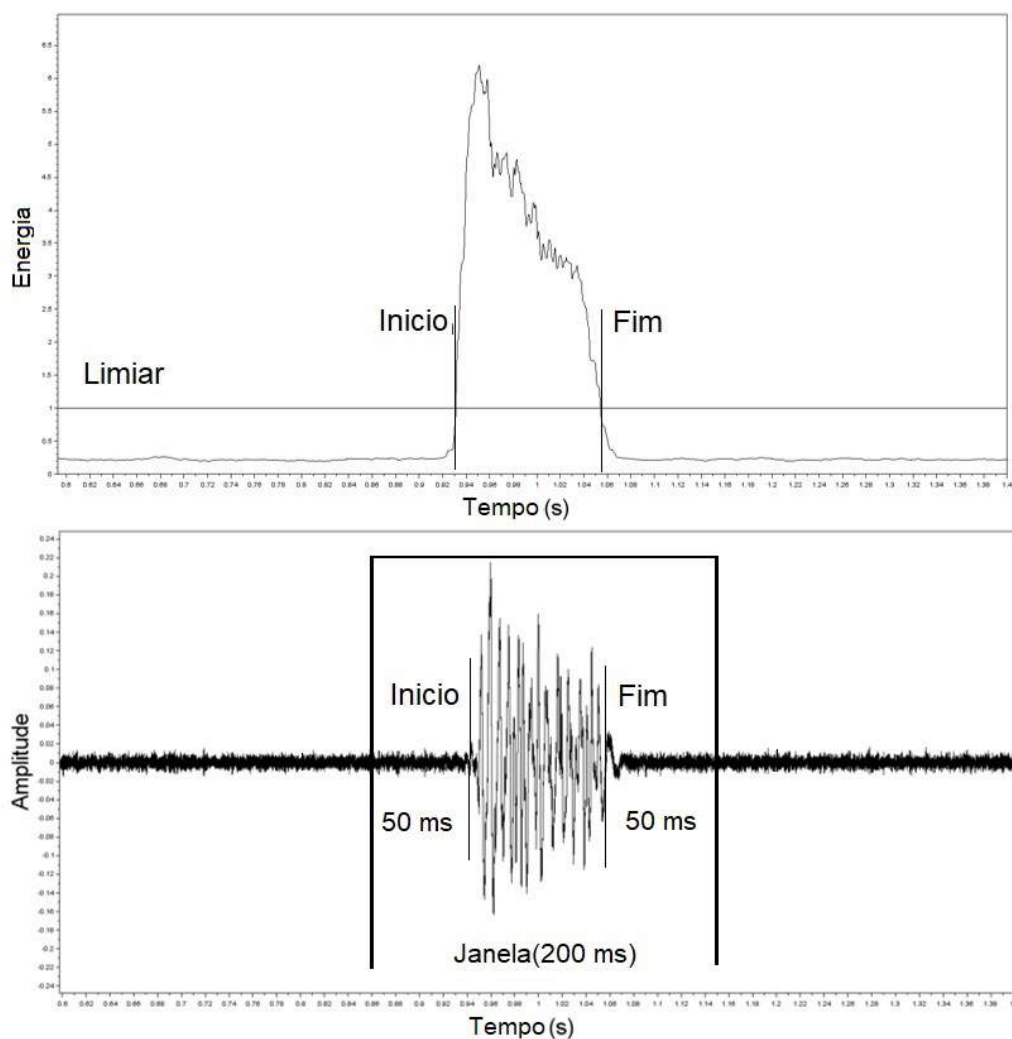
Figura 36 – Energia do sinal avaliada com o uso RMS com limiar de valor um e passagem detectada em I, II e V e desconsiderada em III e IV.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim quando um evento de passagem é detectado, avaliou-se o seu início e final utilizando o cruzamento do valor RMS pelo limiar (Figura 37) e com base nesses valores é armazenada uma janela de dados do evento para processamento do sinal. Para o início da janela foi considerado 50 ms antes do início do evento e 50 ms depois do final do evento (Figura 37), os tempos foram definidos experimentalmente para garantir que o sinal da passagem do inseto esteja dentro da janela.

Figura 37 – Janela de sinal armazenada com base na detecção de passagem de inseto.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os eventos localizados foram analisados e separado um grupo padrão para realização da caracterização do sinal do inseto. O critério utilizado para a separação do grupo padrão foi que o sinal deveria ter no mínimo 100 ms de duração sem considerar os 50 ms adicionados ao início e final de cada de evento de passagem e ser uma passagem direta pelo sensor.

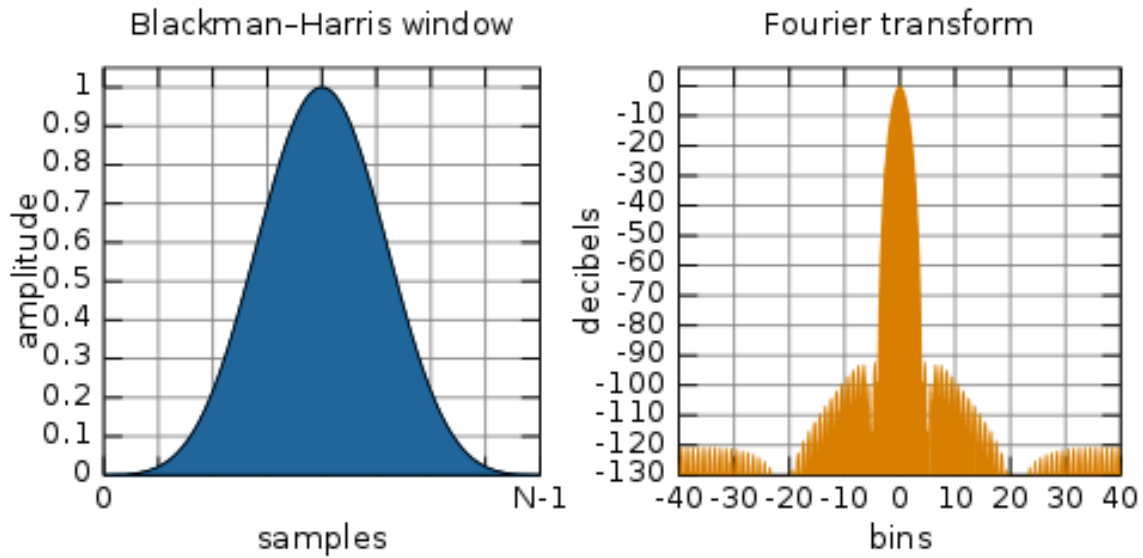
Para a extração das características dos sinais, inicialmente, foi aplicada uma

janela Blackman–Harris (Figura 38) sobre o sinal armazenado, conforme sugerido por Hyatt e Maughan (1994). Dentre suas características a janela Blackman–Harris tende a minimizar os lóbulos laterais da FFT, com seu modelo matemático dado por

$$\omega(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right) \quad (3.11)$$

onde $a_0 = 0,35875$, $a_1 = 0,48829$, $a_2 = 0,14128$ e $a_3 = 0,01168$.

Figura 38 – Janela Blackman–Harris com seu gráfico temporal (esq.) e seu gráfico espectral (dir.).



Fonte: Extraído de Heinzl, Rüdiger e Schilling (2002).

A aplicação da janela Blackman–Harris sobre o sinal armazenado consiste em calcular o modelo matemático da janela utilizada para cada ponto armazenado do sinal, isto permite a suavização das bordas ocasionadas pelo recorte do sinal do evento da faixa de sinal original minimizando o aparecimento de frequências inexistentes ou fictícias no espectro desse sinal durante a FFT.

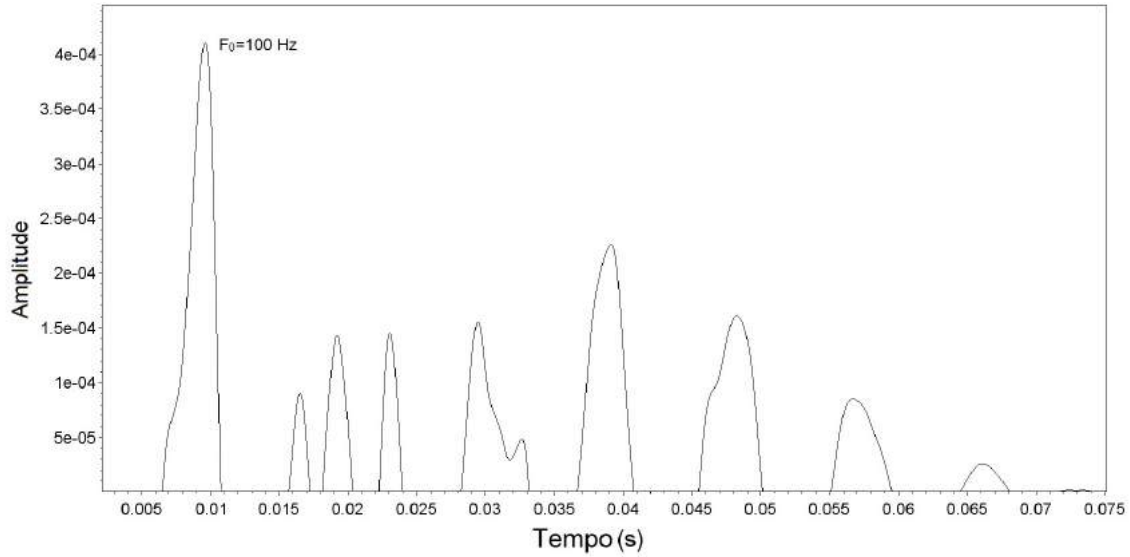
Com o sinal submetido a janela Blackman–Harris ele foi expandido inserindo-se novas amostras com valor zero até que o tamanho da janela de análise tenha o tempo de um segundo. Deste modo foi obtida uma resolução de 1 Hz na execução do algoritmo da FFT, permitindo uma análise mais detalhada do sinal do batimento de asas dos insetos.

Para a extração das características do sinal foram utilizadas duas técnicas a Autocorrelação e a FFT. A Autocorrelação, Equação 3.12, foi utilizada com o objetivo de obter informações relativas a frequência fundamental do batimento de asas da mosca.

$$r_{xx}(l) = \sum_{i=1}^{Nw} x(i+l)x(i) \quad (3.12)$$

Para a janela de sinal da Figura 37, o resultado da Autocorrelação é apresentada na Figura 39, nota-se a o pico correspondente a frequência fundamental no instante de tempo de 10 ms o que corresponde a uma frequência de 100 Hz.

Figura 39 – Sinal de Autocorrelação com frequência fundamental em 100 Hz.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

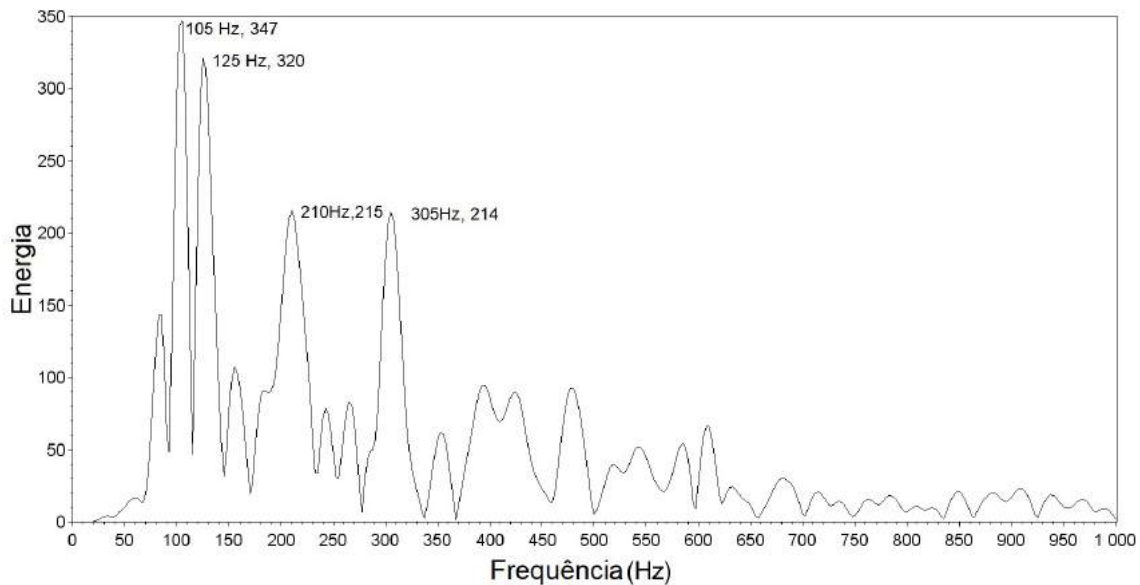
Na análise das harmônicas do sinal foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier, Equação 3.13, com o objetivo de caracterizar as frequências das harmônicas e suas relações de energia com a frequência fundamental.

$$FFT = \sum_{i=0}^{W_n-1} x_i \cdot e^{\frac{-j2\pi}{W_n} i} \quad (3.13)$$

O espectro de frequência obtido com a análise do sinal da Figura 37 é apresentado na Figura 40. Onde nota-se a frequência fundamental de 105 Hz já obtida pelo método da autocorrelação e picos de sinal em 125 Hz, 210 Hz e 305 Hz.

Para a extração automática das características do sinal foi utilizado o *script* apresentado no Apêndice A.2. Neste *script* são aplicados os algoritmos Autocorrelação (função `xcorr()` do Scilab) e FFT (função `fft()` do Scilab), no resultado da Autocorrelação é localizado o pico de maior energia que é considerada a frequência fundamental do sinal, no resultado do algoritmo FFT são encontrados os cinco picos com maiores energias, sendo eles considerados a frequência fundamental e suas quatro primeiras harmônicas. Os dados de cada evento de passagem analisado foram armazenados em um arquivo csv e realizada a análise estatística dos dados. Os métodos estatísticos aplicados foram baseados em RUNGER (2009), sendo utilizado o software R Core Team (2018) para a sua implementação.

Figura 40 – Espectro de frequência do sinal analisado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para as análises realizadas foram obtidas as seguintes medidas descritivas estatística:

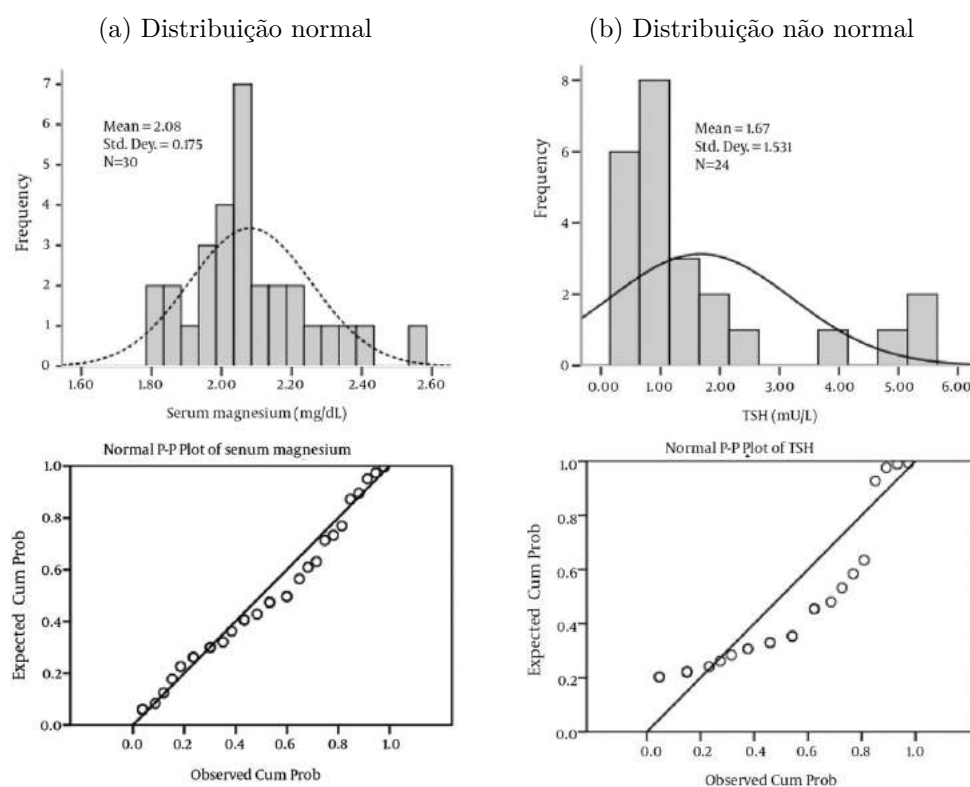
- Média Amostral ($\bar{X}$): Uma medida de tendência central, que determina o valor central da amostra, levando em consideração todos os valores presentes na amostra;
- Erro Padrão (S_x): Determinar o quanto a média amostral está distante da verdadeira média populacional, com um índice de confiança e 95 %;
- Desvio Padrão (S e $S(\%)$): Expressa a dispersão dos dados da amostra em relação a média. Considerando uma distribuição normal, existe uma probabilidade de 63,2 % que um novo dado esteja no intervalo de um desvio padrão a esquerda até um desvio padrão a direita.
- Coeficiente de curtose (K): Caracteriza o achatamento da curva construída pela distribuição dos dados da amostra. De acordo com o valor da curtose, as distribuições serão classificadas em mesocúrtica (segue a curva normal; $= 0$), leptocúrtica (pontuda, com o centro acima da normal; > 0) e platicúrtica (bem mais achatada que uma curva normal; < 0);
- Coeficiente de assimetria (As): Indica o quanto uma distribuição não é simétrica, em comparação a uma distribuição normal;
- Intervalo (H): Representa a diferença entre o maior e o menor valor existente no conjunto de dados em questão;

- Mínimo (*Min*): Apresenta o menor valor presente no conjunto de dados;
- Máximo (*Max*): Apresenta o maior valor presente no conjunto de dados.

Com relação aos dados de frequência foram analisados à frequência fundamental pela Autocorrelação, frequências fundamental ao 5º harmônico pela FFT e as diferenças entre a frequência fundamental pela FFT e as frequências do 2º ao 5º harmônicos pela FFT. Nos dados de energia foram analisados energia das frequências fundamental ao 5º harmônico pela FFT, as relações entre a energia da frequência fundamental pela energia do 2º ao 5º harmônicos e as relações entre as energias de harmônicos subsequentes.

Para verificar a normalidade da análise estatística realizada foi utilizado o proposto por Ghasemi e Zahediasl (2012), sendo realizada a avaliação gráfica utilizando o *boxplot*, distribuição de frequência (histograma) e o gráfico P-P (probabilidade-probabilidade) (Figura 41).

Figura 41 – Exemplo de avaliação gráfica de normalidade de análise estatística.



Fonte: Extraído de Ghasemi e Zahediasl (2012).

O *boxplot* apresenta a mediana como uma linha horizontal no interior da caixa e o intervalo interquartil (1º quartil ao 3º quartil) como o comprimento da caixa. Os bigodes (linha que se estende da parte superior e inferior da caixa)

representam os valores mínimo e máximo quando estão dentro de 1,5 vezes o intervalo interquartílico de cada extremidade da caixa. Valores maiores do que 1,5 vezes o intervalo interquartílico estão fora do *boxplot* e são consideradas *outliers*, e aquelas com mais de 3 vezes o intervalo interquartílico são *outliers* extremos. Um *boxplot* que é simétrico com a linha mediana aproximadamente no centro da caixa e com bigodes simétricos que são ligeiramente mais longos do que as subseções da caixa central sugere que os dados podem ter vindo de uma distribuição normal. A distribuição de frequência (histograma) que plota os valores observados em relação à sua frequência, fornece tanto um julgamento visual sobre se a distribuição é em forma de sino quanto visualização sobre lacunas nos dados e valores *outliers*. O gráfico P-P plota a probabilidade acumulada de uma variável em relação à probabilidade cumulativa de uma distribuição particular (por exemplo, distribuição normal). Após os dados serem posto ordenados (*ranks*), o correspondente z-score é calculado para cada *rank* da seguinte forma:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (3.14)$$

onde x_i , $\bar{x}$ e S representam, respectivamente, amostra, média amostras e o desvio-padrão. Esse é o valor esperado que a pontuação deve ter em uma distribuição normal. As pontuações são então convertidas em z-scores. Os z-scores reais são plotados em relação aos z-scores esperados. Se os dados são normalmente distribuídos, o resultado seria uma linha diagonal reta. Para complementar a avaliação gráfica da normalidade foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, onde obtendo como resposta um valor $p > 0,05$ a distribuição pode ser considerada normal.

Nos dados que podem serem representados por uma distribuição normal e devido ao tamanho das amostras foi utilizada a distribuição T-Student para a obtenção do intervalo de confiança da média populacional, sendo considerado um nível de confiança de 95%. Assim, o intervalo de confiança da média populacional é dado por

$$IC(\mu) = \bar{X} \pm T.S_x \quad (3.15)$$

onde $IC(\mu)$ é a media populacional com o intervalo de confiança, $\bar{X}$ é média amostral, S_x é o erro padrão e T é o valor de correção obtido pela distribuição T-Student.

Para avaliar a probabilidade de erros de identificação entre as moscas-das-frutas utilizando as características extraídas do sinal de batimento de asas capturado foi utilizado o valor da probabilidade acumulada para uma distribuição normal, (Equação 3.16), com base na intersecção das curvas das características avaliadas dos insetos.

$$Pr(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3.16)$$

onde x_1 e x_2 representam o intervalo de cálculo da probabilidade acumulada, x o conjunto de amostras integrado, σ o desvio-padrão populacional e μ a média populacional.

4 Resultados e discussão

Inicialmente são apresentados os resultados dos experimentos de avaliação do sensor onde são expostos a caracterização do ruído no sensor com suas fontes e o desempenho do sensor perante a estímulos controlados. Após são apresentados os resultados obtidos com os experimentos de medição de sinais de moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*, onde o sinal do batimento das asas dos insetos são caracterizados em termos de sua frequência fundamental e relações harmônicas, sendo realizada a comparação entre os dados obtidos para as moscas-das-frutas estudadas. Por fim é apresentado o resumo do *dataset* obtido com os experimentos realizados com as moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata* e realizada uma discussão sobre os resultados obtidos.

