UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

ACÚSTICA APLICADA NO DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Geovanne Pereira Furriel

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
4 de novembro de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[ ] Dissertação [X] Tese [ ] Outro*:_____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Geovanne Pereira Furriel

3. Título do trabalho

“Acústica aplicada no desenvolvimento de equipamentos para agricultura de precisão”

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:
a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.
Casos de embargo:
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto**, **Usuário Externo**, em 03/11/2022, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **GEOVANNE PEREIRA FURRIEL**, **Discente**, em 03/11/2022, às 16:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3307833** e o código CRC **BA9D989C**.

Referência: Processo nº 23070.033703/2022-18 SEI nº 3307833

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

ACÚSTICA APLICADA NO DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Geovanne Pereira Furriel

Tese apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), na área de concentração em Engenharia Elétrica sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
4 de novembro de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Furriel, Geovanne Pereira
Acústica aplicada no desenvolvimento de equipamentos para agricultura de precisão [manuscrito] / Geovanne Pereira Furriel. - 2022.
132 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2022.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Modelagem de sistema. 2. Acústica. 3. Simulação. 4. Aquisição de dados. 5. Protótipo. I. Calixto, Wesley Pacheco, orient. II. Título.

CDU 621.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 05 da sessão de Defesa de Tese de **Geovanne Pereira Furriel** que confere o título de Doutor em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica.**

Aos **oito dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e dois**, a partir das **14h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **"Acústica aplicada no desenvolvimento de equipamentos para agricultura de precisão"**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Wesley Pacheco Calixto (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Luiz Eduardo Bento Ribeiro (ENGPROD/IFG**), membro titular externo; Professor Doutor **José Geraldo da Silva (AGRO/EMBRAPA)**, membro titular externo, Professor Doutor **Adriano Jakelaitis (AGRO/IFGoiano)** membro titular externo, Professor Doutor **Wanderson Rainer Hilário de Araújo (ENG/PUCGoiás)** membro titular externo e Professor Doutor **Gelson da Cruz Junior (EMC/UFG)** membro titular interno**, cujas participações ocorreram através de videoconferência**. Durante a argüição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Wesley Pacheco Calixto, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos oito dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e dois.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Documento assinado eletronicamente por **WANDERSON RAINER HILÁRIO DE ARAÚJO**, **Usuário Externo**, em 08/07/2022, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Bento Ribeiro**, **Usuário Externo**, em 08/07/2022, às 16:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **GEOVANNE PEREIRA FURRIEL**, **Discente**, em 08/07/2022, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto**, **Usuário Externo**, em 08/07/2022, às 17:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Gelson Da Cruz Junior**, **Professor do Magistério Superior**, em 08/07/2022, às 19:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **José Geraldo da Silva**, **Usuário Externo**, em 11/07/2022, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO JAKELAITIS**, **Usuário Externo**, em 15/07/2022, às 08:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3026470** e o código CRC **358EE0DB**.

Referência: Processo nº 23070.033703/2022-18 SEI nº 3026470

"Ignorance more frequently begets confidence than does knowledge: it is those who know little, and not those who know much, who so positively assert that this or that problem will never be solved by science." [1]

Charles Darwin
em *"The descent of man"*, 1871.

"Wherefore do ye toil; is it not that ye may live and be happy? And if ye toil only that ye may toil more, when shall happiness find you? Ye toil to live, but is not life made of beauty and song? And if ye suffer no singers among you, where shall be the fruits of your toil? Toil without song is like a weary journey without an end. Were not death more pleasing? " [2]

H. P. Lovecraft
em *"The Quest for Iranon"*, 1921.

[1] A ignorância frequentemente gera mais confiança do que o conhecimento: são aqueles que sabem pouco, e não aqueles que sabem muito, que afirmam tão positivamente que este ou aquele problema nunca será resolvido pela ciência.

[2] Por que motivo trabalhais arduamente? Não deveis viver e ser felizes? E se trabalhais arduamente apenas para poder trabalhar ainda mais, quando a felicidade vos encontrará? Trabalhais para viver, mas a vida não é feita de beleza e canção? E se não tiverdes cantores entre vós, para onde irão os frutos de vosso trabalho? A lida sem canção é como uma jornada estafante sem um fim. A morte não seria mais agradável?