4.1 Avaliação do sensor optoeletrônico

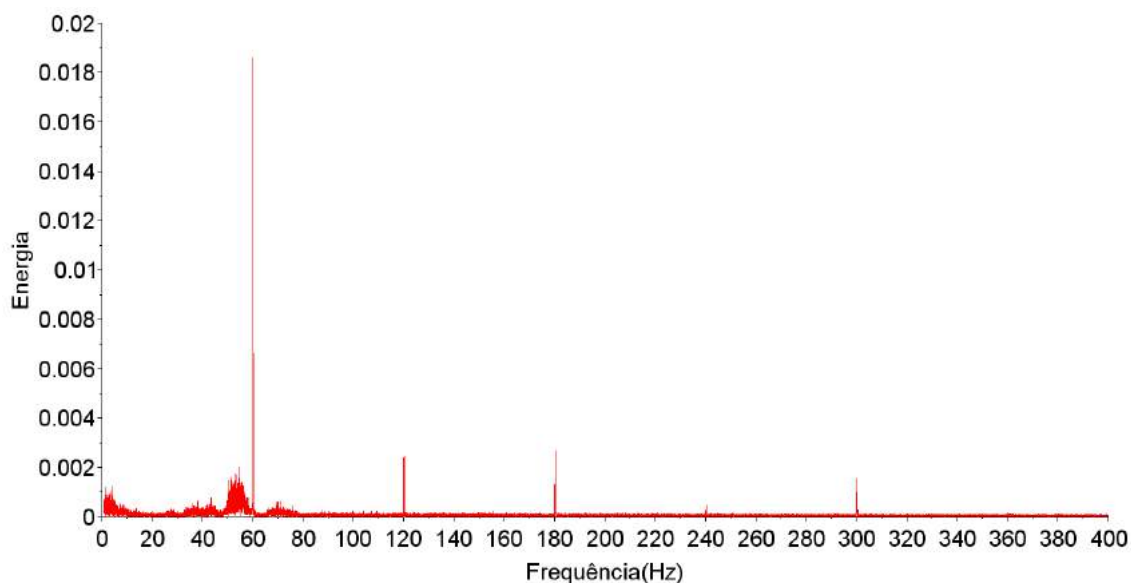
Os resultados dos experimentos realizados tiveram como objetivo verificar a possibilidade de uso do sensor optoeletrônico em uma armadilha inteligente com detecção optoeletrônica em tempo real de insetos. Para isto foram avaliados o ruído do sistema, a diferença de desempenho entre as configurações das matrizes do receptor e do sensor e a capacidade de captar diferentes frequências de oscilação na luz, ocasionadas pelo simulador de batimento de asas desenvolvido.

Inicialmente foi avaliado o desempenho do sensor em relação a diversas fontes de ruído. No primeiro experimento o sensor foi ligado com a matriz do emissor e do receptor completa, com a luz do laboratório sobre o sensor e sem a utilização do dispositivo para simulação do batimento de asas. A Figura 42 apresenta o espectro de frequência do sinal captado pelo sensor, onde nota-se que a frequência preponderante é de 60 Hz com suas harmônicas, tendo uma energia normalizada de 0,019.

Após foi realizado o mesmo experimento sem a luz ambiente do laboratório, sendo a única luz incidente no sensor a gerada pelo emissor. A Figura 43 apresenta o espectro de frequência do sinal captado pelo sensor, nota-se que a frequência preponderante é de 60 Hz com suas harmônicas, tendo uma energia normalizada de 0,018.

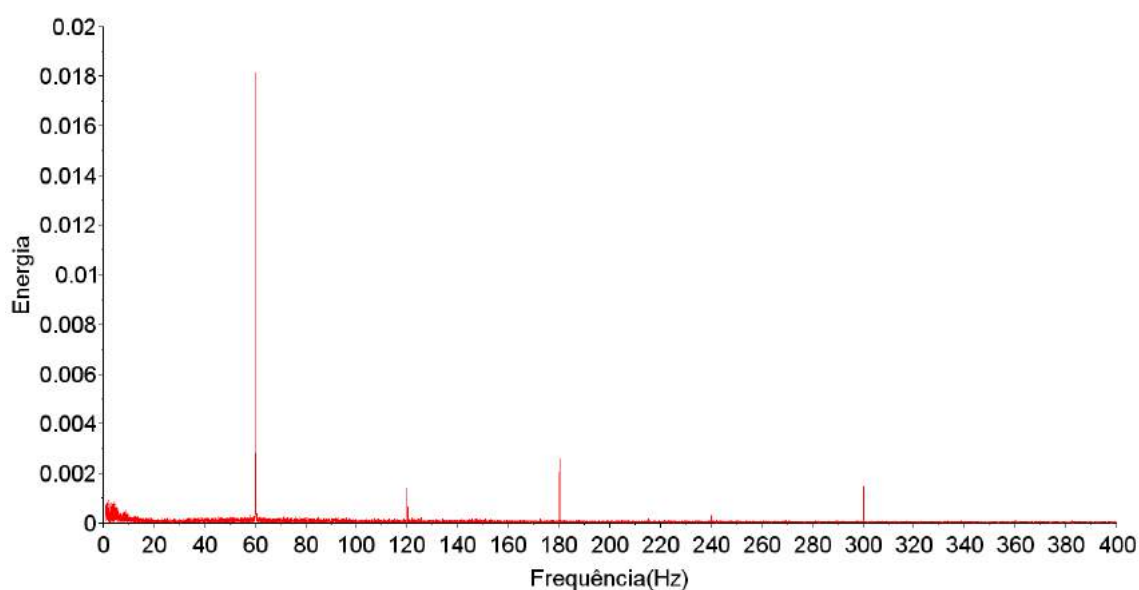
Foi avaliado também o ruído gerado pelo emissor no sensor. Para isto, o emissor foi desligado e realizada a captura do sinal com a luz ambiente e sem o dispositivo simulador do batimento de asas. A Figura 44 apresenta o espectro de frequência do sinal captado pelo sensor, nota-se que a frequência preponderante é de

Figura 42 – Espectro frequência - sensor normal, sem excitação do simulador.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 43 – Espectro frequência - sensor normal, sem luz ambiente, sem excitação do simulador.

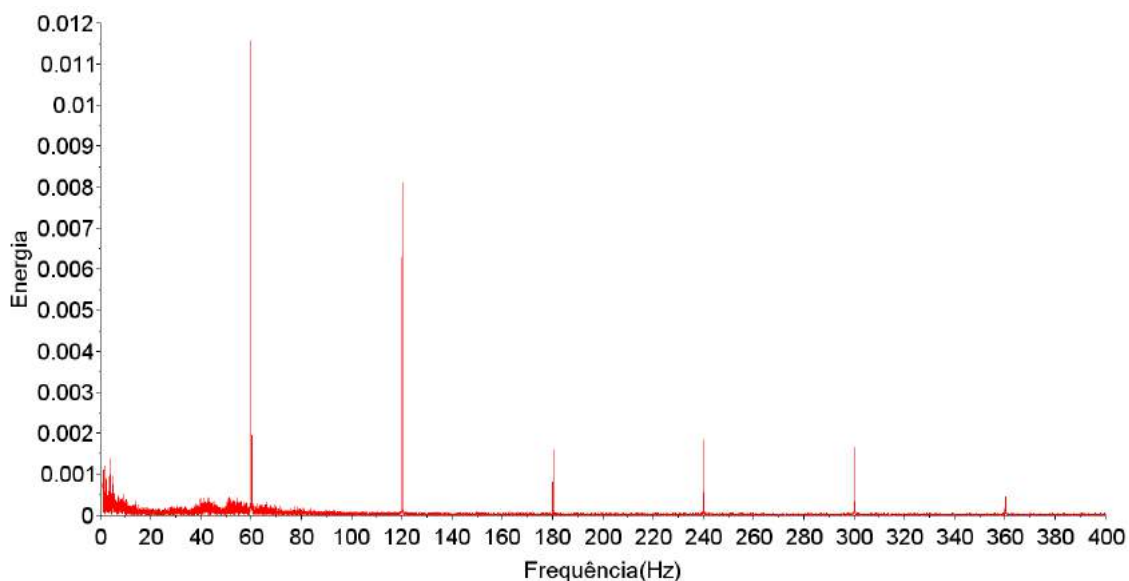


Fonte: Elaborado pelo Autor.

60 Hz com suas harmônicas, tendo uma energia normalizada de 0,012.

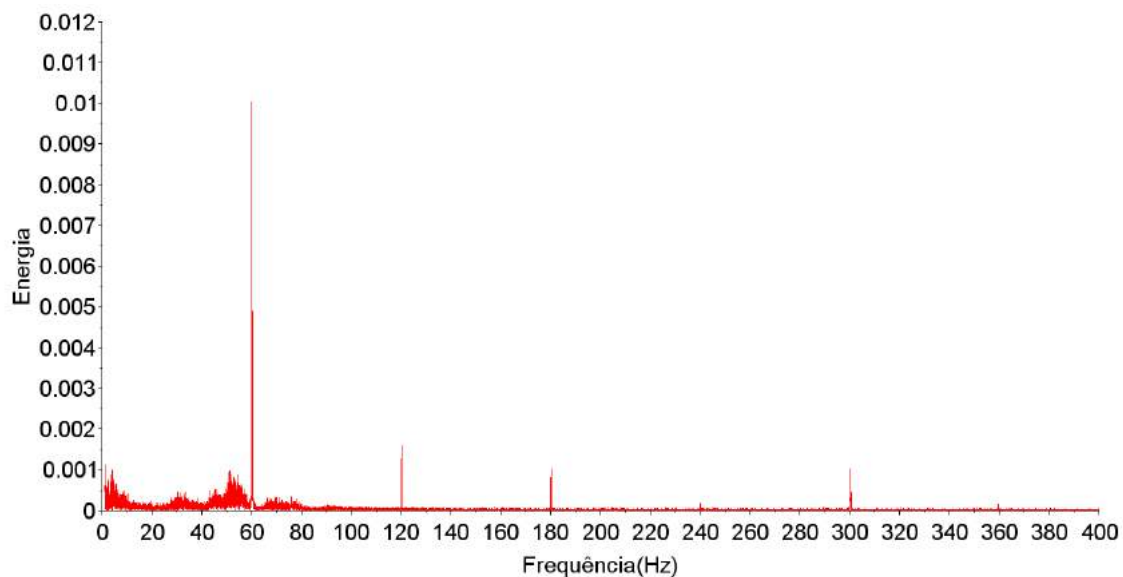
No próximo experimento o emissor e a luz ambiente do laboratório foram desligadas. A Figura 45 apresenta o espectro de frequência do sinal captado pelo sensor, nota-se que a frequência preponderante é de 60 Hz com suas harmônicas, tendo uma energia normalizada de 0,01.

Figura 44 – Espectro frequência - sensor com emissor desligado, sem excitação do simulador.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 45 – Espectro frequência - sensor com emissor desligado, sem luz ambiente, sem excitação do simulador.

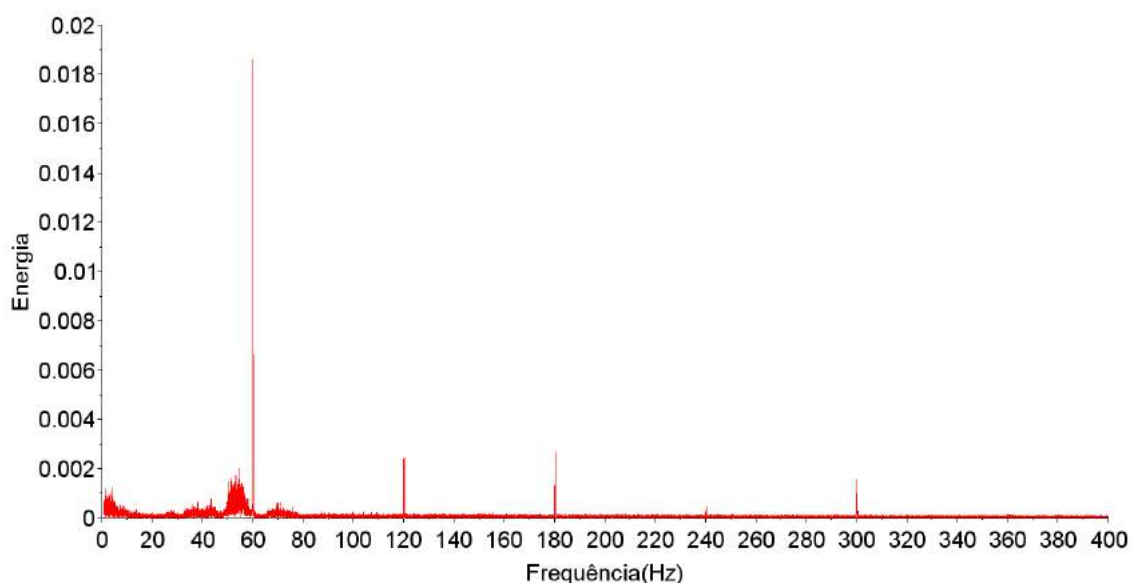


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, foi avaliada a influência que a vibração do motor do dispositivo de simulação de batimento de asas exerce sobre o sinal captado. Para isto, o simulador foi ligado com uma tensão de alimentação de 12 V e fixado sobre o sensor sem que exerça influência sobre a luz incidente no receptor. A Figura 46 apresenta o espectro de frequência do sinal captado pelo sensor, nota-se que a frequência preponderante é

de 60 Hz com suas harmônicas, tendo uma energia normalizada de 0,019.

Figura 46 – Espectro frequência - sensor normal, com o simulador sobre o sensor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

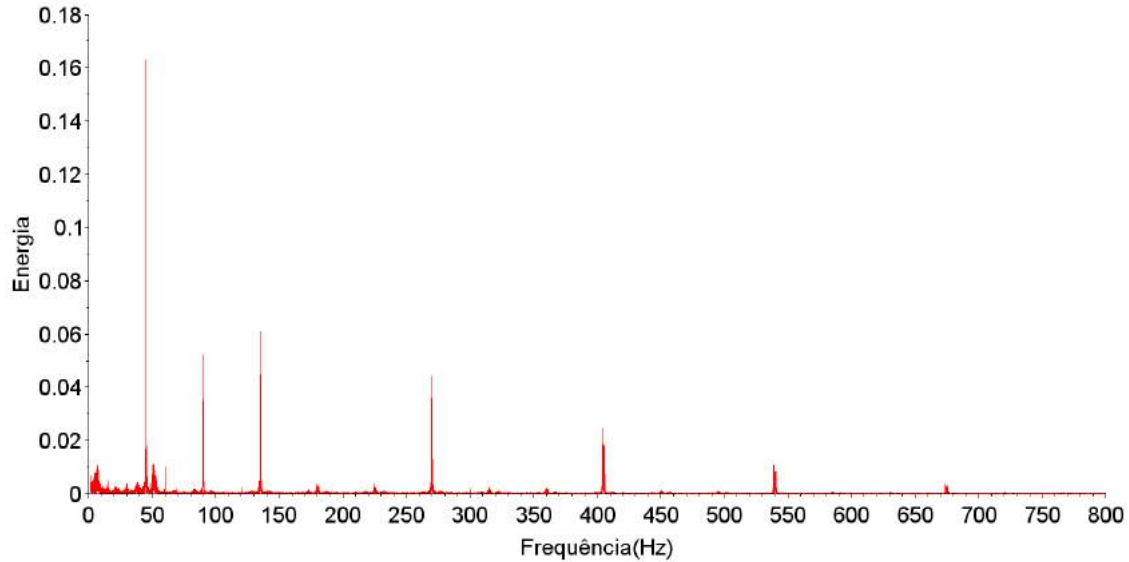
Com base nos experimentos realizados, ficou constatado que o ruído de maior influência é de 60 Hz gerado pela interferência eletromagnética da rede elétrica. Sendo a maior parte o gerada no emissor, sendo pequena a influência da luz ambiente do laboratório. Também notou-se que a vibração causada pelo motor do dispositivo de simulação de batimento de asas não é uma fonte considerável de ruído, não influenciando nas medições realizadas.

Foram realizados experimentos para avaliar o desempenho do sensor quando modificada a quantidade de linhas das matrizes do emissor e do receptor. Para isto, o sensor foi mantido sobre as mesmas condições de iluminação do ambiente durante a execução dos experimento e o simulador de batimento das asas foi alimentado com uma tensão constante de 12V, mantendo sempre a mesma rotação. Sendo alteradas as configurações das linhas do emissor e do receptor e o sinal gerado capturado.

Inicialmente, o sensor foi configurado tendo as quatro linhas do emissor e do receptor ativadas. Nota-se no espectro de frequência do sinal capturado (Figura 47) o surgimento de um ruído gerado em 45 Hz com energia normalizada de 0,16 com seu primeiro harmônico em 90 Hz com energia normalizada de 0,051 e o ruído gerado pela frequência de 60 Hz teve uma energia normalizada de 0,009. O sinal gerado pelo simulador tem sua frequência fundamental em 135 Hz com energia normalizada de 0,06 com harmônicas em 270 Hz-0,044, 405 Hz-0,025, 539 Hz-0,011 e 673 Hz-0,004. Considerando a frequência de 60 Hz e a frequência fundamental do sinal de interesse

(135 Hz), esta configuração teve uma $D_{60Hz} = \frac{0,06}{0,009} = 6,66$ e considerando o ruído na frequência de 45 Hz obteve-se $D_{45Hz} = \frac{0,06}{0,16} = 0,375$.

Figura 47 – Espectro frequência - sensor com quatro linhas no emissor e no receptor, simulador com 12 V.

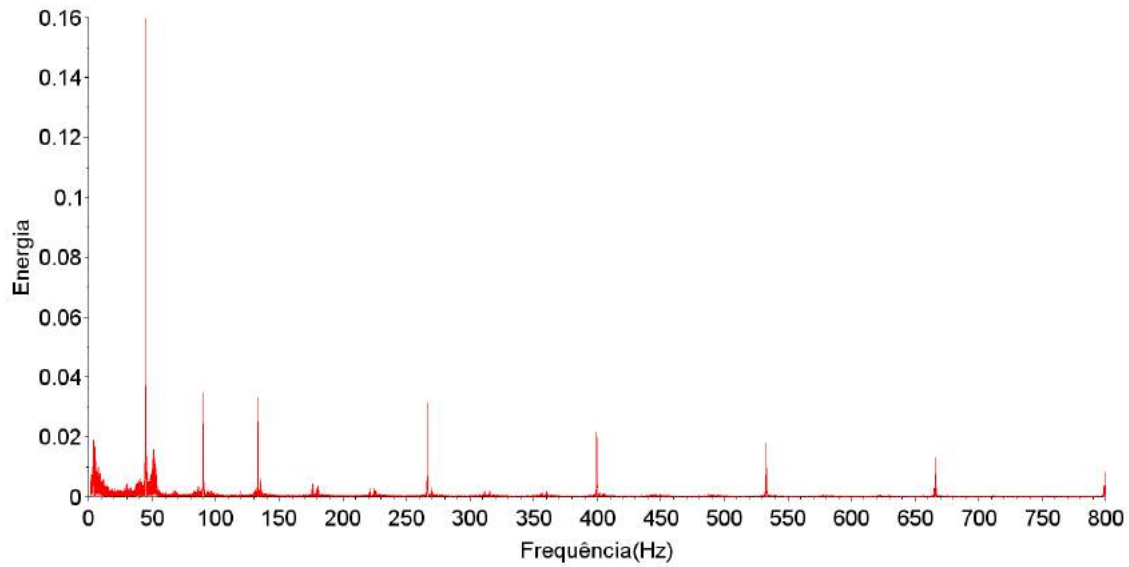


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após o sensor foi configurado tendo as quatro linhas do emissor ativadas e apenas uma linha do receptor ativa. Nota-se no espectro de frequência do sinal capturado (Figura 48) que o ruído gerado em 45 Hz manteve sua energia normalizada de 0,16 com seu primeiro harmônico em 90 Hz com energia normalizada de 0,034 e o ruído gerado pela frequência de 60 Hz teve uma energia normalizada de 0,014. O sinal gerado pelo simulador tem sua frequência fundamental em 133 Hz com energia normalizada de 0,031 com harmônicas em 266 Hz-0,031, 400 Hz-0,022, 532 Hz-0,018 e 666 Hz-0,013. Considerando a frequência de 60 Hz e a frequência fundamental do sinal de interesse (133 Hz), esta configuração teve uma $D_{60Hz} = \frac{0,031}{0,014} = 2,21$ e considerando o ruído na frequência de 45 Hz obteve-se $D_{45Hz} = \frac{0,031}{0,16} = 0,19$. Sendo observado que houve uma degradação no rendimento do sensor com a diminuição do número de linhas do receptor.

Avaliando os experimentos anteriores o receptor foi configurado para ter quatro linhas e o emissor configurado para uma linha. Neste caso, no espectro de frequência do sinal capturado (Figura 49) o ruído gerado em 45 Hz teve sua energia normalizada reduzida para 0,024 com seu primeiro harmônico em 90 Hz com energia normalizada de 0,008 e o ruído gerado pela frequência de 60 Hz teve uma energia normalizada de 0,003. O sinal gerado pelo simulador tem sua frequência fundamental em 134 Hz com uma energia normalizada de 0,13 com harmônicas em 269 Hz-0,066,

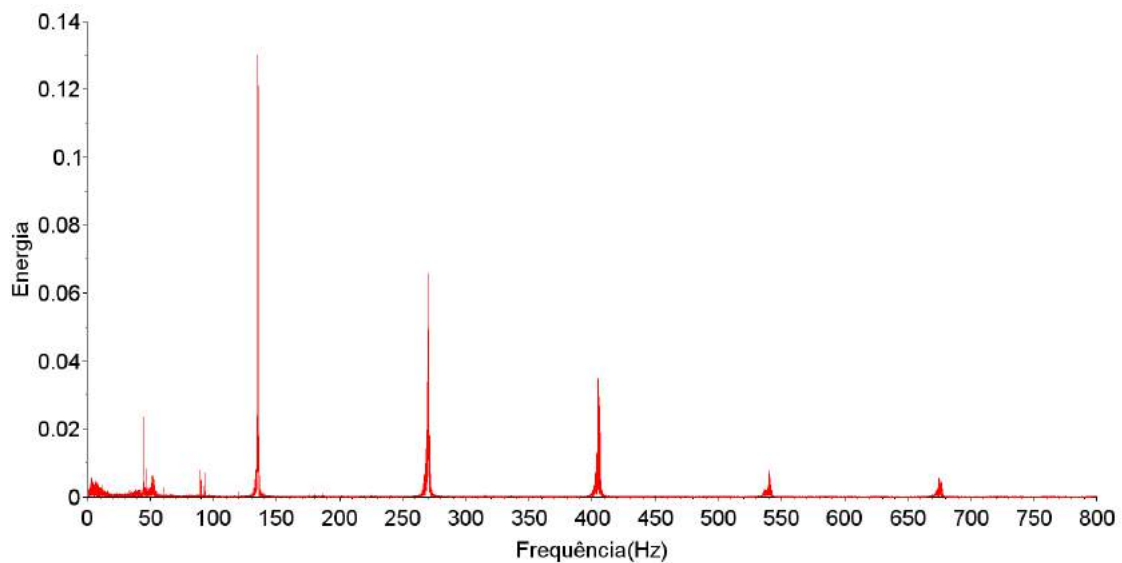
Figura 48 – Espectro frequência - sensor com quatro linhas no emissor e uma linha no receptor, simulador com 12V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

405 Hz-0,035, 539 Hz-0,008 e 674 Hz-0,006. Considerando a frequência de 60 Hz e a frequência fundamental do sinal de interesse (134 Hz), esta configuração teve uma $D_{60Hz} = \frac{0,13}{0,003} = 43,33$ e considerando o ruído na frequência de 45 Hz obteve-se $D_{45Hz} = \frac{0,13}{0,024} = 5,41$.

Figura 49 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 12V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os experimentos para avaliação das possíveis configurações das matrizes do

emissor e do receptor apresentaram os seguintes resultados:

- Quatro linhas no receptor e quatro linhas no emissor: $D_{60Hz} = 6,66$ e $D_{45Hz} = 0,375$;
- Uma linha no receptor e quatro linhas no emissor: $D_{60Hz} = 2,21$ e $D_{45Hz} = 0,19$;
- Quatro linhas no receptor e uma linha no emissor: $D_{60Hz} = 43,33$ e $D_{45Hz} = 5,41$.

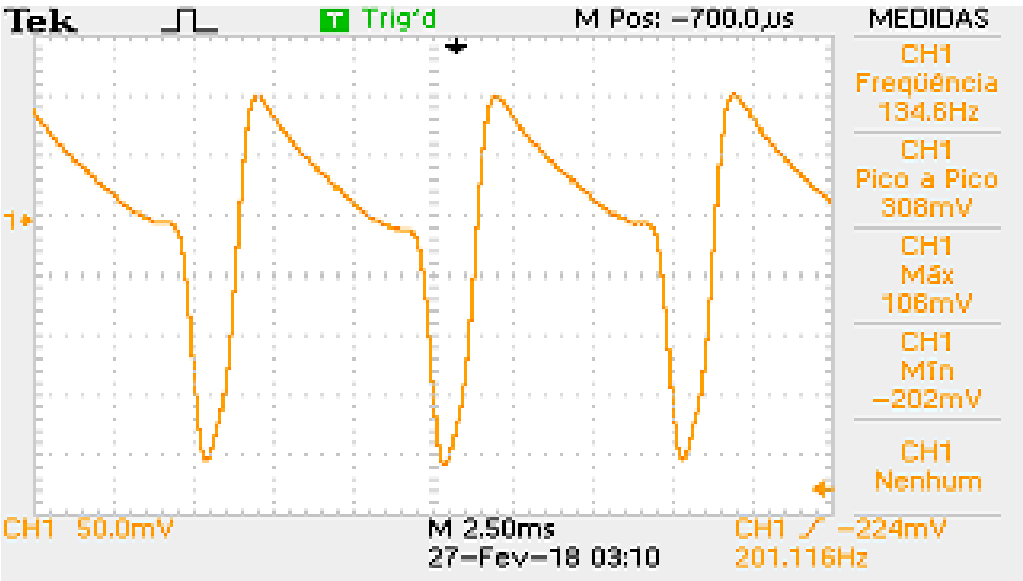
Baseado nos resultados ficou constatado que a melhor configuração para a matriz do emissor é com uma linha e que o aumento de linhas tem influência direta no ruído gerado em 45 Hz e com a diminuição de linhas houve uma diminuição do ruído em 60 Hz como já havia sido constatado nos experimentos para a avaliação do ruído. Observou-se que o ruído de 45 Hz surgiu devido a sobreposição de sinal ocasionada por múltiplas fontes de luz. Em relação ao receptor constatou-se que a melhor configuração é com quatro linhas e que o número de linhas tem influência direta na intensidade do sinal de interesse.

Nos experimentos para verificar o sinal medido pelo sensor foi realizada a comparação entre o valor medido no tacômetro acoplado ao simulador de batimento de asas, a frequência do sinal medido utilizando o osciloscópio na saída do amplificador de sinal e a frequência fundamental obtida no sistema computadorizado. O sensor foi configurado para uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, a tensão de alimentação do simulador foi regulada até que fosse obtido 8000 rpm (133,33 Hz) na leitura do tacômetro. O sinal medido no osciloscópio é apresentado na Figura 50, nota-se que a frequência medida é de 134,6 Hz tendo uma diferença de 0,95% do valor medido com o tacômetro. No gráfico do espectro do sinal capturado (Figura 51) nota-se que a frequência medida é de 134,96 Hz tendo uma diferença de 1,22% do valor medido com o tacômetro e uma diferença de 0,26% do valor medido com o osciloscópio. Assim foi verificado que os valores medidos com o sensor estão coerentes com os valores gerados com simulador de batimento de asas.

Para avaliar o desempenho do sensor a diferentes frequências de batimento das asas dos insetos, o sensor foi configurado com uma linha na matriz do emissor e quatro linhas no receptor e a rotação do simulador de batimento de asas de insetos foi variada alterando a alimentação sobre o motor.

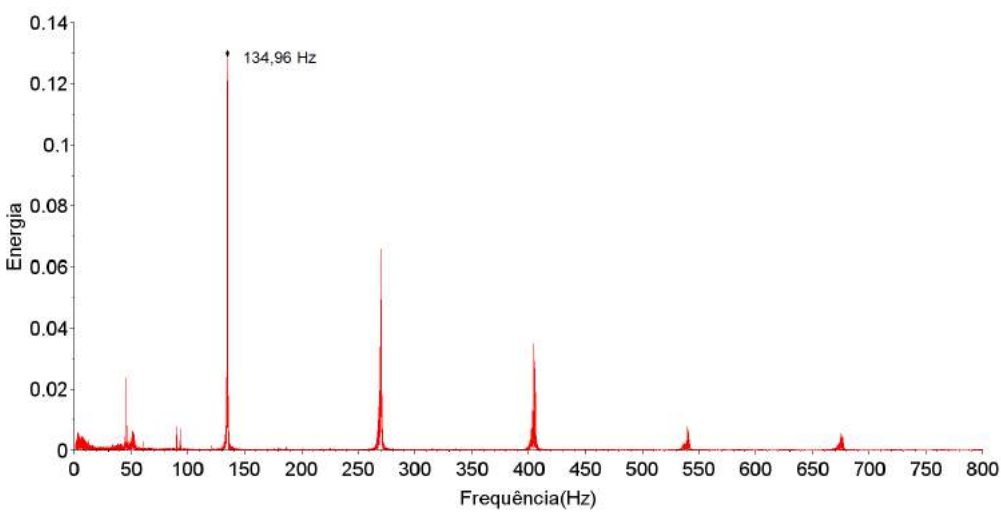
No primeiro experimento o simulador foi alimentado com uma tensão de 16 V e o espectro de frequência do sinal capturado é apresentado na Figura 52. Nota-se que a frequência fundamental do sinal foi de 177 Hz com uma energia normalizada de 0,106 e suas harmônicas até a quinta foram de 354 Hz-0,062, 532 Hz-0,021, 710 Hz-0,004 e 886 Hz-0,004.

Figura 50 – Sinal medido com o osciloscópio no experimento de verificação do sinal medido pelo sensor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 51 – Espectro frequência - experimento de verificação do sinal medido pelo sensor.

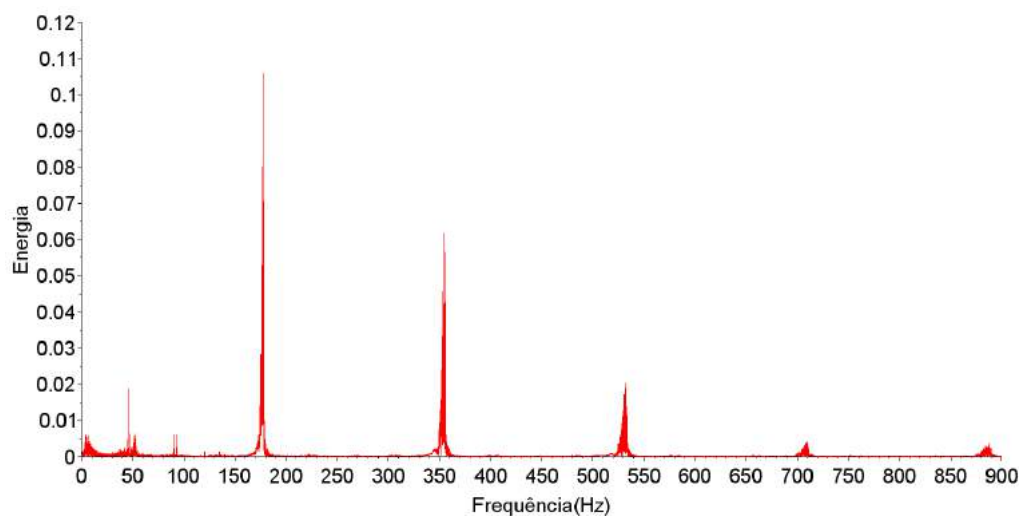


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após o simulador foi alimentado com uma tensão de 8 V e o espectro de frequência do sinal capturado é apresentado na Figura 53. Nota-se que a frequência fundamental do sinal foi de 93 Hz com energia normalizada de 0,258 e suas harmônicas até a quinta foram de 186 Hz-0,167, 280 Hz-0,091, 373 Hz-0,026 e 467 Hz-0,005.

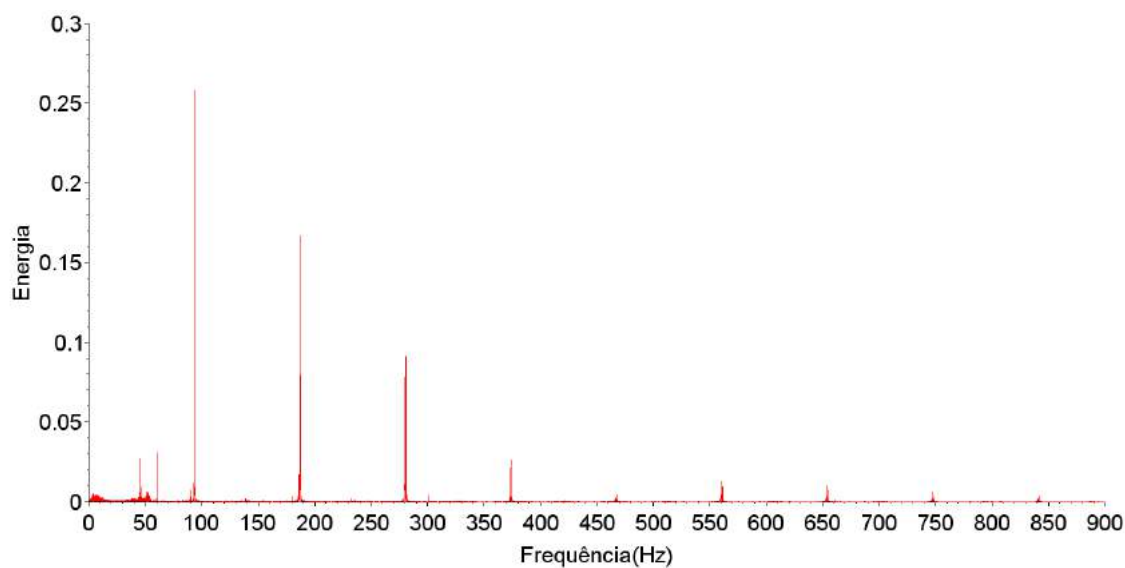
Por fim, o simulador foi alimentado com uma tensão de 4 V e o espectro de frequência do sinal capturado é apresentado na Figura 54. Nota-se que a frequência fundamental do sinal foi de 46 Hz com energia normalizada de 0,107 e suas harmônicas

Figura 52 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 16 V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 53 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 8 V.



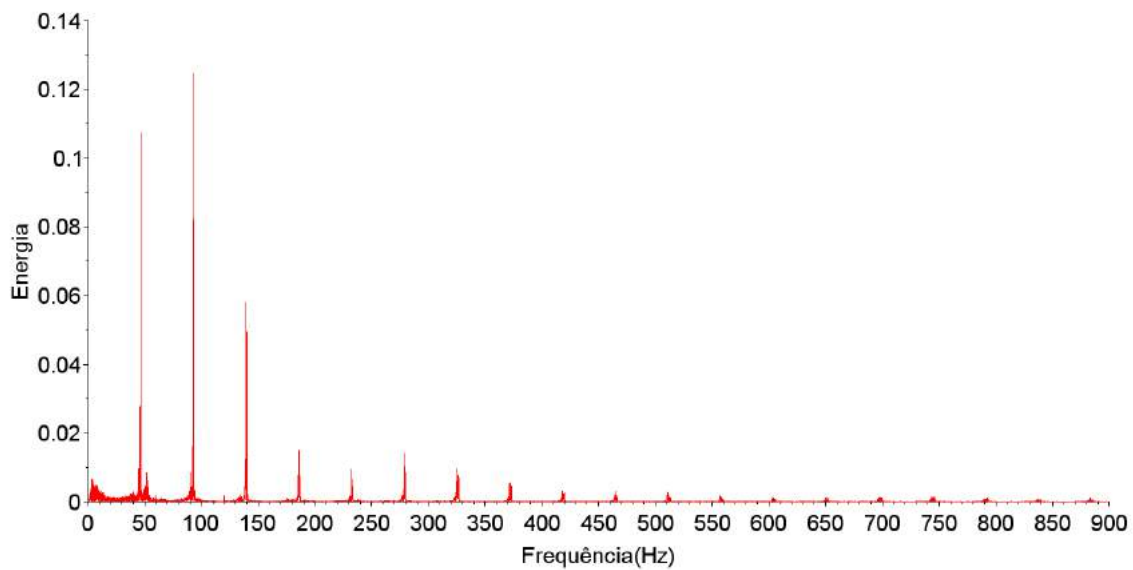
Fonte: Elaborado pelo Autor.

até a quinta foram de 93 Hz-0,125, 139 Hz-0,058, 185 Hz-0,015 e 232 Hz-0,009.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados obtidos nos experimentos com a variação da frequência do simulador e o resultado obtido no experimento apresentado na Figura 48, que corresponde ao espectro de frequência com o simulador com 12 V.

Comparando-se os resultados das frequências fundamentais obtidas no experimento com os valores medidos com o uso do osciloscópio obteve-se, respectivamente,

Figura 54 – Espectro frequência - sensor com uma linha no emissor e quatro linhas no receptor, simulador com 4 V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 6 – Resumo dos resultados obtidos no sensor optoeletrônico com os experimentos da variação da frequência do simulador.

	16V		12V		8V		4V	
	Freq.	Energ.	Freq.	Energ.	Freq.	Energ.	Freq.	Energ.
f ₁	177Hz	0,106V	134Hz	0,13V	93Hz	0,258V	46Hz	0,107V
f ₂	354Hz	0,062V	269Hz	0,066V	186Hz	0,167V	93Hz	0,125V
f ₃	532Hz	0,021V	405Hz	0,035V	280Hz	0,091V	139Hz	0,058V
f ₄	710Hz	0,004V	539Hz	0,008V	373Hz	0,026V	185Hz	0,015V
f ₅	886Hz	0,004V	674Hz	0,006V	467Hz	0,005V	232Hz	0,009V

Fonte – Elaborado pelo autor.

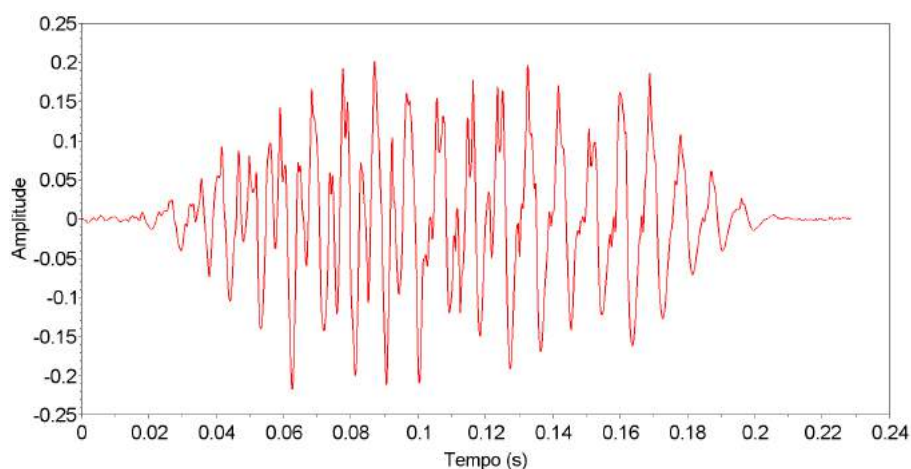
177 Hz e 177,90 Hz com 16 V, 134 Hz e 134,96 Hz com 12 V, 93 Hz e 89,90 Hz com 8 V e 46 Hz e 44,30 Hz com 4 V. Assim, as medições realizadas mostraram-se compatíveis com os valores esperados evidenciando a linearidade e coerência do sensor em relação a frequência da variação de luz a ser medida.

Em relação as harmônicas foi possível medir até a quinta harmônica de todas as frequências de batidas de asas simuladas, com os resultados de frequência e distribuição de energia esperados. Observou-se uma perda de rendimento para a medição na quarta e quinta harmônicas. Esta diminuição do rendimento dos fototransistores para a medição de harmônicas superiores também foi observada por Potamitis, Rigakis e Fysarakis (2015).

4.2 Medição do sinal gerado pelo batimento das asas da *A. fraterculus*

Nos experimentos realizados com a mosca-das-frutas *A. fraterculus* foram gravadas em torno de dezessete horas de sinal, separadas em dezessete faixas de uma hora cada. Após a realização do pré-processamento para a retirada do tempo de silêncio, cada faixa de sinal foi submetido ao algoritmo RMS, sendo localizados 466 eventos de passagem. Os eventos localizados foram separados em um grupo padrão para realização da caracterização do sinal do inseto, sendo selecionados 66 eventos de passagem dos 466 eventos localizados. A Figura 55 apresenta um sinal de evento de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão e a Figura 56 que apresenta um sinal de evento de passagem não rotulado no grupo padrão. O sinal de evento não rotulado no grupo padrão teve esta classificação, pois apesar de ter uma duração maior que 100 ms nota-se que no tempo 0,12 s ocorre uma diminuição na intensidade do sinal, isto representa que o inseto não realizou uma passagem direta pelo sensor.

Figura 55 – Sinal de evento de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão.

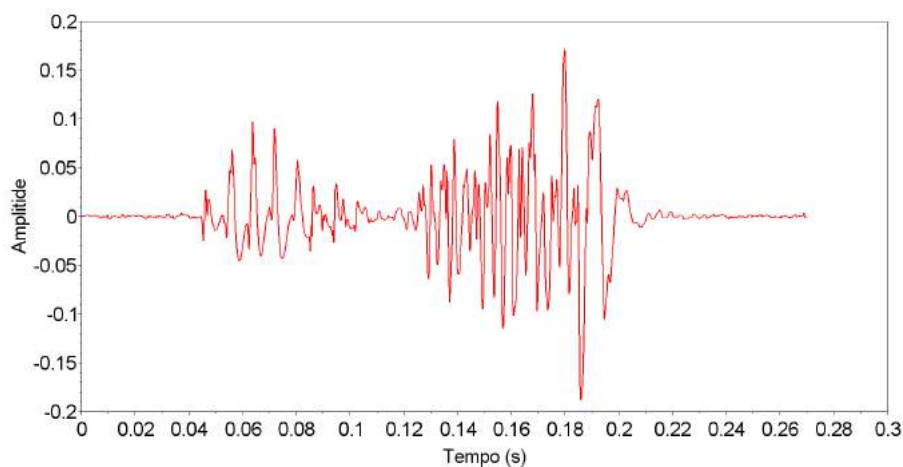


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após os arquivos de sinal do grupo padrão foram submetidos ao *script* do Apêndice A.2 para a extração das características dos sinais. Inicialmente, é aplicada a janela Blackman-Harris ao sinal (Figuras 57 e 58) e após são inseridas amostras com valor zero até o sinal ficar com o tamanho de um segundo (Figura 59).

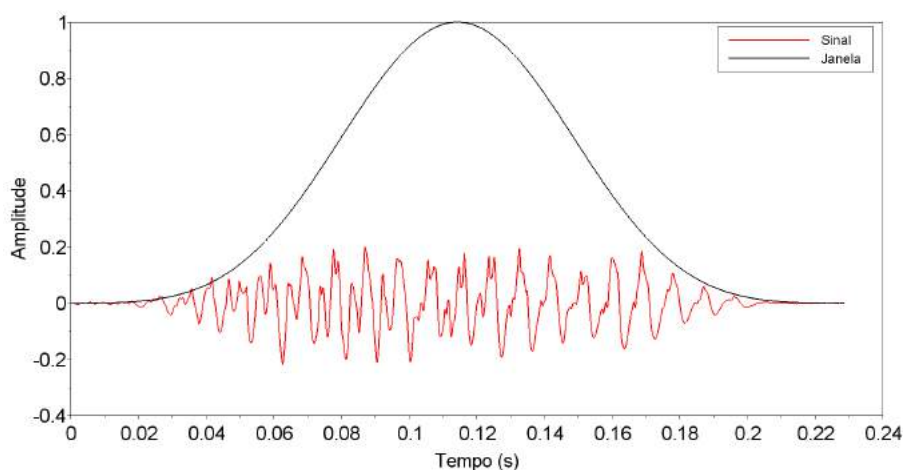
Na sequência é realizada a Autocorrelação e detectado o pico de maior amplitude que é considerada a frequência fundamental do sinal. O gráfico gerado pela Autocorrelação é apresentado na Figura 60. O gráfico possui um fundo de escala de 1 s, mas foi limitado no tempo de 200 ms por não possuir informação relevante após este tempo. Note que saída da Autocorrelação destaca o período fundamental

Figura 56 – Sinal de evento de passagem de *A. fraterculus* não rotulado para o grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 57 – Sinal de evento de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão com a janela Blackman-Harris sobreposta.

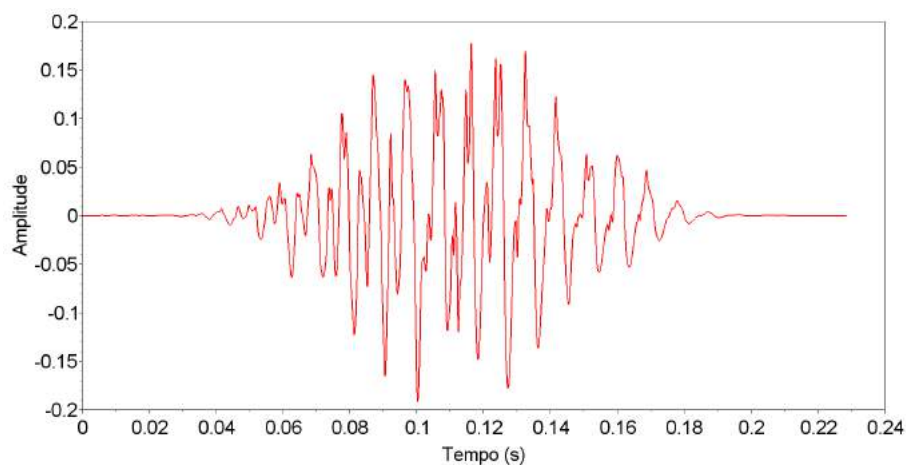


Fonte: Elaborado pelo Autor.

do sinal sendo necessário o cálculo do seu inverso para a obtenção da frequência fundamental. Assim foi obtido o período fundamental de 9,12 ms que corresponde a uma frequência fundamental de 109,65 Hz.