A todas as pessoas que me acolheram de alguma forma. Minha esposa e minha família que abdicaram da minha presença em vários momentos. A eles dedico este nosso trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar minha família, que me deu a oportunidade de seguir nos estudos sempre me apoiando nas decisões tomadas. Agradeço também, a minha esposa Brunna que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando em todos os momentos durante o trabalho e por todas as noites de discussão, partilha de saberes e experiências. Quero agradecer os amigos que de maneira especial me incentivam a buscar mais conhecimento. Agradeço a todos os familiares, amigos e colegas que contribuíram para o término desta jornada. Ao Instituto Federal Goiano pela concessão do afastamento para o desenvolvimento deste doutorado. Agradeço também ao Instituto Federal de Goiás por ter me acolhido desde aluno de engenharia de controle e automação e ao longo de minha carreira. Agradeço às Industrias Reunidas Colombo, especialmente a divisão de Máquinas e Implementos Agrícolas, MIAC, pelo apoio financeiro para execução deste projeto. E não deixando de agradecer o meu amigo e orientador, Professor Wesley Pacheco, por todas as oportunidades por ele proporcionadas com o seu grande apoio, dedicação, orientação e confiança, me auxiliando a construir o caminho que percorri desde a graduação e pela oportunidade de me tornar pesquisador.

RESUMO

Este trabalho apresenta metodologia para o desenvolvimento de equipamentos para a agricultura de precisão com base na utilização de técnicas de acústica e vibração. A metodologia proposta utiliza o método de redução de escala para simular a indução de vibração e o direcionamento de campos de pressão sonora. Após a análise do modelo de redução de escala, o protótipo é construído em dimensões reais para validar o sistema proposto. São projetados e avaliados dois sistemas de indução acústica, sendo um para aplicação de produtos fitossanitários e outro para colheita seletiva de frutos. Ao aplicar o produto fitossanitário, há redução da deriva e aumento da cobertura foliar em aproximadamente 45%. Na colheita seletiva, o método proposto é analisado e foram colhidos aproximadamente 40% dos frutos no estádio de maturação adequado. As técnicas acústicas apresentadas aplicadas à agricultura são promissoras para o desenvolvimento de equipamentos na manipulação e colheita na cafeicultura de precisão. Os resultados obtidos indicam que a utilização de técnicas acústicas promove a redução do desgaste inerente da colheita nas plantas.

Palavras-Chave: Modelagem de sistema; Acústica; Simulação; Aquisição de dados; Protótipo; Agricultura.

ACOUSTIC APPLIED TO THE DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR PRECISION AGRICULTURE

ABSTRACT

This work presents methodology for development of precision agriculture equipment based on acoustic and vibration techniques. The proposed methodology uses the scale reduction method to simulate the induced vibration and the direction of sound pressure fields. After analyzing the scale-down model, the prototype is built in real dimensions to validate the proposed system. Two acoustic induction systems are designed and evaluated, one for applying phytosanitary products and the other for selective fruit harvesting. When applying the phytosanitary product, there is a reduction in drift and an increase in leaf coverage by approximately 45%. In the selective harvest, the proposed method is analyzed, and approximately 40% of the fruits were harvested at the appropriate maturation stage. The acoustic techniques presented applied to agriculture are promising for developing equipment for handling and harvesting in precision coffee farming. The results indicate that using acoustic techniques promotes the reduction of the inherent wear of the harvest in the plants.

Keywords: System modeling; acoustics; Simulation; Data acquisition; Prototype; Agriculture.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 27

CAPÍTULO 2 ACÚSTICA 35

2.1 Som e propriedades do som 35

2.2 Fontes sonoras 39

2.2.1 Adição de fontes sonoras 40

2.3 Ondulatória, vibração e choque 41

2.3.1 Vibração induzida acusticamente 43

2.4 Considerações Finais 44

CAPÍTULO 3 EVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS NA AGRICULTURA 45

3.1 Desenvolvimento Agrícola 45

3.2 Agricultura de precisão 46

3.3 Tecnologias implementadas 47

3.3.1 Técnicas de aplicação de produtos fitossanitários 49

3.3.2 Técnicas de derriça de frutos 52

3.3.3 Técnicas acústicas 54

3.4 Considerações Finais 55

CAPÍTULO 4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO 57

4.1 Sistema e modelo 57

4.2 Similitude e redução escala 58

4.3 Modelagem acústica 60

4.4 Parâmetros de Thiele-Small 63

4.5 Caixas acústicas 67

4.6 Softwares para cálculo dos parâmetros de caixas acústicas 70
4.7 Modelagem do desgaste ocasionado por vibração induzida acusticamente 70
4.8 Considerações finais 71