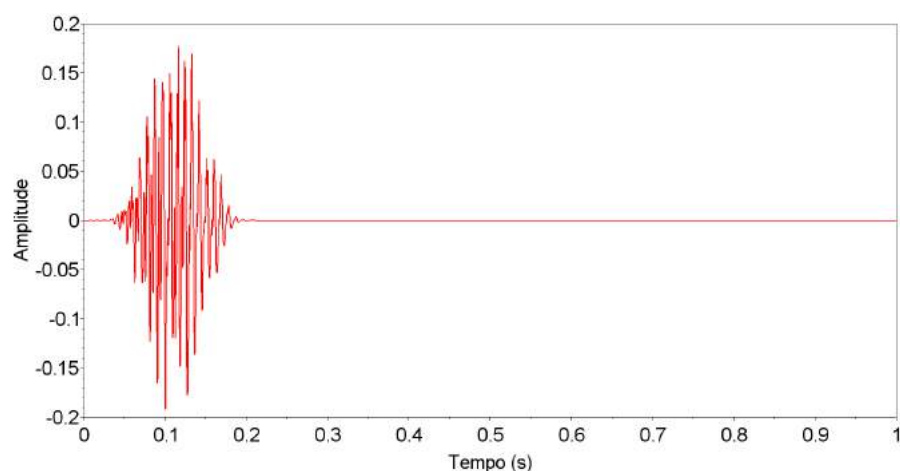
Após é aplicado o algoritmo da FFT e são detectados os cinco maiores picos que correspondem, respectivamente, frequência fundamental, 2º harmônico, 3º harmônico, 4º harmônico e 5º harmônico. O gráfico gerado pela FFT é apresentado na Figura 61. Os valores obtidos com o algoritmo são 110 Hz (frequência fundamental), 218 Hz (2º harmônico), 328 Hz (3º harmônico), 447 Hz (4º harmônico) e 545 Hz (5º harmônico). Observou-se que para o 4º harmônico e 5º harmônico já ocorre uma degradação do sinal que dificulta a detecção correta dos picos correspondentes, como

Figura 58 – Sinal de evento de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão com a janela Blackman-Harris aplicada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 59 – Sinal de evento de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão com a janela Blackman-Harris aplicada e expandido até um segundo.



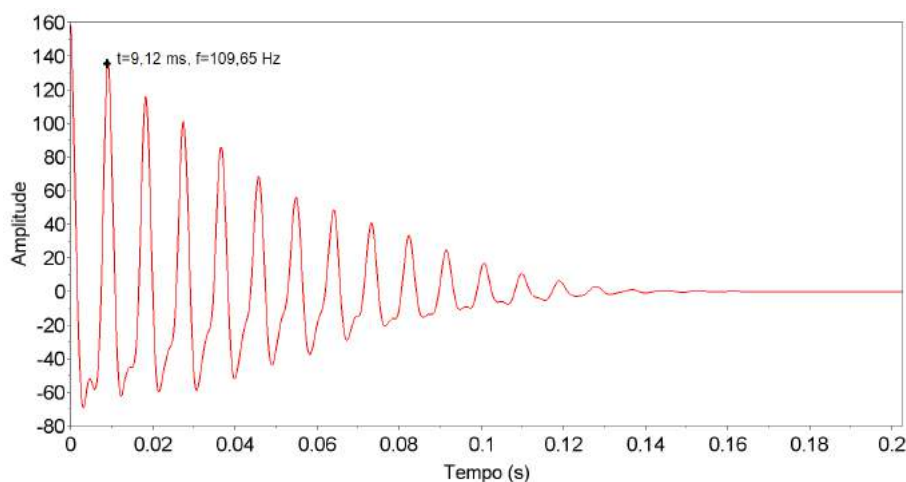
Fonte: Elaborado pelo Autor.

já relatado com os experimentos com o simulador de batimento de asas.

Os dados obtidos com a extração das características dos sinais dos 66 eventos de passagem do grupo padrão da *A. fraterculus* foram armazenados em um arquivo para a realização da sua análise. As medidas descritivas estatística completa da análise dos dados são apresentadas no Apêndice B.1. Nas Tabelas 8 e 9 são apresentadas as medidas descritivas dos dados das amostras completas, nas Tabelas 10 e 11 são apresentadas as medidas descritivas com a remoção de dados *outliers* em cada item analisado, foram considerados dados *outliers* os que estão fora dos limites mínimo e máximo do boxplot.

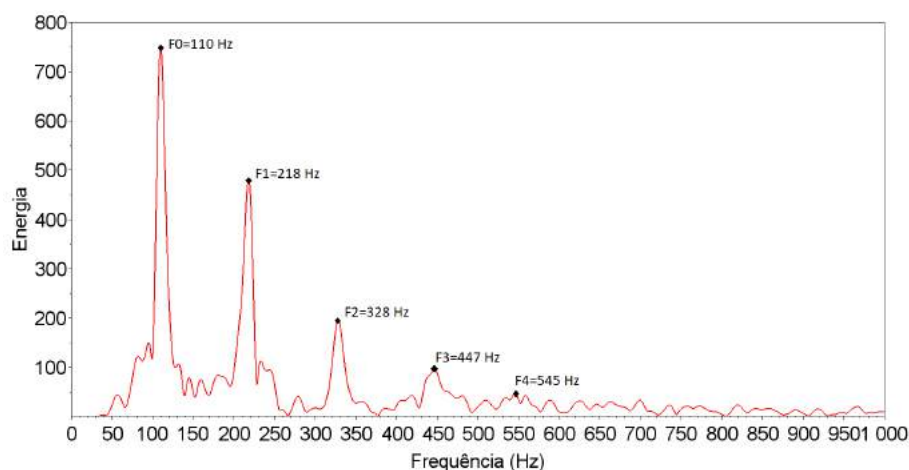
Na análise dos dados completos das amostras (Tabela 8) foi observado que

Figura 60 – Gráfico da Autocorrelação do evento de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 61 – Gráfico da FFT do evento de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

devido a degradação da qualidade do sinal nas harmônicas superiores, como já relatada anteriormente, ocorreu uma dificuldade de localização dos picos correspondentes as suas frequências. Assim não foi possível utilizar os seus dados para a caracterização do sinal, pois apresentam uma grande variação entre os valores mínimos e máximos. Sendo utilizado na análise os dados referentes a frequência fundamental obtida pela Autocorrelação, frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT e a frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT.

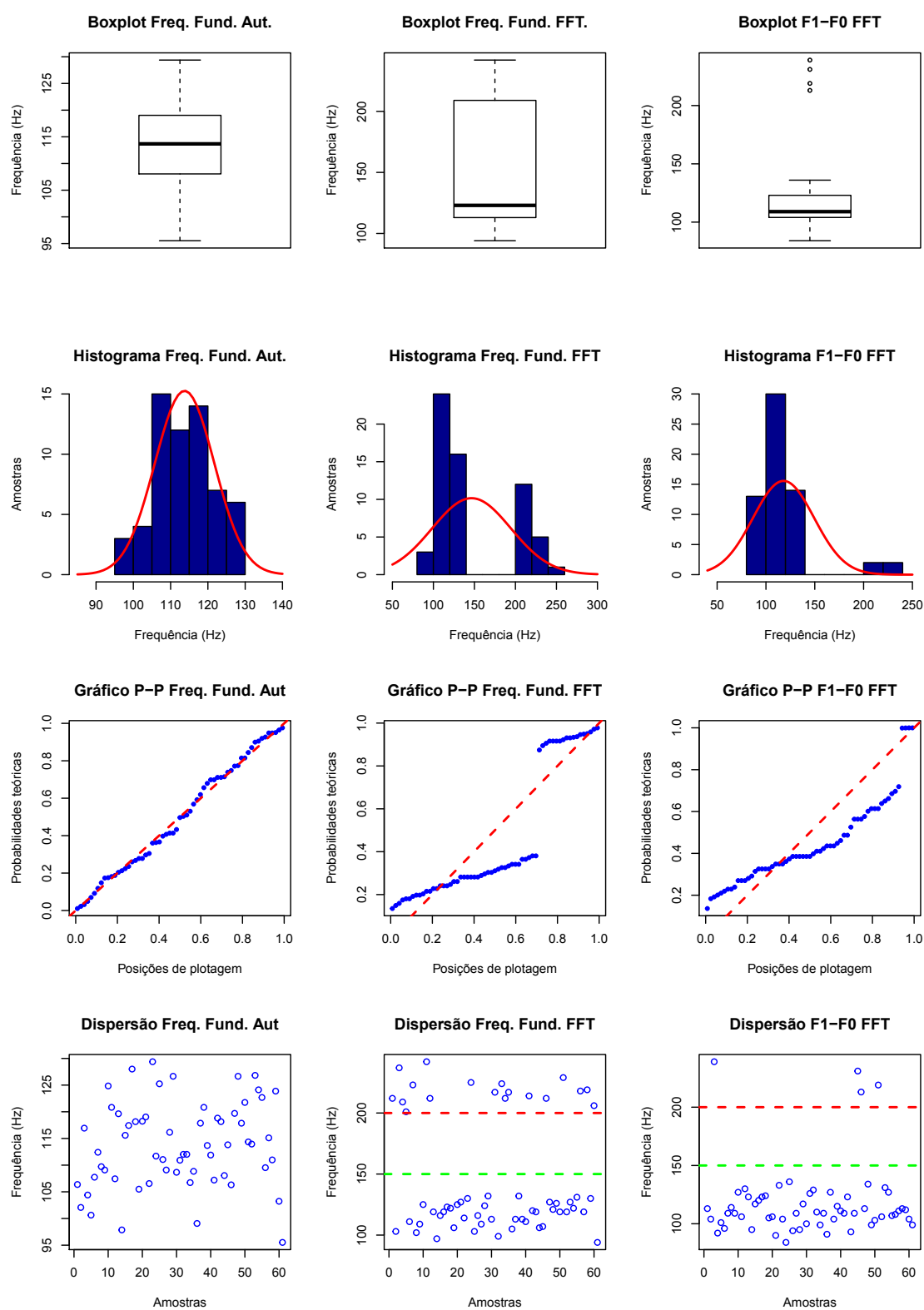
A Figura 62 apresenta a avaliação visual dos dados completos sem remoção de *outliers* referentes a Tabela 8. Cada coluna, da esquerda para a direita, apresentam os dados para as medições da frequência fundamental obtida pela Autocorrelação, frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT e a frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT.

Na primeira linha da Figura 62 são apresentados os gráficos de boxplot, onde na medição da frequência fundamental pela Autocorrelação observa-se uma distribuição simétrica com a linha mediana no centro da caixa, com bigodes simétricos e ligeiramente mais longos que as subseções da caixa e sem dados *outliers*, indicando uma distribuição normal. Nos dados referentes a medição da frequência fundamental obtida diretamente na FFT observa-se uma distribuição assimétrica com a linha mediana próxima a parte inferior da caixa, bigodes assimétricos e curtos, um padrão de distribuição esparsa em relação a média gerando uma caixa longa, não apresentando dados *outliers*, indicando uma distribuição que pode não ser representada por uma normal. Nos dados referentes a medição frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT observa-se uma distribuição assimétrica com a linha mediana próxima a parte inferior da caixa, bigodes ligeiramente assimétricos e ligeiramente mais longos que as subseções da caixa e quatro valores *outliers* acima dos 200 Hz, indicando que esta distribuição pode ser representada por uma normal.

Na segunda linha da Figura 62 são apresentados os histogramas (azul) e curva da distribuição normal (vermelho) sobreposta. Com relação aos dados da primeira coluna observa-se a maior concentração de valores próximo da média, a distribuição sendo praticamente simétrica, com o formato de sino, sem lacunas nos dados e sem dados *outliers*, indicando uma distribuição normal. Na segunda coluna observa-se a média deslocada estando a direita da maioria dos dados, apresentando uma lacuna entre os dados e a esquerda da média uma nova concentração de dados, indicando uma distribuição não normal. Na terceira coluna observa-se uma maior concentração de dados levemente a esquerda da média, possuindo alguns dados *outliers* acima dos 200 Hz, indicando uma distribuição normal.

Na terceira linha da Figura 62 são apresentados os gráficos P-P com a distribuição de probabilidade dos dados da amostra (azul) sobreposta a distribuição de probabilidade de uma curva normal (vermelho). Na primeira coluna observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados tende a seguir a distribuição de probabilidade de uma curva normal, indicando uma distribuição normal. Na segunda coluna observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados não segue

Figura 62 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

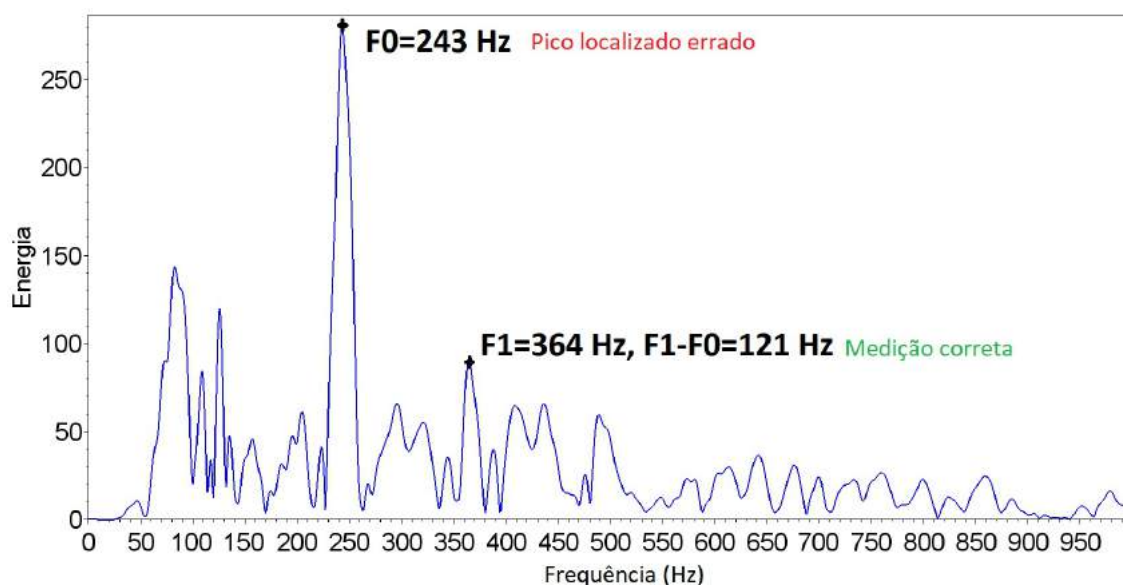
a distribuição de probabilidade de uma curva normal, com uma lacuna entre os dados, indicando um distribuição não normal. Na terceira coluna observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados não segue a distribuição de probabilidade de uma curva normal, com uma lacuna e afastamento para baixo causada pelos dados *outliers*, indicando um distribuição não normal.

Como avaliação complementar foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, sendo obtido para frequência fundamental pela Autocorrelação um valor p de 0,7018 (acima do limite de 0,05 para normalidade), frequência fundamental obtida diretamente na FFT um valor p de $1,589 \cdot 10^{-08}$ (abaixo do limite de 0,05 para normalidade) e frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT um valor p de $9,097 \cdot 10^{-11}$ (abaixo do limite de 0,05 para normalidade). Baseado na avaliação visual e no teste de normalidade Shapiro-Wilk ficou constado que os dados da frequência fundamental obtida pela Autocorrelação podem ser representados por uma distribuição normal, os dados da frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT não podem ser representados por uma distribuição normal e que os dados da frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT não podem ser representados pela distribuição normal.

Com os resultados obtidos com a avaliação de normalidade foi realizada a análise visual da dispersão dos dados (quarta linha da Figura 62), sendo observado na terceira coluna que os dados estão agrupados abaixo 150 Hz (linha verde), com 62 ocorrências e acima dos 200 Hz (linha vermelha), com 4 ocorrências sendo estes dados considerados *outliers* podendo serem retirados do conjunto de dados. Na segunda coluna os dados estão agrupados abaixo 150 Hz (linha verde), com 48 ocorrências e acima dos 200 Hz (linha vermelha), com 18 ocorrências, com base nas análises realizadas nota-se que os dados acima de 200 Hz, apesar de não serem considerados *outliers*, representam um erro na localização do pico correspondente a frequência fundamental da *A. fraterculus* (Figura 63), sendo possível retirá-los do conjunto de dados. A frequência fundamental obtida pela Autocorrelação apresentaram erros de avaliação (Figura 64), sendo que neste caso o valor medido é abaixo do esperado.

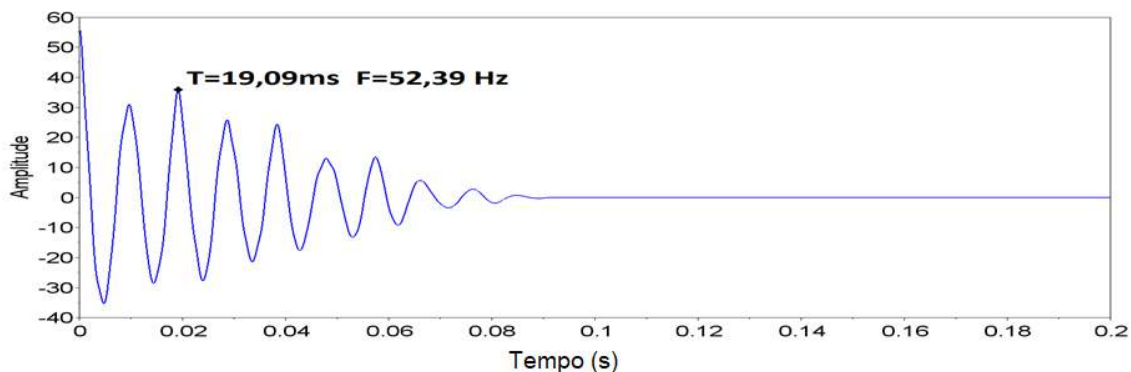
A Figura 65 apresenta a avaliação visual dos dados com remoção de *outliers* referentes a Tabela 10. Cada coluna, da esquerda para a direita, apresentam os dados para as medições da frequência fundamental obtida pela Autocorrelação, frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT e a frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT. Sendo que os resultados para a frequência fundamental obtida pela

Figura 63 – Gráfico da FFT com erro de localização do pico referente a frequência fundamental de *A. fraterculus* do grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 64 – Gráfico da Autocorrelação com erro de localização do pico referente a frequência fundamental de *A. fraterculus* do grupo padrão.

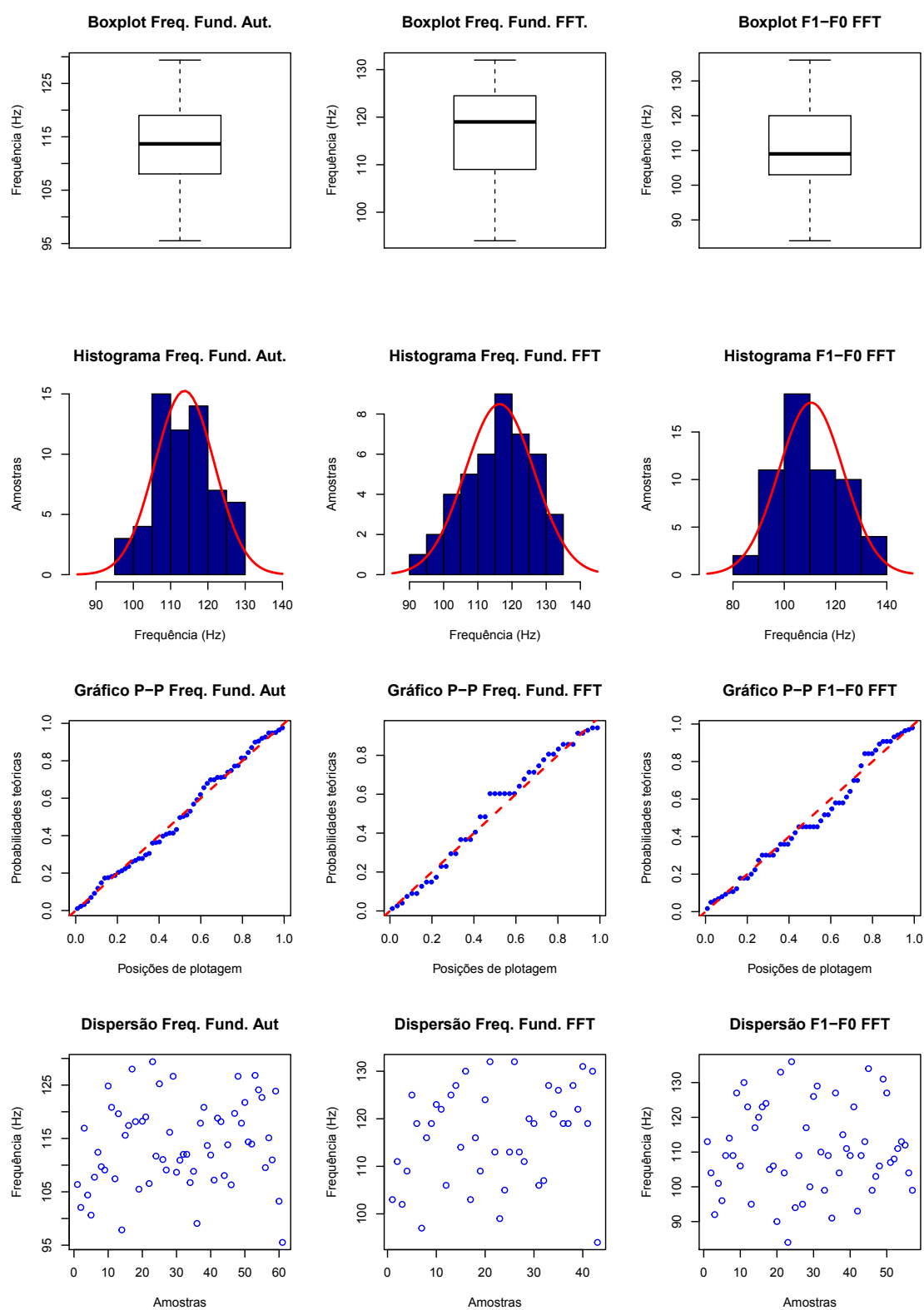


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Autocorrelação são os mesmos do caso anterior, pois não possuíam dados *outliers*, mantidos para comparação com os dados obtidos com a remoção dos *outliers* da frequência fundamental obtida diretamente na FFT e frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT.