CAPÍTULO 5 METODOLOGIA 73
5.1 Contextualização 73
5.2 Sistema de aquisição de dados 74
5.3 Parâmetros para projeto das caixas acústicas 75
5.3.1 Avaliação do ganho devido ao arranjo de caixas acústicas 76
5.4 Simulador de indução da vibração para derriça acústica 77
5.5 Simulador de direcionamento de produto fitossanitário 79
5.6 Similitude acústica 81
5.7 Protótipo em escala real 83
5.8 Validação dos protótipos 84
5.9 Considerações finais 85

CAPÍTULO 6 RESULTADOS 87
6.1 Requisitos de projeto 87
6.2 Aquisição e análise dos dados 88
6.3 Desenvolvimento das caixas acústicas 89
6.4 Arranjo de fontes sonoras 92
6.4.1 Avaliação em redução de escala 93
6.5 Protótipo I: indução da vibração para derriça acústica 95
6.5.1 Grão de café hipotético para simulação 96
6.5.2 Protótipo em escala real 97
6.5.3 Validação do protótipo de derriça por indução acústica 99
6.6 Protótipo II: direcionamento de produto fitossanitário 100
6.6.1 Estudo de caso com pulverizadores em movimento e fonte sonora fixa . 100
6.6.2 Estudo de caso com pulverizadores e fonte sonora em movimento . . . 101
6.6.3 Estudo de caso do direcionamento estático 102
6.6.4 Análise da diretividade 103
6.7 Discussão 104

CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO 107
7.1 Contribuições do Trabalho 108
7.2 Trabalhos futuros 112

CAPÍTULO A Códigos Fonte 113
A.1 Cálculo da impedância e geração do gráfico 113

A.2 Parâmetros de Thiele-Small 114
A.3 Distâncias do pico 116

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 119

LISTA DE FIGURAS

Pág.

3.1 Pulverizadores: (a) costal, (b) propelido e (c) aéreo. 50
3.2 Tipos de deriva em pulverização agrícola. 51
3.3 Equipamento de derriça manual. 52
3.4 Máquina derriçadora: (a) vista frontal da máquina de derriça e (b) detalhe do mecanismo de derriça. 53
3.5 Desgaste causado pela derriça mecânica. 54

4.1 Diagrama de construção do transdutor eletroacústico. 61
4.2 Circuito mecânico do transdutor eletroacústico de radiação direta. 61
4.3 Aproximação análoga da impedância e admitância de radiação: (a) impedância mecânica, (b) impedância acústica, (c) admitância mecânica (d) admitância acústica. 62
4.4 Circuito eletro-mecânico-acústico baseado em admitância. 63
4.5 Circuito utilizado na determinação dos parâmetros de Thiele-Small. . . . 64
4.6 Analogia da impedância em circuito para baixa frequência com a parte elétrica referida no lado mecânico: (a) análise complexa, (b) análise aproximada para quando a radiação acústica real é maior que a imaginária. . 66
4.7 Analogia em circuito elétrico para o transdutor eletroacústico montado em caixa selada. 67
4.8 Modelo construtivo da caixa dutada: (a) corte lateral e (b) vista frontal. 68
4.9 Analogia com circuito elétrico para o transdutor eletroacústico montado em caixa dutada. 68
4.10 Caixas passa banda: (a) base com caixa selada e (b) base com caixa dutada. 69
4.11 Analogia com circuito elétrico para o transdutor eletroacústico montado em caixa passa banda em base com caixa dutada. 69

5.1 Fluxograma do módulo de aquisição de dados. 74
5.2 Medição segundo a norma IEC 60268-5: (a) caixa individual e (b) múltiplas caixas. 76
5.3 Arranjos de caixas acústicas: (a) linear e (b) planar. 77
5.4 Direcionamento da pressão sonora através da soma de atrasos. 77
5.5 Simulador de indução de vibração para derriça acústica. 78
5.6 Pontos de verificação da vibração induzida acusticamente no alvo. 79
5.7 Alvo da vibração com sensores embutidos. 79