Na primeira linha da Figura 65 são apresentados os gráficos de boxplot. Nos dados referentes a medição da frequência fundamental obtida diretamente na FFT (segunda coluna) observa-se uma distribuição levemente assimétrica com a linha mediana próxima a parte superior da caixa, bigodes levemente assimétricos e sem dados *outliers*, indicando que esta distribuição pode ser normal. Nos dados

Figura 65 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de *A. fraterculus* do grupo padrão sem *outliers*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

referentes a medição frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT (terceira coluna) observa-se uma distribuição levemente assimétrica com a linha mediana próxima a parte inferior da caixa, bigodes ligeiramente assimétricos e ligeiramente mais longos que as subseções da caixa e sem dados *outliers*, indicando que esta distribuição pode ser normal. Em relação ao boxplot da frequência fundamental pela Autocorrelação (primeira coluna) o gráfico com maior semelhança é o da terceira coluna, sendo que o da segunda coluna apresenta uma maior dispersão dos dados e com uma média um pouco maior.

Na segunda linha da Figura 65 são apresentados os histogramas (azul) e curva da distribuição normal (vermelho) sobrepostas. Na segunda coluna observa-se a maior concentração de valores próximo da média com uma cauda mais longa à esquerda, com o formato de sino, sem lacunas nos dados e sem dados *outliers*, indicando uma distribuição normal. Na terceira coluna observa-se a maior concentração de valores próximo da média com uma cauda mais longa à direita, com o formato de sino, sem lacunas nos dados e sem dados *outliers*, indicando uma distribuição normal. Em comparação com o histograma da primeira coluna observa-se a similaridade entre suas distribuições, sendo que na segunda e terceira colunas a distribuição é mais esparsa.

Na terceira linha da Figura 65 são apresentados os gráficos P-P com a distribuição de probabilidade dos dados da amostra (azul) sobreposta a distribuição de probabilidade de uma curva normal (vermelha). Nas segunda e terceira colunas observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados tende a seguir a distribuição de probabilidade de uma curva normal, indicando que ambas podem ser representadas por uma distribuição normal.

Como avaliação complementar foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, sendo obtido para frequência fundamental obtida diretamente na FFT um valor p de 0,2211 (acima do limite de 0,05 para normalidade) e frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT um valor p de 0,2857 (acima do limite de 0,05 para normalidade). Baseado na avaliação visual e no teste de normalidade Shapiro-Wilk ficou constatado que os dados da frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT, considerando as detecções erradas como *outliers*, podem ser representados por uma distribuição normal e os dados da frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT, sem os dados *outliers*, podem ser representados pela distribuição normal.

Devido aos tamanhos das amostras (66 para frequência fundamental pela Autocorrelação, 46 para frequência fundamental pela FFT e 62 para a frequência

fundamental pela diferença entre os picos na FFT) e que os dados podem serem representados por uma distribuição normal foi utilizada a distribuição T-Student para a obtenção do intervalo de confiança da média populacional, sendo considerado um nível de confiança de 95%.

Considerando os melhores resultados obtidos o sinal de batimento de asas da *A. fraterculus* possui uma frequência fundamental pela Autocorrelação com a média populacional de $113,75 \pm 2,04$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 7,97 Hz, com um leve achatamento (coeficiente de curtose de -0,54) e praticamente simétrica (coeficiente de assimetria de -0,05) com relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 95,52 Hz até 129,38 Hz. Para a medição pela frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT o sinal possui uma média populacional de $116,40 \pm 3,10$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 10,09 Hz, com um leve achatamento (coeficiente de curtose de -0,72) e levemente assimétrica (coeficiente de assimetria de -0,35) com relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 94,00 Hz até 132,00 Hz. No caso da medição da frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT o sinal possui uma média populacional de $110,50 \pm 3,33$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 12,56 Hz, com um leve achatamento (coeficiente de curtose de -0,64) e levemente assimétrica (coeficiente de assimetria de 0,19) com relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 84,00 Hz até 136,00 Hz.

Com relação as frequências de harmônicas superiores devido a dificuldade de localização, relatada anteriormente, não foi possível utilizar os seus dados para a caracterização do sinal, pois apresentam uma grande variação no seu valor mínimo e máximo. Assim foi realizada a análise da energia somente da relação entre o frequência fundamental e o 2º harmônico obtidos pela FFT, sendo obtida uma média amostral de 2,26, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 0,75, com um leve achatamento (coeficiente de curtose de -0,66) e levemente assimétrica (coeficiente de assimetria de 0,44) com relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 1,07 até 3,92.

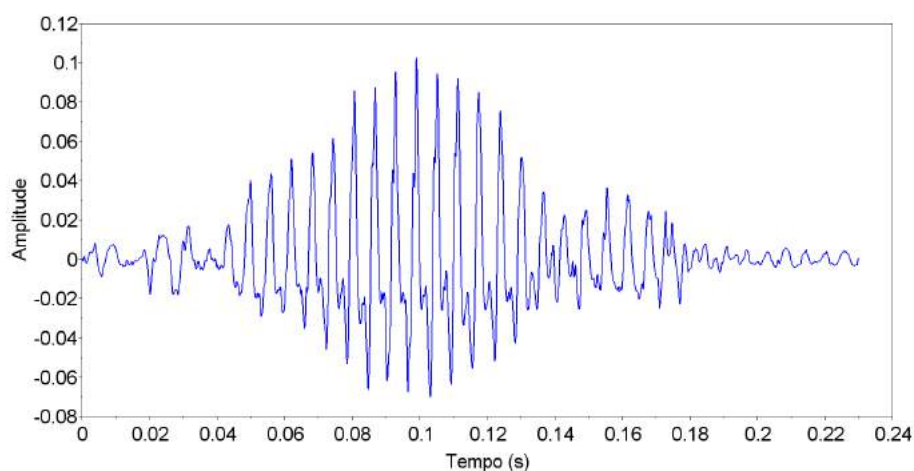
4.3 Medição do sinal gerado pelo batimento das asas da *C. capitata*

Nos experimento realizados com a mosca-das frutas *C. capitata* foram realizados os mesmos procedimentos apresentados na seção 4.2. Sendo realizadas gravações por 17 horas separadas em faixas de uma hora cada, sendo removido o tempo de

silêncio manualmente para a facilitação do processamento de sinais utilizando os mesmos critérios.

Após a realização deste pré-processamento cada faixa de sinal foi submetido ao algoritmo RMS, sendo localizados 1010 eventos de passagem. Os eventos localizados foram rotulados em um grupo padrão para realização da caracterização do sinal do inseto, sendo selecionados 111 eventos de passagem (Figura 66) dos 1010 eventos de passagem localizados.

Figura 66 – Sinal de evento de passagem de *C. capitata* do grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados obtidos com a extração das características dos sinais dos 111 eventos de passagem do grupo padrão da *C. capitata* foram armazenados em um arquivo para a realização da sua análise. As medidas descritivas estatística completa da análise dos dados são apresentadas no Apêndice B.2. Nas Tabelas 12 e 13 são apresentadas as medidas descritivas dos dados completos, nas Tabelas 14 e 15 são apresentadas as medidas descritivas com a remoção de dados *outliers* em cada item analisado, foram considerados dados *outliers* os que estão fora dos limites mínimo e máximo do boxplot.

Na análise dos dados completos (Tabela 12) foi observado que devido a degradação da qualidade do sinal nas harmônicas superiores, relatada anteriormente, ocorreu uma dificuldade de localização dos picos correspondentes as suas frequências, não sendo possível utilizar os seus dados para a caracterização do sinal. Deste modo, foi utilizada a análise os dados referentes a frequência fundamental obtida pela Autocorrelação, frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT e a frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT.

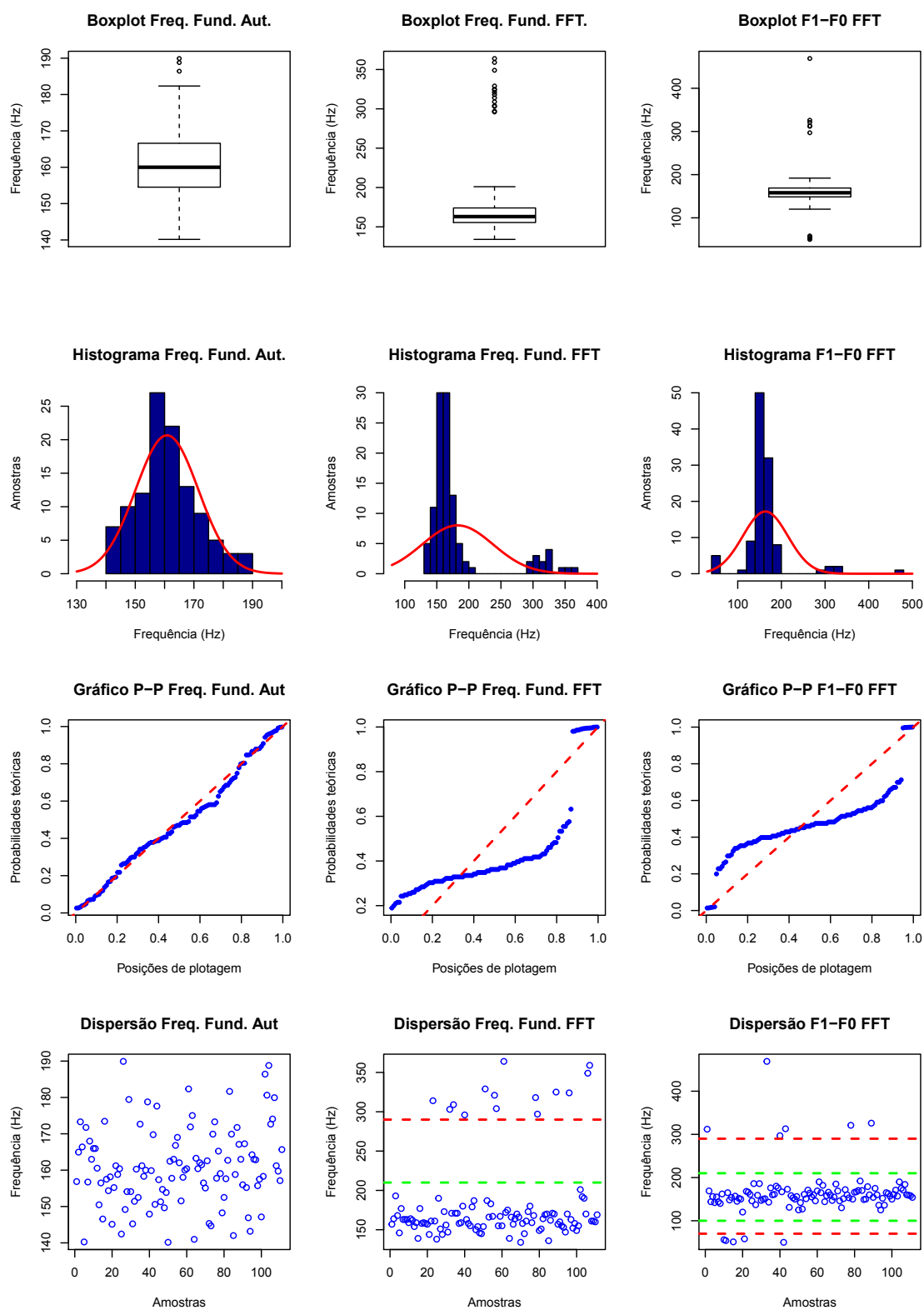
A Figura 67 apresenta a avaliação visual dos dados sem remoção de *outliers*. Cada coluna, da esquerda para a direita, apresenta a análise os dados referentes a frequência fundamental obtida pela Autocorrelação, frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT e frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT.

Na primeira linha da Figura 67 são apresentados os gráficos de boxplot, onde os dados referentes as três medições realizadas apresentam uma distribuição praticamente simétrica com a linha mediana no centro da caixa, com bigodes simétricos e ligeiramente mais longos que as subseções da caixa. Sendo que na medição realizada pela frequência fundamental pela Autocorrelação observou-se três dados (186,41 Hz, 188,79 Hz e 189,41 Hz) com possibilidades de serem *outliers* (limite máximo 184,7 Hz), na medição da frequência fundamental obtida diretamente na FFT (segunda coluna) observou-se 14 dados (com valores de 303 Hz até 364 Hz) com possibilidades de serem *outliers* (limite máximo 201,75 Hz), na medição da frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT observou-se quatro dados (com valores de 50 Hz até 58 Hz) e seis dados (com valores de 297 Hz até 469 Hz) com possibilidades de serem *outliers* (limite inferior 117,75 Hz e limite superior 199,75 Hz). Com base nos gráficos boxplot, os dados com remoção dos *outliers* indicam que a possibilidade de serem representados por uma distribuição normal

Na segunda linha da Figura 67 são apresentados os histogramas (azul) e curva da distribuição normal (vermelho) sobreposta. Com relação aos dados da primeira coluna observa-se a maior concentração de valores próximos da média, a distribuição sendo praticamente simétrica, com o formato de sino, sem lacunas nos dados e sem dados *outliers*, indicando uma distribuição normal. Na segunda coluna observa-se a média deslocada estando à direita da maioria dos dados, apresentando uma lacuna entre os dados com uma nova concentração de dados (possíveis *outliers*) à esquerda da média, indicando uma distribuição não normal. Na terceira coluna observa-se uma maior concentração de valores próximos da média, possuindo dados *outliers* acima dos 250 Hz e abaixo dos 80 Hz, indicando uma distribuição não normal.

Na terceira linha da Figura 67 são apresentados os gráficos P-P com a distribuição de probabilidade dos dados da amostra (azul) sobreposta a distribuição de probabilidade de uma curva normal (vermelho). Na primeira coluna observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados tende a seguir a distribuição de probabilidade de uma curva normal, indicando um distribuição normal. Na segunda coluna observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados não segue a distribuição de probabilidade de uma curva normal, com uma lacuna entre os

Figura 67 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de *C. capitata* do grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

dados, indicando uma distribuição não normal. Na terceira coluna observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados não segue a distribuição de probabilidade de uma curva normal, possuindo lacunas na parte inferior e superior, indicando uma distribuição não normal.

Como avaliação complementar foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, sendo obtido para frequência fundamental pela Autocorrelação um valor p de 0,08254 (acima do limite de 0,05 para normalidade), frequência fundamental obtida diretamente na FFT um valor p de $1,33 \cdot 10^{-15}$ (abaixo do limite de 0,05 para normalidade) e frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT um valor p de $8,442 \cdot 10^{-15}$ (abaixo do limite de 0,05 para normalidade). Baseado na avaliação visual e no teste de normalidade Shapiro-Wilk ficou constado que os dados da frequência fundamental obtida pela Autocorrelação podem ser representados por uma distribuição normal, os dados da frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT não podem ser representados por uma distribuição normal e que os dados da frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT não podem ser representados pela distribuição normal.

Com os resultados obtidos com a avaliação de normalidade foi realizada a análise visual da dispersão dos dados (quarta linha da Figura 67), sendo observado na terceira coluna que os dados estão agrupados entre 100 Hz e 200 Hz (linhas verdes), com 100 ocorrências e abaixo dos 70 Hz, 5 ocorrências, e acima dos 280 Hz (linhas vermelhas), 6 ocorrências, sendo os dados considerados *outliers* podendo serem retirados do conjunto de dados. Na segunda coluna os dados estão agrupados abaixo 220 Hz (linha verde), com 97 ocorrências e acima dos 280 Hz (linha vermelha), com 14 ocorrências, com base nas análises realizadas nota-se que os dados acima de 280 Hz, apesar de não serem considerados *outliers*, representam um erro na localização do pico correspondente a frequência fundamental, sendo retirados do conjunto de dados. Com relação ao gráfico de dispersão da primeira coluna observou-se que os três dados com possibilidades de serem considerados *outliers* (186,41 Hz, 188,79 Hz e 189,41 Hz) estão próximos do limite máximo obtido pelo bloxpot (184,7Hz) e não apresentam discrepâncias com o padrão de dispersão apresentado pelo restante dos dados, portando não foram considerados *outliers*. A frequência fundamental obtida pela Autocorrelação apresentaram erros de avaliação, sendo que neste caso o valor medido é abaixo do esperado.

A Figura 68 apresenta a avaliação visual dos dados com remoção de *outliers*. Cada coluna, da esquerda para a direita, apresentam os dados para as medições da frequência fundamental obtida pela Autocorrelação, frequência fundamental obtida

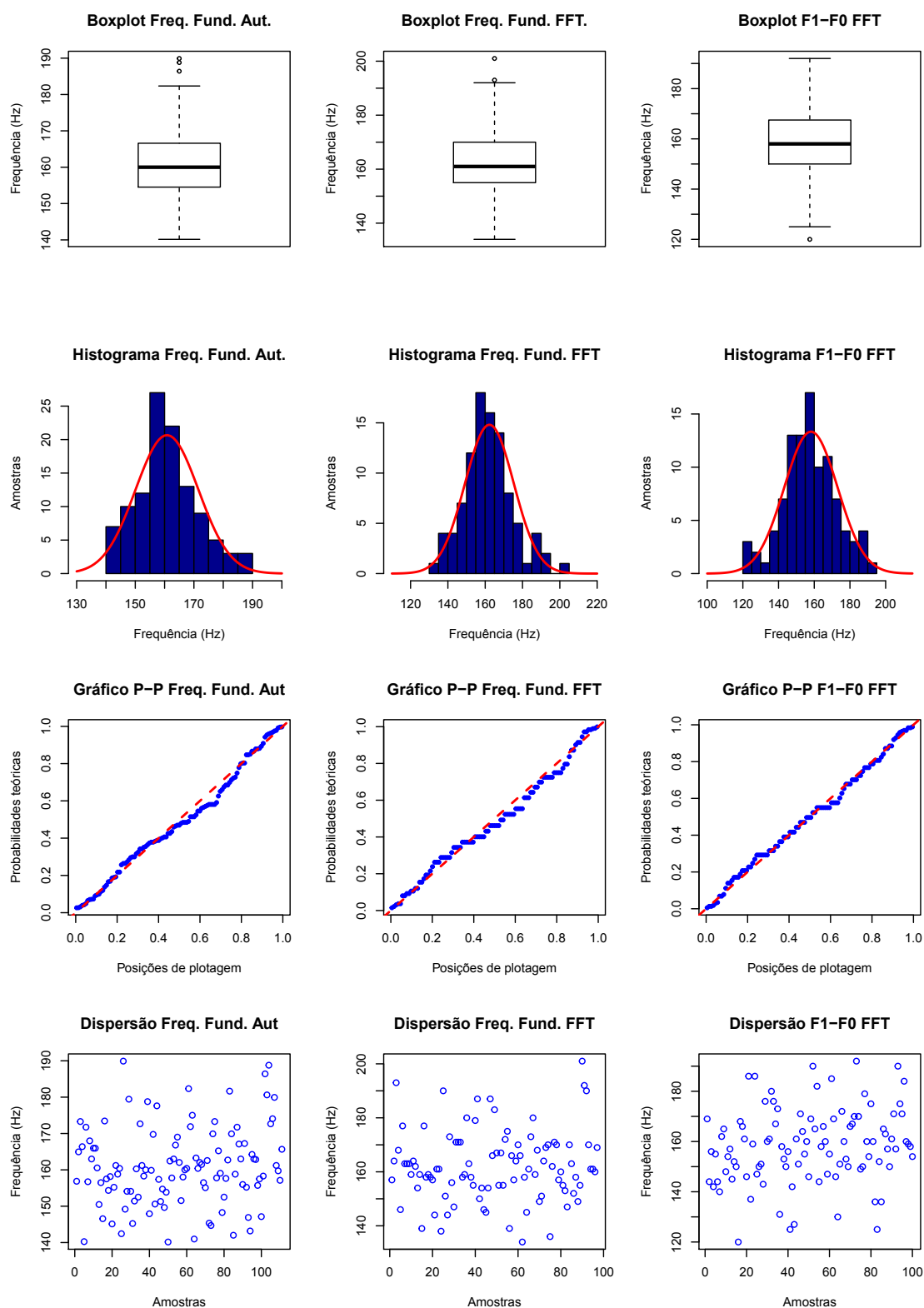
diretamente pela localização do pico na FFT e a frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT. Sendo que os resultados para a frequência fundamental obtida pela Autocorrelação são os mesmos do caso anterior, pois não possuíam dados *outliers*, mantidos para comparação com os dados obtidos com a remoção dos *outliers* da frequência fundamental obtida diretamente na FFT e frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT.

Na primeira linha da Figura 68 são apresentados os gráficos de boxplot. Nos dados referentes a medição da frequência fundamental obtida diretamente na FFT (segunda coluna) observa-se uma distribuição levemente assimétrica com a linha mediana próxima a parte inferior da caixa, bigodes levemente assimétricos e ligeiramente mais longos que as subseções da caixa e com dois dados (201 Hz e 193 Hz) um pouco acima do limite superior (192 Hz) não sendo considerado *outliers*, indicando que esta distribuição pode ser normal. Nos dados referentes a medição frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT (terceira coluna) observa-se uma distribuição praticamente simétrica, bigodes simétricos e ligeiramente mais longos que as subseções da caixa e com um dado (120 Hz) um pouco abaixo do limite inferior (124 Hz) não sendo considerado *outliers*, indicando que esta distribuição pode ser normal. Em relação ao boxplot da frequência fundamental pela Autocorrelação (primeira coluna) os gráficos apresentam semelhanças nas suas dispersões, com médias e medianas próximas.

Na segunda linha da Figura 68 são apresentados os histogramas (azul) e curva da distribuição normal (vermelho) sobreposta. Na segunda coluna observa-se a maior concentração de valores próximo da média com uma cauda mais longa à direita, com o formato de sino, com uma pequena lacuna acima dos 200 Hz e sem dados *outliers*, indicando uma distribuição normal. Na terceira coluna observa-se a maior concentração de valores próximo da média com distribuição simétrica, com o formato de sino, sem lacunas nos dados e sem dados *outliers*, indicando uma distribuição normal. Em comparação com o histograma da primeira coluna observa-se a similaridade entre suas distribuições, sendo que na segunda e terceira colunas a distribuição é mais ampla.

Na terceira linha da Figura 65 são apresentados os gráficos P-P com a distribuição de probabilidade dos dados da amostra (azul) sobreposta a distribuição de probabilidade de uma curva normal (vermelho). Nas segunda e terceira colunas observa-se que a distribuição de probabilidade dos dados tende a seguir a distribuição de probabilidade de uma curva normal, indicando que ambas podem ser representadas por uma distribuição normal.

Figura 68 – Gráficos da avaliação visual dos dados obtidos com os eventos de passagem de *C. capitata* do grupo padrão sem *outliers*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como avaliação complementar foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, sendo obtido para frequência fundamental obtida diretamente na FFT um valor p de 0,09642 (acima do limite de 0,05 para normalidade) e frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT um valor p de 0,5932 (acima do limite de 0,05 para normalidade). Baseado na avaliação visual e no teste de normalidade Shapiro-Wilk ficou constado que os dados da frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT, considerando as detecções erradas como *outliers*, podem ser representados por uma distribuição normal e os dados da frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT, sem os dados *outliers*, podem ser representados pela distribuição normal.

Devido aos tamanhos das amostras (111 para frequência fundamental pela Autocorrelação, 100 para frequência fundamental pela FFT e 97 para a frequência fundamental pela diferença entre os picos na FFT) e que os dados podem serem representados por uma distribuição normal foi utilizada a distribuição T-Student para a obtenção do intervalo de confiança da média populacional, sendo considerado um nível de confiança de 95%.

Considerando os melhores resultados obtidos o sinal de batimento de asas da *C. capitata* possui uma frequência fundamental pela Autocorrelação com a média populacional de $160,81 \pm 2,02$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 10,71 Hz, levemente acentuada (coeficiente de curtose de 0,11) e levemente assimétrica (coeficiente de assimetria de 0,41) com relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 140,15 Hz até 189,91 Hz. Para a medição pela frequência fundamental obtida diretamente pela localização do pico na FFT o sinal possui uma média populacional de $162,25 \pm 2,63$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 13,06 Hz, levemente acentuada (coeficiente de curtose de 0,33) e levemente assimétrica (coeficiente de assimetria de 0,44) com relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 134,00 Hz até 201,00 Hz. No caso da medição da frequência fundamental pela diferença entre o 2º harmônico e a frequência fundamental obtidas na FFT o sinal possui uma média populacional de $158,00 \pm 2,97$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 14,95 Hz, com um leve achatamento (coeficiente de curtose de -0,03) e levemente assimétrica (coeficiente de assimetria de -0,04) com relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 120,00 Hz até 192,00 Hz.

Com relação as frequências de harmônicas superiores devido a dificuldade de localização, relatada anteriormente, não foi possível utilizar os seus dados para a

caracterização do sinal, pois apresentam uma grande variação no seu valor mínimo e máximo. Assim foi realizada a análise da energia somente da relação entre o frequência fundamental e o 2º harmônico obtidos pela FFT, sendo obtida uma média amostral de 2,05, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 0,96, com uma acentuação (coeficiente de assimetria de 2,93) e levemente assimétrica (coeficiente de assimetria de 1,61) em relação a uma distribuição normal e com valores no intervalo de 1,01 até 6,06.

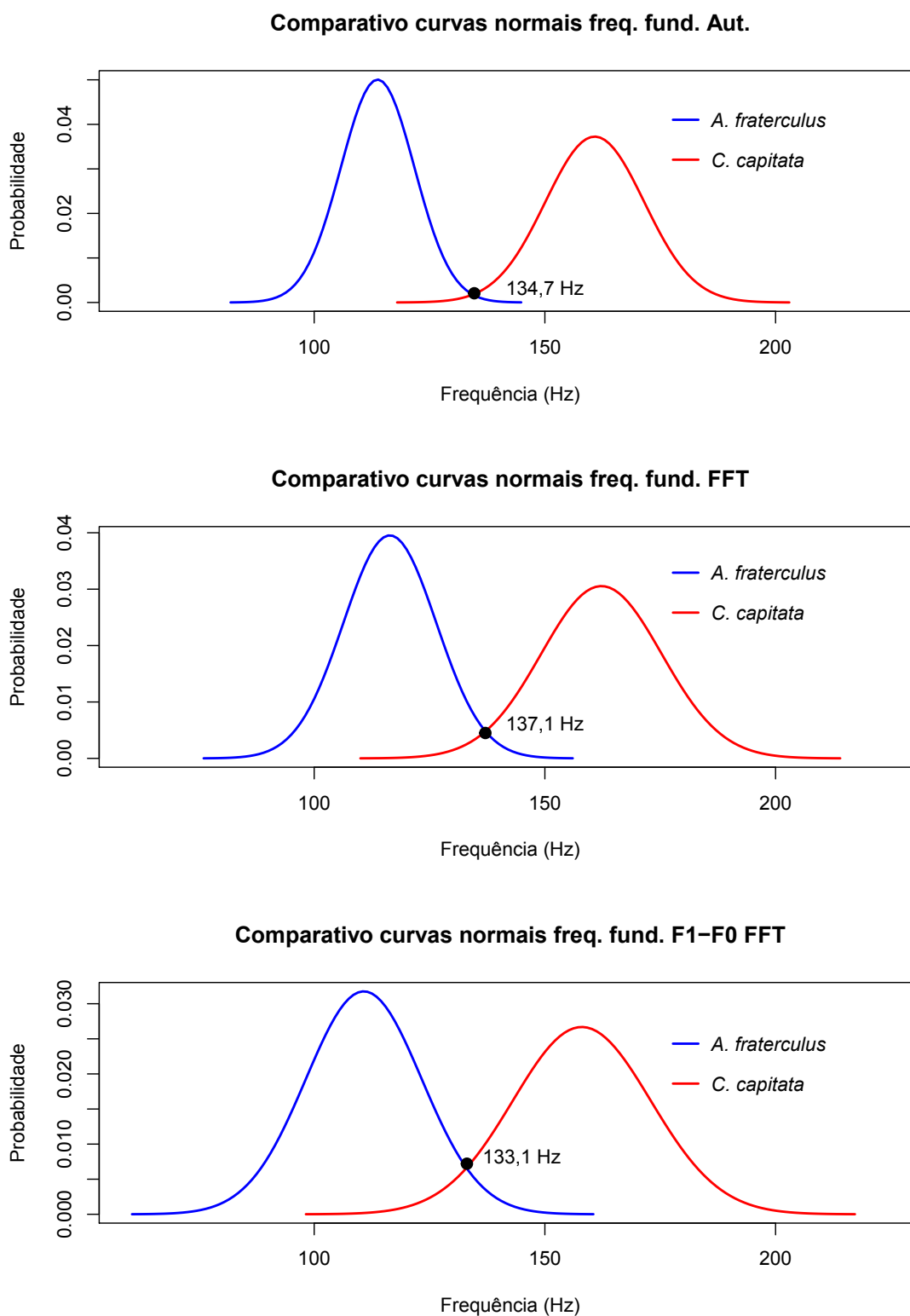
4.4 Comparação entre o sinal gerado pelo batimento das asas das moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*

Na comparação entre os sinais do batimento de asas da *A. fraterculus* e *C. capitata* foram utilizadas as características que identificam a frequência fundamental pela Autocorrelação, a frequência fundamental medida diretamente pela FFT e a frequência fundamental medida indiretamente pela diferença entre a frequência fundamental e a frequência do 2º harmônico pela FFT (Tabela 7).

A Figura 69 apresenta a comparação entre as curvas normais para as frequências fundamentais para *A. fraterculus* e *C. capitata* obtidas através da Autocorrelação, localização direta do pico na FFT e a relação entre o pico do 2º harmônico e o pico da frequência fundamental na FFT. Note que ocorre uma distinção entre as duas espécies com relação a frequência fundamental de batimento de asas, apesar da sobreposição ocorrida no limite das distribuições normais.

Assim é possível obter a probabilidade de que um evento de passagem de *A. fraterculus* seja identificado como *C. capitata*, ou ao contrário, calculando a probabilidade acumulada para uma distribuição normal com base na intersecção das curvas. Deste modo, foi obtido para a frequência fundamental pela Autocorrelação uma probabilidade de 0,0042 que um evento de *A. fraterculus* seja identificado como *C. capitata* e uma probabilidade de 0,0073 que um evento de *C. capitata* seja identificado como *A. fraterculus*. Para a avaliação com a frequência fundamental obtida pela localização direta do pico na FFT, obteve-se uma probabilidade de 0,0201 que um evento de *A. fraterculus* seja identificado como *C. capitata* e uma probabilidade de 0,0270 que um evento de *C. capitata* seja identificado como *A. fraterculus*. No caso da avaliação com a frequência fundamental obtida pela relação entre o pico do 2º harmônico e o pico da frequência fundamental na FFT, obteve-se uma probabilidade de 0,0375 que um evento de *A. fraterculus* seja identificado como *C. capitata* e uma probabilidade de 0,0479 que um evento de *C. capitata* seja identificado como *A. fraterculus*.

Figura 69 – Comparativo entre as curvas normais para frequência fundamental pela Autocorrelação (freq. fund. Aut.), frequência fundamental pela FFT (freq. fund. FFT) e frequência fundamental pela diferença entre as frequências do 2º harmônico e a fundamental pela FFT (F1-F0 FFT) dos eventos de passagem de *C. capitata* do grupo padrão e *A. fraterculus* do grupo padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com relação a análise dos dados referentes as energias dos espectros a *C. capitata* possui uma relação de energia de $1,79 \pm 0,07$ com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 0,64 e a *A. fraterculus* possui uma relação de energia de $2,05 \pm 0,10$ com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 0,65. Devido a superposição de valores não é possível o uso da relação entre as energias da frequência fundamental e o 2º harmônico para o reconhecimento das espécies.

4.5 Dataset

O *dataset* obtido com o sinal gerado pelo batimento de asas da *A. fraterculus* contém 17 horas de sinal bruto, separadas em faixas de uma hora cada. Com a análise através do método RMS foram localizados 466 eventos de passagem, sendo que destes eventos 66 foram rotulados para o grupo padrão e analisados na caracterização do sinal correspondente ao batimento de asas da *A. fraterculus*, os 400 eventos restantes não foram analisados no escopo deste trabalho. Para os 66 eventos de passagem analisados foi possível medir a frequência fundamental do sinal pela Autocorrelação em todos. Para a frequência fundamental obtida pela localização direta do pico na FFT foi possível realizar a medição em 48 eventos, sendo que 18 eventos apresentaram erros medição com valores acima de 200 Hz. No caso da frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT foi possível realizar a medição em 62 eventos, sendo que 4 eventos apresentaram erros medição com valores acima dos 200 Hz. O valores com erros de medição foram considerados *outliers* e retirados do conjunto de dados para a realização da caracterização do sinal gerado pelo batimento de asas da *A. fraterculus*.

O *dataset* obtido com o sinal gerado pelo batimento de asas da *C. capitata* contém 17 horas de sinal bruto, separadas em faixas de uma hora cada. Com a análise através do método RMS foram localizados 1010 eventos de passagem, sendo que destes eventos 111 foram rotulados para o grupo padrão e analisados na caracterização do sinal correspondente ao batimento de asas da *C. capitata*, os 899 eventos restantes não foram analisados no escopo deste trabalho. Para os 111 eventos de passagem analisados foi possível medir a frequência fundamental do sinal pela Autocorrelação em todos. Para a frequência fundamental obtida pela localização direta do pico na FFT foi possível realizar a medição em 97 eventos, sendo que 14 eventos apresentaram erros medição com valores acima de 280 Hz. No caso da frequência fundamental obtida indiretamente pela diferença entre o frequência do 2º harmônico e a frequência fundamental ambas obtidas pela localização de seus picos na FFT foi possível realizar a medição em 100 eventos, sendo que 6 eventos

apresentaram erros medição com valores acima dos 280 Hz e 5 eventos apresentaram erros de medição com valores abaixo dos 70 Hz. Os valores com erros de medição foram considerados *outliers* e retirados do conjunto de dados para a realização da caracterização do sinal gerado pelo batimento de asas da *C. capitata*.

4.6 Discussão

Os resultados obtidos com o simulador de batimento de asas demonstraram que a principal fonte de ruído do sensor é o gerado pela rede elétrica com a maior influência no circuito do emissor. Com relação a configuração das matrizes do emissor e do receptor concluiu-se que a melhor configuração é com uma linha no emissor e que o aumento de linhas tem influência direta no ruído. Em relação ao receptor constatou-se que a melhor configuração é com quatro linhas e que o número de linhas tem influência direta na intensidade do sinal de interesse. Constatou-se que é possível a realização da medição até o 5º harmônico, mas com uma diminuição de rendimento considerável na medição do 4º harmônico e 5º harmônico. A diminuição do rendimento na medição do 4º harmônico e 5º harmônico é devido ao uso de fototransistores como receptores, conforme relatado na literatura.

Baseado nos experimentos realizados com as moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata* comprovou-se que é possível o uso do sensor optoeletrônico proposto para a aquisição do sinal de batimento de asas das mesmas. Sendo possível o uso do valor RMS para a detecção de eventos de passagem das moscas-das-frutas pelo sensor.

Analisando os sinais de eventos de passagem obtidos utilizando os algoritmos Autocorrelação (`xcorr()` no `scilab`) e FFT (`fft()` no `scilab`) foi possível extrair as características do sinal: frequências fundamental (Autocorrelação e FFT) e 2º harmônico (FFT) e de energias das frequências fundamental (FFT) e 2º harmônico (FFT). Sendo observado que o uso dos fototransistores, como elementos receptores, não permitiram a correta avaliação das características correspondentes as frequências do 3º ao 5º harmônicos, devido a degradação da frequências dos harmônicos superiores que dificultaram a correta localização dos picos correspondentes com a FFT.

Com as características do sinal extraídas foi obtida a frequência fundamental do batimento de asas das moscas-das-frutas utilizando o valor obtido diretamente pela Autocorrelação e FFT e indiretamente obtendo-se a diferença entre as frequências do 2º harmônico e a fundamental pela FFT. Observando os dados obtidos verificou-se o método mais efetivo (baseado no desvio padrão) para a obtenção da frequência fundamental é a Autocorrelação, seguido da obtenção direta pela FFT e por fim da medição indireta pela FFT.

Contudo verificou-se que todos os três métodos apresentam erros de medição, sendo que o método Autocorrelação apresentou medidas erradas com valores correspondentes a metade do valor esperado para a frequência fundamental, já o método direto pela FFT apresentou medidas erradas com valores correspondentes ao dobro da frequência fundamental próximos ao que seria a frequência do 2º harmônico e o método indireto pela FFT apresentou tanto valores abaixo como acima do esperado para a frequência fundamental. Com esses erros de medição uma *A. fraterculus* pode ser identificada de incorretamente como uma *C. capitata* utilizando a frequência fundamental obtida diretamente pela FFT, pois esse erro indica uma frequência próxima a frequência fundamental da *C. capitata*, já a medição da frequência fundamental pela Autocorrelação de uma *C. capitata* pode apresentar um erro que corresponde aproximadamente a frequência fundamental da *A. fraterculus*. Portanto para minimizar erros de medição da frequência fundamental os melhores resultados são obtidos com o uso conjunto dos três métodos.

Com base nas características observadas foi determinado que o sinal gerado pelo batimento de asas da mosca-das-frutas *A. fraterculus* possui:

- Frequência fundamental pela Autocorrelação: média populacional de 113.75 ± 2.04 Hz com um nível de confiança de 95%, desvio-padrão de 7.97 Hz, valor mínimo de 95.52 Hz e valor máximo de 129.38 Hz;
- Frequência fundamental pelo método direto FFT: média populacional de 116.40 ± 3.10 Hz com um nível de confiança de 95%, desvio-padrão de 10.09 Hz, valor mínimo de 94.00 Hz e valor máximo de 132.00 Hz;
- Frequência fundamental pelo método indireto FFT: média populacional de 110.50 ± 3.33 Hz com um nível de confiança de 95%, desvio-padrão de 12.56 Hz, valor mínimo de 84.00 Hz e valor máximo de 136.00 Hz;
- Relação entre as energias frequência fundamental FFT / 2º harmônico FFT: média amostral de 2.26 ± 0.10 , desvio-padrão 0.75, valor mínimo 1.07 e valor máximo 3.92.

Para a mosca-das-frutas *C. capitata* foi determinado que o sinal gerado pelo batimento de asas possui:

- Frequência fundamental pela Autocorrelação: média populacional de 160.81 ± 2.02 Hz com um nível de confiança de 95%, desvio-padrão de 10.71 Hz, valor mínimo de 140.15 Hz e valor máximo de 189.91 Hz;

- Frequência fundamental pelo método direto FFT: média populacional de 162.25 ± 2.63 Hz com um nível de confiança de 95%, desvio-padrão de 13.06 Hz, valor mínimo de 134.00 Hz e valor máximo de 201.00 Hz;
- Frequência fundamental pelo método indireto FFT: média populacional de 158.00 ± 2.97 Hz com um nível de confiança de 95%, desvio-padrão de 14.95 Hz, valor mínimo de 120.00 Hz e valor máximo de 192.00 Hz;
- Relação entre as energias frequência fundamental FFT / 2º harmônico FFT: média amostral de 2.05 ± 0.10 , desvio-padrão 0.96, valor mínimo 1.01 e valor máximo 6.06;

Conforme avaliação realizada os dados obtidos pelos três métodos para a frequência fundamental do sinal de batimento de asas de ambas as moscas-das-frutas podem ser representadas por distribuições normais. Avaliando os dados obtidos com as características do sinal observou-se que a frequência fundamental obtida pelos três métodos podem ser utilizadas para realização da distinção entre as espécies. Deste modo, foi obtido para a frequência fundamental pela Autocorrelação uma probabilidade de 0,0042 que um evento de *A. fraterculus* seja identificado como *C. capitata* e uma probabilidade de 0.0073 que um evento de *C. capitata* seja identificado como *A. fraterculus*. Para a avaliação com a frequência fundamental obtida pela localização direta do pico na FFT, obteve-se uma probabilidade de 0,0201 que um evento de *A. fraterculus* seja identificado como *C. capitata* e uma probabilidade de 0.0270 que um evento de *C. capitata* seja identificado como *A. fraterculus*. No caso da avaliação com a frequência fundamental obtida pela relação entre o pico do 2º harmônico e o pico da frequência fundamental na FFT, obteve-se uma probabilidade de 0.0375 que um evento de *A. fraterculus* seja identificado como *C. capitata* e uma probabilidade de 0.0479 que um evento de *C. capitata* seja identificado como *A. fraterculus*.

Conclui-se que o método de obtenção da frequência fundamental do sinal do batimento de asas pela Autocorrelação é o melhor apresentado a menor probabilidade de identificação errada entre as moscas-das-frutas estudadas, sendo seguido pelo método de medição da frequência fundamental obtida pela localização direta do pico na FFT e o método da frequência fundamental obtida pela relação entre o pico do 2º harmônico e o pico da frequência fundamental na FFT. Com relação a análise dos dados referentes as energias dos espectros a *C. capitata* possui uma relação de energia de 2.05 ± 0.10 com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 0.96 e a *A. fraterculus* possui uma relação de energia de $2,265 \pm 0,10$ com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 0.75. Devido a superposição de valores não é possível o uso

da relação entre as energias da frequência fundamental e do 2º harmônico para o reconhecimento das espécies.

Deste modo conclui-se que é possível o uso do sensor optoeletrônico desenvolvido para a detecção e classificação de mosca-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*, sendo utilizado o algoritmo RMS para a detecção de passagem e o uso, em conjunto, dos algoritmos Autocorrelação e FFT para a extração das características dos sinais da frequência fundamental do som produzido pelo batimento de asas dos insetos.

Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos com a extração de características do sinal do batimento de asas da *A. fraterculus* e *C. capitata* utilizados para avaliar a identificação das moscas-das-frutas.

Característica do sinal avaliada	<i>A. fraterculus</i>	<i>C. capitata</i>
Autocorrelação	$\bar{X}:113,75\pm2,04$ Hz	$\bar{X}:160,81\pm2,02$ Hz
Frequência fundamental	Min:95,52 Hz	Min:140,15 Hz
	Max:129,38 Hz	Max:189,91 Hz
FFT	$\bar{X}:116,40\pm3,10$ Hz	$\bar{X}:162,25\pm2,63$ Hz
Frequência fundamental	Min:94 Hz	Min:134 Hz
	Max:132 Hz	Max:201 Hz
FFT	$\bar{X}:110,50\pm3,33$ Hz	$\bar{X}:158,00\pm2,97$ Hz
2º harmônico-fundamental	Min:84 Hz	Min:120 Hz
	Max:136 Hz	Max:192 Hz
FFT	$\bar{X}:2,26$	$\bar{X}:2,05$
Relação energia	Min: 1,07	Min:1,01
Fundamental/2º harmonico	Max: 3,92	Max:6,06

Fonte – Elaborado pelo autor.

5 Considerações finais e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou um estudo sobre a detecção optoeletrônica em tempo real de insetos, sendo realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, onde foram abordados os principais trabalhos e suas contribuições. Com base no estudo realizado foi desenvolvido um sensor optoeletrônico para ser utilizado na detecção das espécies de mosca-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*.

O sensor proposto foi implementado e realizados experimentos em laboratório utilizando um dispositivo para simular a batida de asas. Nestes experimentos foram avaliadas as possibilidades de ruído que o sensor poderia ter, verificado a melhor configuração para as matrizes do emissor e do receptor do sensor e verificada a resposta do sensor a variação da frequência de estímulo e o uso do sensor para a classificação das moscas-das-frutas baseado na frequência de batimento de asas.

Os resultados obtidos com o simulador de batimento de asas demonstraram que a principal fonte de ruído do sensor é o gerado pela rede elétrica com a maior influência no circuito do emissor. Com relação a configuração das matrizes do emissor e do receptor concluiu-se que a melhor configuração é com uma linha no emissor e que o aumento de linhas tem influência direta no ruído. Em relação ao receptor constatou-se que a melhor configuração é com quatro linhas e que o número de linhas tem influência direta na intensidade do sinal de interesse. Constatou-se que é possível a realização da medição até o 5º harmônico, mas com uma diminuição de rendimento considerável na medição do 4º harmônico e 5º harmônico.

Com relação aos experimentos com as mosca-das-frutas foi realizada a caracterização do sinal gerado pelo batimento das asas de *A. fraterculus* e *C. capitata* com o uso do sensor optoeletrônico desenvolvido. Para *A. fraterculus* foi determinada a frequência fundamental do sinal gerado pelo batimento das asas com o valor de $113,75 \pm 2,04$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 7,97 Hz. *C. capitata* apresentou uma frequência fundamental do sinal gerado pelo batimento das asas com o valor de $160,81 \pm 2,02$ Hz com um nível de confiança de 95%, com uma dispersão dada pelo desvio padrão de 10,71 Hz. Ambos os resultados foram obtidos com a Autocorrelação que foi considerado o método mais eficaz para a extração das características.