5.8 Campo de pressão sonora gerado: (a) instante inicial, (b) interferência construtiva e (c) interferência construtiva e dispersão. 80
5.9 Aplicação com pulverizador em movimento e partículas direcionada acusticamente. 81
5.10 Aplicação com pulverizador e caixas acústicas em movimento e partículas direcionada acusticamente. 81
5.11 Aplicação com pulverizador estático no centro e partículas direcionada acusticamente. 82
5.12 Validação do direcionador de produto fitossanitário. 85

6.1 Impedância dos transdutores eletroacústicos apresentados na Tabela 6.1 e Tabela 6.2. 92
6.2 Cálculo no atraso de onda para o arranjo de caixas acústicas propostas. . 93
6.3 Gráfico polar do direcionamento do arranjo quadrático em frequências de $50Hz$, $250Hz$ e $500Hz$ mensurados em: (a) 9 fontes sonoras, (b) 16 fontes sonoras e (c) 25 fontes sonoras. 93
6.4 Arranjo 4×4 de caixas acústicas. 94
6.5 Diretividade devido ao arranjo linear de caixas acústicas. 95
6.6 Modelo do grão de café hipotético e instrumentado: (a) projeto 3D para impressão, (b) grão hipotético com MPU9250 em papel quadriculado $5mm \times 5mm$ e (c) protótipo para derriça acústica em escala reduzida. . . 96
6.7 Análise em escala reduzida da vibração do grão. 97
6.8 Painel de controle de áudio. 98
6.9 Protótipo em escala real da derriça acústica: (a) vista frontal e (b) vista posterior. 98
6.10 Validação da colheita acústica seletiva com *plagiotrópicos* do cafeeiro: (a) antes e (b) após. 100
6.11 Direcionamento em coluna. 101
6.12 Direcionamento em linha. 102
6.13 Percentual de assertividade: (a) aplicação normal sem direcionamento acústico, (b) aplicação com direcionamento acústico. 103

LISTA DE TABELAS

Pág.

6.1 Parâmetros adquiridos - Transdutores i) GTO1514D e ii) GZIW12. . . . 90
6.2 Parâmetros adquiridos - Transdutores iii) UVSUB1k2 e iv) UVWO2K2. 91
6.3 Parâmetros dos transdutores eletroacústicos utilizados. 91
6.4 Análise de dispersão do arranjo das caixas acústicas propostas. 94
6.5 Diretividade do arranjo linear de caixas acústicas a $250Hz$. 94
6.6 Dispositivos utilizados na simulação da indução da vibração para derriça. 95
6.7 Características dos transdutores eletroacústicos utilizados na simulação da indução da vibração para derriça. 96
6.8 Percentual de cobertura foliar para direcionamento em coluna, conforme Figura 6.11. 101
6.9 Percentual de cobertura foliar para direcionamento em linha. 102
6.10 Resumo da utilização da técnica para derriça seletiva em laboratório . . . 106

LISTA DE SÍMBOLOS

ν – Velocidade do som;
γ – Taxa de calor específico;
R – Constante específica do gás;
T – Temperatura absoluta em Kelvin;
J – Joule;
$u(t)$ – Velocidade instantânea da partícula em um fluido;
u_{rms} – Velocidade efetiva da partícula;
$U(t)$ – Velocidade instantânea do volume;
S – Área de secção transversal;
P_0 – Pressão estática;
$p(t)$ – Pressão instantânea;
p – Pressão acústica média;
p_{rms} – Pressão sonora efetiva;
I – Intensidade sonora;
$\tilde{p}$ – Pressão sonora complexa;
ρ_0 – Densidade específica do ar
s – Segundos;
D – Densidade de energia sonora;
ϖ – Potência elétrica utilizada na fonte;
ρ_{rms} – Pressão sonora efetiva medida;
ρ_{ref} – Pressão sonora efetiva de referência;
I_{ref} – Intensidade sonora de referência;
r – Distância em relação a fonte sonora;
ω – Velocidade angular;
F – Força;
m – Massa;
x – Deslocamento;
k – Constante de compressibilidade da mola;
ϕ – Angulo de fase;
f – Frequência;
τ – Período;
A – Amplitude;
v – Velocidade;
U – Energia total
U_p – Energia potencial
U_k – Energia cinética
X_p – Vetor de características do protótipo;
X_m – Vetor de características do modelo;
L_e – Indutância;
R_g – Resistência elétrica do transdutor eletroacústico;
M_{MD} – Massa total do diafragma, fios e bobina de voz;