Foi elaborado um *dataset* do sinal referente ao batimento de asas de *A. fraterculus* e *C. capitata* capturado pelo sensor optoeletrônico desenvolvido. O *dataset* referente a *A. fraterculus* possui 17 horas de gravação de sinal bruto, separados em faixas de uma hora com 466 sinais de evento de passagem localizados através do RMS,

destes eventos 66 foram selecionados e analisados para a caracterização do sinal de batimento de asas da *A. fraterculus*. Para *C. capitata* o *dataset* possui 17 horas de gravação de sinal bruto separados em faixas de uma hora com 1010 sinais de evento de passagem localizados através do RMS, destes eventos 111 foram selecionados e analisados para a caracterização do sinal de batimento de asas da *C. capitata*.

Para o processamento de sinais, os resultados demonstram que é possível o uso do RMS para a detecção de eventos de passagem de insetos pelo sensor e a Autocorrelação e a FFT mostraram-se eficientes para a realização da extração das características dos sinais capturados, sendo que os melhores resultados foram obtidos com o uso conjunto dos dois algoritmos.

Deste modo conclui-se que é possível o uso do sensor optoeletrônico desenvolvido para o desenvolvimento de uma armadilha inteligente com detecção e classificação de *A. fraterculus* e *C. capitata* em tempo real, sendo utilizado o algoritmo RMS para a detecção de passagem e o uso, em conjunto, dos algoritmos Autocorrelação e FFT para a extração das características dos sinais da frequência fundamental do som produzido pelo batimento de asas dos insetos.

5.1 Trabalhos futuros

Para os trabalhos futuros são sugeridos:

- Realização de captura de sinais de insetos selvagens;
- Estudo de outras técnicas de obtenção do espectro de frequência de um sinal como séries de Fourier, transformada Wavelet e coeficientes mel-cepstrais;
- Estudo sobre classificadores para serem aplicadas ao reconhecimento de insetos;
- Desenvolvimento de uma armadilha inteligente utilizando detecção optoeletrônica em tempo real de insetos.

Referências

- BATISTA, G. E. et al. Sigkdd demo: sensors and software to allow computational entomology, an emerging application of data mining. In: ACM. *Proceedings of the 17th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. [S.l.], 2011. p. 761–764. Citado 4 vezes nas páginas 7, 18, 21 e 28.
- BERGUEMAIER, D. R. *Desenvolvimento e utilização do aplicativo C7 Lavouras no processo de gestão das atividades agrícolas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2016. Citado na página 16.
- BERNARDI, A. d. C. et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. *Embrapa Instrumentação-Livros técnicos (INFOTECA-E)*, Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p., 2014. Citado na página 16.
- CHEN, Y. et al. Flying insect classification with inexpensive sensors. *Journal of insect behavior*, Springer, v. 27, n. 5, p. 657–677, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 11, 18, 21, 22 e 28.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 327, n. 5967, p. 828–831, 2010. Citado na página 15.
- GHASEMI, A.; ZAHEDIASL, S. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *International journal of endocrinology and metabolism*, Kowsar Medical Institute, v. 10, n. 2, p. 486, 2012. Citado na página 62.
- GRAEME, J. *Photodiode amplifiers: op amp solutions*. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 1995. Citado na página 33.
- HEINZEL, G.; RÜDIGER, A.; SCHILLING, R. Spectrum and spectral density estimation by the discrete fourier transform (dft), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows. 2002. Citado na página 59.
- HYATT, C. J.; MAUGHAN, D. W. Fourier analysis of wing beat signals: assessing the effects of genetic alterations of flight muscle structure in diptera. *Biophysical journal*, Elsevier, v. 67, n. 3, p. 1149–1154, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 59.
- JR, A. P. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos-8*. [S.l.]: Bookman Editora, 2015. Citado na página 43.
- MALAVASI, A.; NASCIMENTO, A. Programa biofábrica moscamed brasil. *Simpósio de Controle Biológico*, v. 8, p. 52, 2003. Citado na página 15.
- MALAVASI, R. M. A.; AQUINO, C. Acoustical comparisons of calling songs from anastrepha species in brazil. *Fruit Fly Pests: A World Assessment of Their Biology and Management*, CRC Press, p. 37, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 18, 26 e 34.

- MAPA. *Agricultura destina R\$ 128 mi contra moscas-das-frutas*. 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/09/agricultura-destina-r-128-mi-contramoscas-das-frutas>>. Acesso em: 27 out. 2017. Citado na página 15.
- MENG, X.; LIU, Y.; SUN, M. Aerodynamics of ascending flight in fruit flies. *Journal of Bionic Engineering*, Elsevier, v. 14, n. 1, p. 75–87, 2017. Citado na página 35.
- NAVA, D. E.; BOTTON, M. Bioecologia e controle de *Anastrepha fraterculus* e *Ceratitis capitata* em pessegueiro. *Embrapa Uva e Vinho-Documents (INFOTECA-E)*, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010., 2010. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- PARANHOS, B. A. J. Moscas-das-frutas que oferecem riscos à fruticultura brasileira. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE VITIVINICULTURA, 1.; AGRICULTURA IRRIGADA-FENAGRI, 2008, Petrolina. *Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. Petrolina: Prefeitura Municipal, ValeXport: Embrapa Semi-Árido, 2008. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/158610/1/OPB2070.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2018. Citado na página 15.
- POTAMITIS, I.; RIGAKIS, I. Novel noise-robust optoacoustic sensors to identify insects through wingbeats. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 8, p. 4621–4631, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 18, 24, 29 e 31.
- POTAMITIS, I.; RIGAKIS, I. Large aperture optoelectronic devices to record and time-stamp insects wingbeats. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 15, p. 6053–6061, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 18, 24, 30 e 31.
- POTAMITIS, I.; RIGAKIS, I.; FYSARAKIS, K. The electronic mcphail trap. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 12, p. 22285–22299, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 7, 17, 18, 22, 23, 29 e 31.
- POTAMITIS, I.; RIGAKIS, I.; FYSARAKIS, K. Insect biometrics: Optoacoustic signal processing and its applications to remote monitoring of mcphail type traps. *PloS one*, Public Library of Science, v. 10, n. 11, p. e0140474, 2015. Citado 8 vezes nas páginas 18, 22, 23, 29, 31, 32, 34 e 74.
- POTAMITIS, I.; RIGAKIS, I.; TATLAS, N.-A. Automated surveillance of fruit flies. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 1, p. 110, 2017. Citado 10 vezes nas páginas 7, 11, 18, 24, 25, 26, 27, 30, 31 e 35.
- QUEVEDO, G. *Desenvolvimento de uma Ferramenta Para a Classificação Semi-Supervisionada de Moscas-das-Frutas Usando Smartphones*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, 2017. Citado na página 17.
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Citado na página 60.
- RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. [S.l.]: New York: LTC, 2009. Citado na página 60.

SILVA, D. F. et al. Exploring low cost laser sensors to identify flying insect species. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer Science & Business Media, v. 80, p. 313, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 18, 21 e 28.

SOBRINHO, R. B. et al. *Manual operacional para levantamento, detecção, monitoramento e controle de moscas-das-frutas*, Circular Técnica 09. [S.l.], 2001. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 32.

Texas Instruments. *TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers*. 1978 – revisado em 2017. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2018. Citado na página 43.

UNWIN, D.; ELLINGTON, C. An optical tachometer for measurement of the wing-beat frequency of free-flying insects. *Journal of Experimental Biology*, The Company of Biologists Ltd, v. 82, n. 1, p. 377–378, 1979. Citado 5 vezes nas páginas 7, 18, 20, 26 e 28.

USINAINFO. *Datasheet TIL32*. 2017. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/leds/fotodiodo-til32-3mm-emissor-infravermelho-4913.html?search_query=til32&results=2>. Acesso em: 14 nov. 2017. Citado na página 38.

USINAINFO. *Datasheet TIL78*. 2017. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/leds/fototransistor-receptor-infravermelho-3mm-til78-3189.html?search_query=til78&results=3>. Acesso em: 14 nov. 2017. Citado na página 39.

VOGEL, S. Flight in drosophila. *Journal of Experimental Biology*, The Company of Biologists Ltd, v. 44, n. 3, p. 567–578, 1966. Citado na página 35.

APÊNDICE A – *Script Scilab*

A.1 Script Scilab experimento simulador de batimento de asas

```

xdel(winsid());
//Leitura dos arquivos WAV
[y,Fs,bits]=wavread("MOTOR4V-4L-1E3.wav");
[y1,Fs,bits]=wavread("MOTOR8V-4L-1E3.wav");
[y2,Fs,bits]=wavread("MOTOR12V-4L-1E3.wav");
[y3,Fs,bits]=wavread("MOTOR16V-4L-1E3.wav");

figure
fmin=10; //Definição da frequencia minima
fmax=1000;//Definição da frequencia maxima
rate=44100;//Taxa amostragem do arquivo
//calculo da FFT normalizada
points=length(y)
v=y(1:points);/
f=abs(fft(v,1));
i=fmin/rate*points:fmax/rate*points;
fr=i/points*rate;

//grafico do espectro de frequencia
plot2d(fr',f(i)',style=[color("red")],leg="4v");

figure
points=length(y1)
v1=y1(1:points);
f1=abs(fft(v1,1));
i1=fmin/rate*points:fmax/rate*points;
fr1=i1/points*rate;
plot2d(fr1',f1(i1)',style=[color("blue")],leg="8v");

points=length(y1)
figure
v2=y2(1:points);
f2=abs(fft(v2,1));

```

```

i2=fmin/rate*points:fmax/rate*points;
fr2=i2/points*rate;
plot2d(fr2',f2(i2)',style=[color("green")],leg=["12v"]);

points=length(y1)
figure
v3=y3(1:points);
f3=abs(fft(v3,1));
i3=fmin/rate*points:fmax/rate*points;
fr3=i3/points*rate;
plot2d(fr3',f3(i3)',style=[color("black")],leg=["16v"]);

figure
plot2d(fr',[f(i)' f1(i1)' f2(i2)' f3(i3)'],style=[color("red")
  color("blue") color("green") color("black")]);
hl=legend(['4v';'8v';'12v';'16v']);

figure
plot2d(fr',[ f3(i3)' f1(i1)'],style=[color("blue") color("green") ]);
hl=legend(['8v';'16v']);

```

A.2 Script Scilab para extração de características experimento com moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*

```

xdel(winsid());
clc ;
close ;
clear ;
chdir("/home/fabiano/Área de Trabalho/mestrado/scilab")

function [abs_fft,f,peakfreq,energiafreq]=pico_fft(y, Fs)
N=length(y)
n=0:N-1
whm=0.35875-0.48829*cos((2*%pi*n)/(N-1))+0.14128*cos((4*%pi*n)/(N-1))
-0.01168*cos((6*%pi*n)/(N-1))

base = y.*whm ;

```

```

Ham_seg=zeros(1,Fs)
Ham_seg(1:length(base))=base

Y=abs(fft(Ham_seg));
l=length ( Y ) /2;
f=(0:( l -1) ) * Fs /(2* l ) ;
abs_fft=abs ( Y (1: l ) ) ;

limite_f=round(50/f(2));
peak1 = max(abs_fft);
peakfreq1 = f(abs_fft==peak1)

limpeak1=find(abs_fft==peak1)+limite_f
abs_fft2=abs_fft(limpeak1:length(abs_fft))
peak2=max(abs_fft2);
peakfreq2 = max(f(abs_fft==peak2))

limpeak2=find(abs_fft==peak2)+limite_f
abs_fft3=abs_fft(limpeak2:length(abs_fft))
peak3=max(abs_fft3);
peakfreq3 = max(f(abs_fft==peak3))

limpeak3=find(abs_fft==peak3)+limite_f
abs_fft4=abs_fft(limpeak3:length(abs_fft))
peak4=max(abs_fft4);
peakfreq4 = max(f(abs_fft==peak4))

limpeak4=find(abs_fft==peak4)+limite_f
abs_fft5=abs_fft(limpeak4:length(abs_fft))
peak5=max(abs_fft5);
peakfreq5 = max(f(abs_fft==peak5))

peakfreq=[peakfreq1,peakfreq2,peakfreq3,peakfreq4,peakfreq5]
energiafreq=[peak1,peak2,peak3,peak4,peak5]
endfunction

function [c2,lag,freq_corr]=pico_corr(y, Fs)
N=length(y)
n=0:N-1

```

```
whm=0.35875-0.48829*cos((2*%pi*n)/(N-1))+0.14128*cos((4*%pi*n)/(N-1))
-0.01168*cos((6*%pi*n)/(N-1))
```

```
base = y.*whm ;
Ham_seg=zeros(1,Fs)
Ham_seg(1:length(base))=base
```

```
c1 = xcorr ( Ham_seg ) ;
c2=c1(ceil( length ( c1 ) /2):\$)
lag =(1: length ( c2 ) )/Fs ;
```

```
c3=find(c2<0)
[a , b ] = min ( c3 ) ;
[c , d ] = max ( c2 ( a +1: \$ ) ) ;
numsamples = a+d +1;
```

```
freq_corr = Fs / (numsamples) ;
endfunction
```

```
mosca="sinal_anastrepha/"
arquivo_audio=listfiles(mosca+"/padrao/")

arquivo_csv=mopen(mosca+"padrao.csv",'a')
//
//
saida=[]
for i=1:size(arquivo_audio)(1)
    [y,Fs,bits]=wavread("sinal_anastrepha/padrao/"+arquivo_audio(i));
    [abs_fft,f,peakfreq,energiafreq]=pico_fft(y,Fs)
    [c2,lag,freq_corr]=pico_corr(y, Fs)
    saida(i,:)=[freq_corr,peakfreq,energiafreq]
    linha=string(freq_corr)+';' +string(peakfreq(1))+';'
    '+'string(peakfreq(2))+';' +string(peakfreq(3))+';'
    '+'string(peakfreq(4))+';' +string(peakfreq(5))+
    '+'string(energiafreq(1))+';' +string(energiafreq(2))+';'
    '+'string(energiafreq(3))+';' +string(energiafreq(4))+';'
    '+'string(energiafreq(5))+';' +arquivo_audio(i)+';'
    fprintf(arquivo_csv,'%s\n',linha);
```

```
end
//
//
mclose(arquivo_csv)
```

APÊNDICE B – Medidas descritivas estatística dos dados referentes aos experimentos realizados com as moscas-das-frutas *A. fraterculus* e *C. capitata*

B.1 Medidas descritivas estatística dos dados referente ao grupo padrão da *A. fraterculus*

Tabela 8 – Medidas descritivas estatística dos dados brutos de frequência do grupo padrão da *A. fraterculus*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	As	H	Min	Max
F0 Aut.	113,75	1,02	7,97	7,01	-0,54	-0,05	33,86	95,52	129,38
F0 FFT	146,46	6,14	47,93	32,72	-1,06	0,86	148,00	94,00	242,00
F1 FFT	264,49	7,99	62,38	23,59	2,04	1,46	284,00	192,00	476,00
F2 FFT	391,59	10,71	83,63	21,36	3,99	1,53	462,00	272,00	734,00
F3 FFT	512,90	13,22	103,23	20,13	0,92	0,92	499,00	332,00	831,00
F4 FFT	630,13	14,41	112,52	17,86	0,65	0,63	581,00	390,00	971,00
F1-F0 FFT	118,03	4,00	31,28	26,50	7,78	2,76	155,00	84,00	239,00
F2-F0 FFT	245,13	8,26	64,53	26,33	3,98	1,88	352,00	153,00	505,00
F3-F0 FFT	366,44	10,39	81,13	22,14	0,23	0,81	389,00	213,00	602,00
F4-F0 FFT	483,67	11,61	90,70	18,75	0,23	0,38	471,00	271,00	742,00

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **F0 Aut.** - Frequência fundamental pela Autocorrelação; **F0 FFT** - Frequência fundamental pela FFT; **F1 FFT** - Frequência do 2º harmônico pela FFT; **F2 FFT** - Frequência do 3º harmônico pela FFT; **F3 FFT** - Frequência do 4º harmônico pela FFT; **F4 FFT** - Frequência do 5º harmônico pela FFT; **F1-F0 FFT** - Diferença entre 2º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F2-F0 FFT** - Diferença entre 3º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F3-F0 FFT** - Diferença entre 4º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F4-F0 FFT** - Diferença entre 5º harmônico e Frequência fundamental pela FFT;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; As - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

Tabela 9 – Medidas descritivas estatística dos dados brutos de energia do grupo padrão da *A. fraterculus*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	As	H	Min	Max
E0-FFT	536,12	28,48	222,43	41,49	3,14	1,54	1148,92	245,60	1394,52
E1-FFT	249,34	16,12	125,91	50,50	2,28	1,37	589,54	68,08	657,63
E2-FFT	116,93	5,49	42,87	36,66	2,40	0,97	242,13	31,57	273,69
E3-FFT	74,33	3,56	27,83	37,44	-0,50	0,53	120,17	18,97	139,14
E4-FFT	50,62	2,58	20,13	39,77	-0,10	0,62	87,46	10,99	98,45
E0/E1	2,41	0,12	0,92	38,29	-0,06	0,76	3,58	1,07	4,66
E0/E2	4,86	0,24	1,84	37,83	0,93	1,17	7,93	2,54	10,46
E0/E3	7,73	0,39	3,05	39,45	1,43	1,18	14,84	3,15	17,99
E0/E4	11,65	0,66	5,13	44,07	3,10	1,47	27,47	3,93	31,39
E1/E2	2,16	0,09	0,74	34,31	-0,49	0,44	2,99	1,01	4,00
E2/E3	1,64	0,07	0,51	31,09	12,07	2,58	3,33	1,01	4,34
E3/E4	1,53	0,05	0,38	24,81	0,04	0,87	1,52	1,01	2,53

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **E0-FFT** - Energia da frequência fundamental pela FFT; **E1-FFT** - Energia do 2º harmônico pela FFT; **E2-FFT** - Energia do 3º harmônico pela FFT; **E3-FFT** - Energia do 4º harmônico pela FFT; **E4-FFT** - Energia do 5º harmônico pela FFT; **E0/E1** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 2º harmônico; **E0/E2** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 3º harmônico; **E0/E3** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 4º harmônico; **E0/E4** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 5º harmônico; **E1/E2** - Relação entre a Energia do 2º harmônico pela Energia do 3º harmônico; **E2/E3** - Relação entre a Energia do 3º harmônico pela Energia do 4º harmônico; **E3/E4** - Relação entre a Energia do 4º harmônico pela Energia do 5º harmônico;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; As - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

Tabela 10 – Medidas descritivas estatística dos dados sem *outliers* por medição de frequência do grupo padrão da *A. fraterculus*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	As	H	Min	Max
F0 Aut.	113,75	1,02	7,97	7,01	-0,54	-0,05	33,86	95,52	129,38
F0 FFT	116,4	1,53	10,09	8,67	-0,72	-0,35	148,00	94,00	132,00
F1 FFT	258,66	7,09	54,47	21,06	2,80	1,47	284,00	192,00	476,00
F2 FFT	381,75	8,37	64,30	16,84	-0,84	0,37	264,00	272,00	536,00
F3 FFT	496,02	10,96	82,76	16,69	0,63	0,53	430,00	332,00	762,00
F4 FFT	626,63	13,51	103,78	16,56	0,06	0,35	488,00	390,00	878,00
F1-F0 FFT	110,50	1,66	12,56	11,36	-0,64	0,19	155,00	84,00	136,00
F2-F0 FFT	237,80	6,60	50,73	21,33	1,19	1,35	227,00	153,00	380,00
F3-F0 FFT	359,42	9,44	72,47	20,16	-0,30	0,60	307,00	213,00	520,00
F4-F0 FFT	477,56	10,20	77,04	16,13	-0,46	0,30	321,00	322,00	643,00

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **F0 Aut.**- Frequência fundamental pela Autocorrelação; **F0 FFT** - Frequência fundamental pela FFT; **F1 FFT** - Frequência do 2º harmônico pela FFT; **F2 FFT** - Frequência do 3º harmônico pela FFT; **F3 FFT** - Frequência do 4º harmônico pela FFT; **F4 FFT** - Frequência do 5º harmônico pela FFT; **F1-F0 FFT** - Diferença entre 2º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F2-F0 FFT** - Diferença entre 3º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F3-F0 FFT** - Diferença entre 4º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F4-F0 FFT** - Diferença entre 5º harmônico e Frequência fundamental pela FFT;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; As - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

Tabela 11 – Medidas descritivas estatística dos dados sem *outliers* por medição de energia do grupo padrão da *A. fraterculus*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	As	H	Min	Max
E0-FFT	536,12	28,48	222,43	41,49	3,14	1,54	1148,92	245,60	1394,52
E1-FFT	249,34	16,12	125,91	50,50	2,28	1,37	589,54	68,08	657,63
E2-FFT	116,93	5,49	42,87	36,66	2,40	0,97	242,13	31,57	273,69
E3-FFT	74,33	3,56	27,83	37,44	-0,50	0,53	120,17	18,97	139,14
E4-FFT	50,62	2,58	20,13	39,77	-0,10	0,62	87,46	10,99	98,45
E0/E1	2,26	0,10	0,75	33,26	-0,66	0,44	2,85	1,07	3,92
E0/E2	4,54	0,19	1,41	31,14	0,22	0,83	5,67	2,54	8,20
E0/E3	7,42	0,33	2,56	34,53	-0,19	0,72	10,30	3,15	13,45
E0/E4	11,04	0,59	4,48	40,58	6,29	1,75	27,47	3,93	31,39
E1/E2	2,10	0,09	0,68	32,26	-0,87	0,26	2,58	1,01	3,59
E2/E3	1,60	0,05	0,37	23,38	-0,05	0,45	1,53	1,01	2,54
E3/E4	1,51	0,05	0,36	23,74	-0,11	0,81	1,39	1,01	2,39

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **E0-FFT** - Energia da frequência fundamental pela FFT; **E1-FFT** - Energia do 2º harmônico pela FFT; **E2-FFT** - Energia do 3º harmônico pela FFT; **E3-FFT** - Energia do 4º harmônico pela FFT; **E4-FFT** - Energia do 5º harmônico pela FFT; **E0/E1** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 2º harmônico; **E0/E2** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 3º harmônico; **E0/E3** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 4º harmônico; **E0/E4** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 5º harmônico; **E1/E2** - Relação entre a Energia do 2º harmônico pela Energia do 3º harmônico; **E2/E3** - Relação entre a Energia do 3º harmônico pela Energia do 4º harmônico; **E3/E4** - Relação entre a Energia do 4º harmônico pela Energia do 5º harmônico;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; As - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

B.2 Medidas descritivas estatística dos dados referente ao grupo padrão da *C. capitata*

Tabela 12 – Medidas descritivas estatística dos dados brutos de frequência do grupo padrão da *C. capitata*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	A_s	H	Min	Max
F0 Aut.	160,81	1,02	10,71	6,66	0,11	0,41	49,76	140,15	189,91
F0 FFT	182,43	5,24	55,26	30,29	3,29	2,15	230,00	134,00	364,00
F1 FFT	345,68	7,98	84,07	24,32	3,82	1,80	461,00	190,00	651,00
F2 FFT	520,50	10,76	113,31	21,77	1,94	0,95	659,00	300,00	959,00
F3 FFT	690,60	13,81	145,51	21,07	0,44	0,51	748,00	362,00	1110,00
F4 FFT	834,58	15,81	166,62	19,96	-0,07	0,31	759,00	484,00	1243,00
F1-F0 FFT	163,25	4,89	51,52	31,56	13,42	2,63	419,00	50,00	469,00
F2-F0 FFT	338,06	8,49	89,40	26,44	1,43	0,79	487,00	154,00	641,00
F3-F0 FFT	508,17	11,64	122,61	24,13	0,68	0,40	661,00	223,00	884,00
F4-F0 FFT	652,14	13,95	146,93	22,53	0,23	0,31	716,00	326,00	1042,00

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **F0 Aut.** - Frequência fundamental pela Autocorrelação; **F0 FFT** - Frequência fundamental pela FFT; **F1 FFT** - Frequência do 2º harmônico pela FFT; **F2 FFT** - Frequência do 3º harmônico pela FFT; **F3 FFT** - Frequência do 4º harmônico pela FFT; **F4 FFT** - Frequência do 5º harmônico pela FFT; **F1-F0 FFT** - Diferença entre 2º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F2-F0 FFT** - Diferença entre 3º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F3-F0 FFT** - Diferença entre 4º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F4-F0 FFT** - Diferença entre 5º harmônico e Frequência fundamental pela FFT;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; A_s - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

Tabela 13 – Medidas descritivas estatística dos dados brutos de energia do grupo padrão da *C. capitata*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	As	H	Min	Max
E0-FFT	428,58	14,03	147,86	34,50	0,41	0,61	767,45	157,28	924,73
E1-FFT	237,45	11,51	121,26	51,07	2,77	1,42	678,26	70,60	748,86
E2-FFT	103,54	4,69	49,41	47,72	2,35	1,40	267,13	22,20	289,33
E3-FFT	64,98	3,29	34,64	53,31	1,89	1,32	181,68	17,23	198,91
E4-FFT	42,16	2,00	21,07	49,97	1,16	1,14	105,40	13,11	118,51
E0/E1	2,10	0,10	1,03	48,80	2,25	1,54	5,06	1,01	6,06
E0/E2	4,74	0,21	2,21	46,70	3,75	1,60	13,06	1,43	14,49
E0/E3	7,86	0,37	3,89	49,47	2,60	1,47	20,77	2,39	23,16
E0/E4	11,85	0,53	5,55	46,79	2,85	1,42	32,14	2,81	34,96
E1/E2	2,50	0,11	1,20	47,98	3,13	1,48	6,78	1,00	7,78
E2/E3	1,74	0,06	0,66	37,95	2,84	1,59	3,46	1,00	4,46
E3/E4	1,59	0,05	0,51	32,25	2,83	1,46	2,71	1,02	3,73

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **E0-FFT** - Energia da frequência fundamental pela FFT; **E1-FFT** - Energia do 2º harmônico pela FFT; **E2-FFT** - Energia do 3º harmônico pela FFT; **E3-FFT** - Energia do 4º harmônico pela FFT; **E4-FFT** - Energia do 5º harmônico pela FFT; **E0/E1** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 2º harmônico; **E0/E2** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 3º harmônico; **E0/E3** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 4º harmônico; **E0/E4** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 5º harmônico; **E1/E2** - Relação entre a Energia do 2º harmônico pela Energia do 3º harmônico; **E2/E3** - Relação entre a Energia do 3º harmônico pela Energia do 4º harmônico; **E3/E4** - Relação entre a Energia do 4º harmônico pela Energia do 5º harmônico;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; As - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

Tabela 14 – Medidas descritivas estatística dos dados sem *outliers* por medição de frequência do grupo padrão da *C. capitata*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	As	H	Min	Max
F0 Aut.	160,81	1,02	10,71	6,66	0,11	0,41	49,76	140,15	189,91
F0 FFT	162,25	1,33	13,06	8,05	0,33	0,44	67,00	134,00	201,00
F1 FFT	329,14	5,37	54,79	16,65	2,34	0,91	295,00	190,00	485,00
F2 FFT	510,39	9,26	96,24	18,86	-0,36	0,22	441,00	300,00	741,00
F3 FFT	668,55	11,84	120,79	18,07	-0,01	0,00	589,00	362,00	951,00
F4 FFT	820,23	14,67	151,79	18,51	-0,20	0,09	702,00	484,00	1186,00
F1-F0 FFT	158,00	1,49	14,95	09,45	-0,03	-0,04	72,00	120,00	192,00
F2-F0 FFT	331,74	7,84	81,50	24,57	1,31	0,58	473,00	154,00	627,00
F3-F0 FFT	494,83	10,03	102,32	20,68	0,50	0,03	549,00	223,00	772,00
F4-F0 FFT	645,22	12,40	127,10	19,70	0,02	0,19	603,00	353,00	956,00

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **F0 Aut.**- Frequência fundamental pela Autocorrelação; **F0 FFT** - Frequência fundamental pela FFT; **F1 FFT** - Frequência do 2º harmônico pela FFT; **F2 FFT** - Frequência do 3º harmônico pela FFT; **F3 FFT** - Frequência do 4º harmônico pela FFT; **F4 FFT** - Frequência do 5º harmônico pela FFT; **F1-F0 FFT** - Diferença entre 2º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F2-F0 FFT** - Diferença entre 3º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F3-F0 FFT** - Diferença entre 4º harmônico e Frequência fundamental pela FFT; **F4-F0 FFT** - Diferença entre 5º harmônico e Frequência fundamental pela FFT;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; As - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

Tabela 15 – Medidas descritivas estatística dos dados sem *outliers* por medição de energia do grupo padrão da *C. capitata*

	$\bar{X}$	S_x	S	$S(\%)$	K	As	H	Min	Max
E0-FFT	428,58	14,03	147,86	34,50	0,41	0,61	767,45	157,28	924,73
E1-FFT	237,45	11,51	121,26	51,07	2,77	1,42	678,26	70,60	748,86
E2-FFT	103,54	4,69	49,41	47,72	2,35	1,40	267,13	22,20	289,33
E3-FFT	64,98	3,29	34,64	53,31	1,89	1,32	181,68	17,23	198,91
E4-FFT	42,16	2,00	21,07	49,97	1,16	1,14	105,40	13,11	118,51
E0/E1	2,05	0,09	0,96	46,99	2,93	1,61	5,06	1,01	6,06
E0/E2	4,43	0,16	1,66	37,57	0,19	0,69	7,62	1,43	9,05
E0/E3	7,32	0,29	3,02	41,19	0,70	0,89	15,22	2,39	17,61
E0/E4	11,36	0,45	4,71	41,45	1,21	0,97	24,12	2,81	26,94
E1/E2	2,31	0,09	0,90	38,98	0,23	0,72	3,86	1,00	4,87
E2/E3	1,67	0,06	0,58	34,50	4,73	1,74	3,46	1,00	4,46
E3/E4	1,56	0,04	0,46	29,54	1,51	1,16	2,34	1,02	3,36

Fonte – Elaborado pelo autor.

Nota – **E0-FFT** - Energia da frequência fundamental pela FFT; **E1-FFT** - Energia do 2º harmônico pela FFT; **E2-FFT** - Energia do 3º harmônico pela FFT; **E3-FFT** - Energia do 4º harmônico pela FFT; **E4-FFT** - Energia do 5º harmônico pela FFT; **E0/E1** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 2º harmônico; **E0/E2** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 3º harmônico; **E0/E3** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 4º harmônico; **E0/E4** - Relação entre a energia da da frequência fundamental pela Energia do 5º harmônico; **E1/E2** - Relação entre a Energia do 2º harmônico pela Energia do 3º harmônico; **E2/E3** - Relação entre a Energia do 3º harmônico pela Energia do 4º harmônico; **E3/E4** - Relação entre a Energia do 4º harmônico pela Energia do 5º harmônico;

Nota – $\bar{X}$ - Média aritmética; S_x - Erro padrão; S - Desvio padrão; $S(\%)$ - Desvio padrão percentual; K - Coeficiente de curtose; As - Coeficiente de assimetria; H - Intervalo amostral; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo;

APÊNDICE C – Hardware sensor optoeletrônico

Figura 70 – Diagrama esquemático circuito amplificador de transimpedância

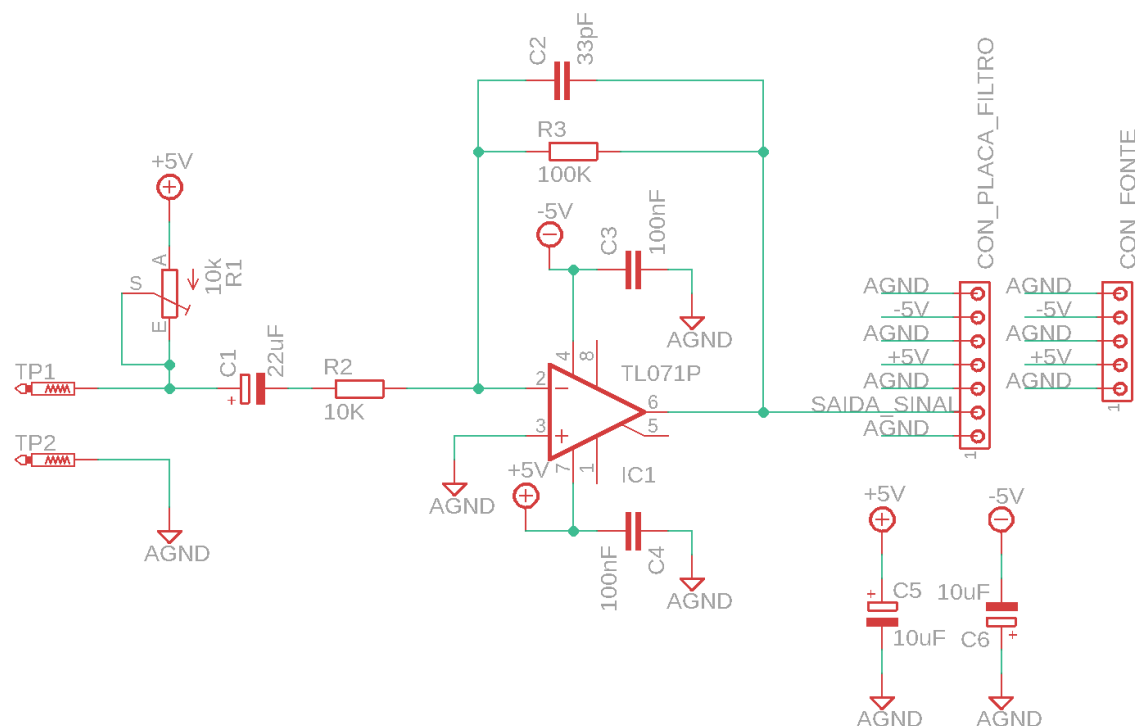


Figura 71 – Diagrama PCB circuito amplificador de transimpedância

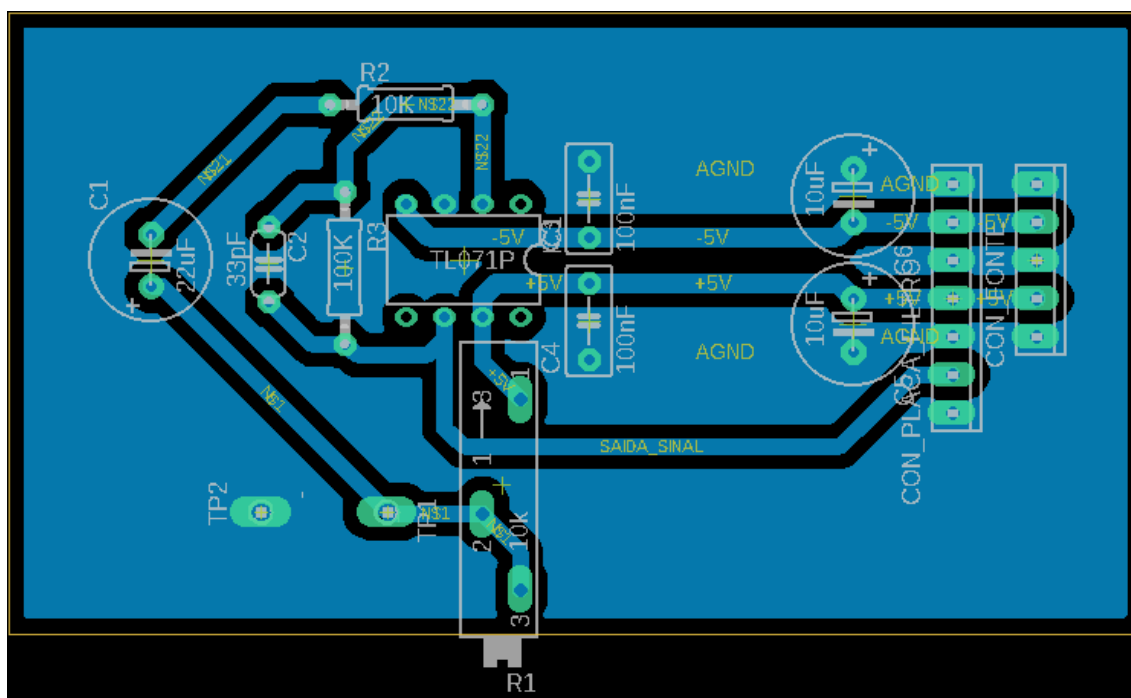


Figura 72 – Diagrama esquemático circuito amplificador de sinais

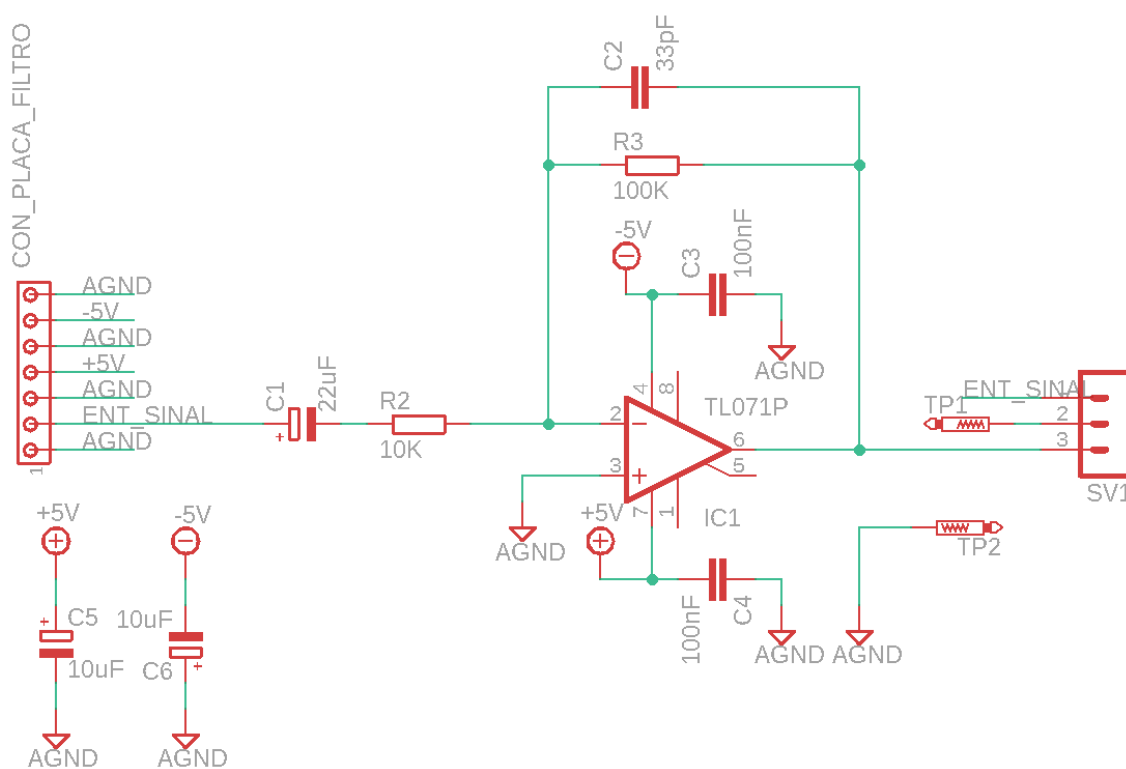


Figura 73 – Diagrama PCB circuito amplificador de sinais

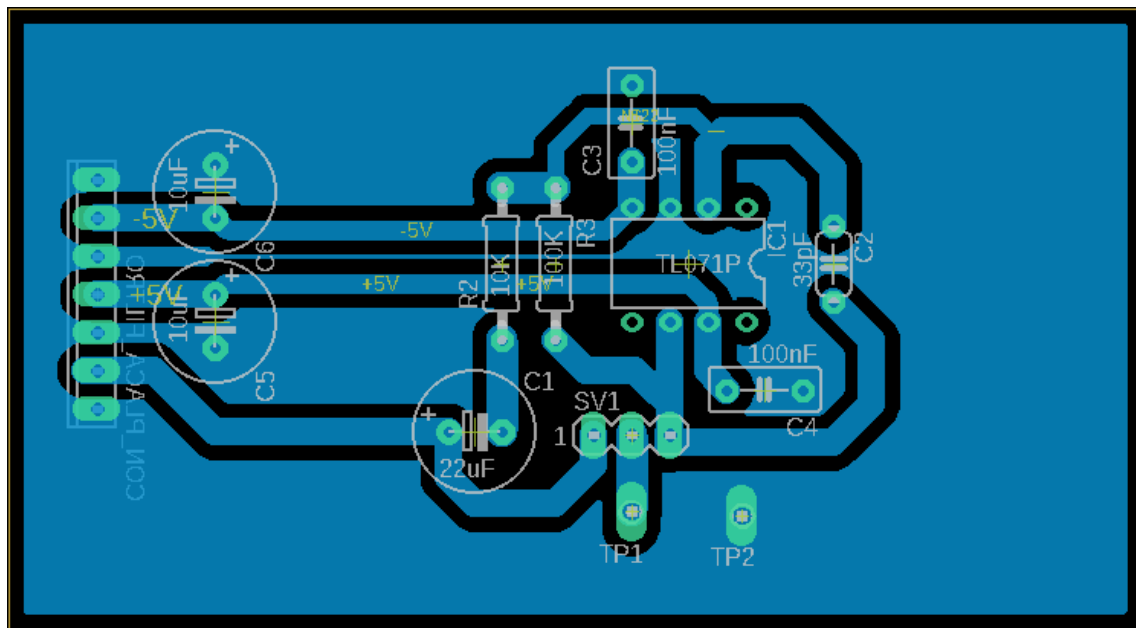


Figura 74 – Diagrama PCB circuito filtros passa-altas e passa-baixas

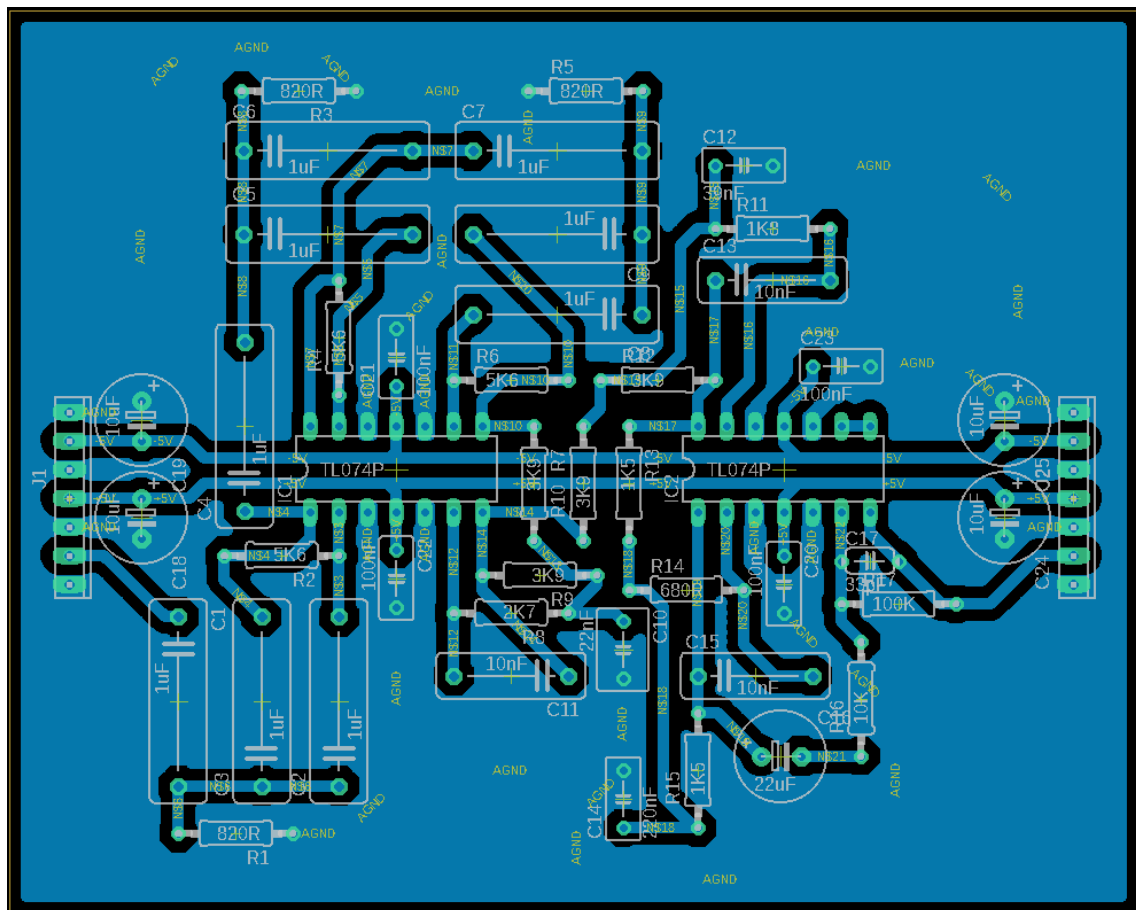


Figura 75 – Diagrama esquemático circuito filtros passa-altas e passa-baixas