C_{MS} – Compliância mecânica;
R_{MS} – Resistência mecânica;
R_A – Resistência acústica;
Z_{AR} – Impedância de radiação acústica;
Z_{MR} – Impedância de radiação mecânica;
Y_{AR} – Admitância de radiação acústica;
Y_{MR} – Admitância de radiação mecânica;
S_D – Área efetiva do diafragma;
G_{MS} – Condutância mecânica da suspensão;
G_{MR} – Condutância mecânica de radiação;
e_g – Tensão aferida no multímetro;
e_{max} – Tensão máxima aferida;
e_{min} – Tensão mínima;
f_L – Frequência obtida na tensão mínima;
e_{mid} – Tensão média aferida;
f_U – Frequência obtida na tensão média
f_s – Frequência de ressonância da parte móvel do transdutor;
Q_{MS} – Qualidade da parte mecânica do transdutor;
Q_{ES} – Qualidade da parte elétrica do transdutor;
Q_{TS} – Qualidade total do transdutor;
V_{AS} – Volume de ar deslocado;;
X_{AR} – Reatância da caixa acústica;

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPL – Nível de potência elétrica;
AIL – Nível de intensidade acústica;
SPL – Nível de pressão sonora;
ISL – Nível de intensidade sonora;
PWL – Nível de potência acústica;
CGS – Unidades básicas, centímetro, grama e segundo;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Estudos sobre acústica abordam as mais diversas áreas do conhecimento. Nas ciências biológicas é apresentado como princípio de localização, comunicação ou defesa em parte das espécies animais. Para as ciências humanas, em forma de fala, é a base da maioria das línguas e que a partir destas permite exercer uma das mais antigas formas da ciência, a filosofia. Para as exatas sempre foi ponto intrigante, sendo equacionada em seus mais diversos aspectos, podendo ser manipulada de acordo com a necessidade da aplicação, amplificando sua intensidade, proporcionando cancelamento de ruídos, direcionando ou distribuindo sons ou simplesmente sendo traduzida para partituras musicais.

Beranek e Mellow (2012) afirmam que a acústica como ciência tem objeto de estudo o som, lidando diretamente com produção, propagação da fonte ao receptor, detecção e percepção. O som pode ser descrito como distúrbio propagado através de meio elástico que causa alteração de pressão ou deslocamento das partículas, podendo ser detectado por pessoas ou instrumentos. Dentre as divisões da acústica, tem-se arquitetura acústica, física acústica, acústica musical, psicoacústica, eletroacústica, controle de ruídos, acústica subaquática, fala, acústica fisiológica, choque e vibração[1], entre outros (DUNN et al., 2015).

Em 1840, tem-se a primeira patente em que os temas vibração e agricultura são relacionados na construção de máquina para realizar a separação do alho, em que para evitar que o alho grude na estrutura é aplicado vibração ou movimento rotativo a partir de mecanismo excêntrico (GRIMES, 1840). Posteriormente, em 1841, Alfred Churchill desenvolve melhoria em sistema de colheita de grãos utilizando vibração para auxiliar a debulha dos grãos de trigo sem a necessidade de corte da palha, no qual utilizando hastes com movimento oscilatório, em conjunto com o sistema previamente existente, garante a debulha de grãos menores obtendo assim maior rendimento (CHURCHILL, 1841).

[1] Os termos choque e vibração são utilizados geralmente em referência ao mecanismo de excitação que causa resposta dinâmica em sistema físico. O choque se diferencia da vibração por ser excitação dinâmica de curta duração e a vibração é a excitação dinâmica de longa duração, comparados ao tempo necessário para o sistema físico exposto responder completamente. Ambas excitações de choque e vibração podem aparecer como movimento de entrada, força nos pontos de montagem ou campo de pressão sobre a superfície externa do sistema físico de interesse. A descrição básica de choque ou vibração é dada pela magnitude instantânea da excitação em função do tempo (PIERSOL; HARRIS, 2017).

Em 1847, Reuben Chalfant desenvolve melhoria nos debulhadores de milho, no qual para reduzir estragos causados pela vibração na base de armazenamento dos grãos, são utilizadas molas para prevenir vibrações excessivas, reduzindo o dano ao grão (CHALFANT, 1847). Posteriormente, em 1875, Charles E. Patric desenvolve melhoria aplicada a máquinas semeadoras em que é utilizada vibração de barras excêntricas para promover redução no acúmulo de sementes na saída da máquina e promover a liberação em quantidade correta das sementes no solo (PATRIC, 1875).

Com a evolução da agricultura e da eletrônica, as técnicas desenvolvidas também evoluíram. Clark e Walter (1942) desenvolvem equipamento para avaliar o grau de maturidade de frutos, onde afirmam que quando o fruto está verde ele possui consistência mais sólida que o fruto maduro. Esta mudança reflete na vibração característica, desta forma, propõem aplicar choque mecânico ao fruto e detectar a vibração característica do mesmo utilizando captadores piezoelétricos obtendo assim padrões de vibração relacionados ao grau de maturação de cada tipo de fruto.

Diversas técnicas foram criadas e aprimoradas ao longo do tempo, sempre com o objetivo de entender os modos de vibração dos frutos e desenvolver equipamentos para medição e transferência da vibração. Salter (1950) realiza estudo sobre a evolução das técnicas aplicadas na agricultura e afirma que pesquisas na área agrícola possuem novas ferramentas. Dentre elas, vibrações sônicas que possibilitam a aceleração do desenvolvimento laboratorial e apresentam novas oportunidades de utilização em ambiente real.

Adrian et al. (1958) estudam o efeito de vibração e impulsos na remoção de ameixas com objetivo de reduzir danos às raízes. Observam que os principais fatores envolvidos são: i) frequência da vibração, ii) impulso, iii) razão entre a força necessária para remover o fruto e o peso do mesmo e iv) número de galhos, porém afirmam a necessidade de maiores estudos para avaliar a influência do ponto de aplicação da vibração na planta.

Jutras et al. (1963) apresentam construção de máquina sopradora para estudar o princípio de colheita mecânica de laranjas utilizando jatos de ar, nos quais foram realizados diversos testes como: i) efeito da velocidade do ar e taxa de oscilação, ii) influência da maturidade do fruto, iii) efeito nas folhas e iv) dano no fruto. Os testes foram realizados em diferentes espécies de cítricos e obtendo até 94% de rendimento. Os autores indicam que para cítricos, como a laranja, a taxa de remoção dos frutos é maximizada quando utiliza-se alta velocidade de ar, taxa de oscilação entre 50 a 80 oscilações por minuto em frutos maiores e maduros.

Brewer (1965) apresenta técnicas para cálculo e medição da eficiência na liberação do fruto em oliveiras, explorando o principal parâmetro de indicação de eficiência em colheitadeiras. Neste estudo, são realizados testes com: i) força de remoção constante, onde quanto maior a força aplicada maior a taxa de remoção, ii) força de remoção aumentando linearmente, teste realizado com azeitonas e indicando que a força de remoção varia de acordo com o grau de maturação e iii) oscilações, onde a força de remoção que a princípio não possibilita a liberação do fruto é aplicada repetidamente, de forma que o aumento na frequência se apresenta com maior eficiência que o aumento na força aplicada. O estudo indica que a eficácia da remoção é dependente da frequência aplicada e da quantidade de impulsos utilizados.

Wang (1965) apresenta estudos para estimar a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo do café, partindo do princípio que grãos de café não atingem a maturação ao mesmo tempo, tornando necessária a colheita seletiva. Para ajuste da máquina é estimado a frequência natural do sistema fruto-pedúnculo, a partir deste valor é construído equipamento que promove oscilação na planta para avaliar a taxa de remoção. Baixas frequências necessitam maior força e maior tempo de vibração, além de ocasionar maiores danos na planta. Aplicando oscilações de 2600 rpm, 80% dos frutos são removidos nos primeiros dez segundos, destes 85% são maduros. A hipótese da derriça seletiva por vibração é comprovada pela diferença da frequência natural e força de remoção do café de acordo com o grau de maturação.

Os estudos realizados até o ano de 1969 são basicamente empíricos com elevado investimento de tempo e equipamentos, porém em diversos casos a informação obtida não pode ser utilizada em outras plantações devido a variação das propriedades físicas (PARCHOMCHUK, 1971). A evolução nos estudos de vibração aplicada à colheita de frutos dá-se a partir da série de trabalhos publicada por Cooke e Rand (1969) e Rand e Cooke (1970) que desenvolvem a teoria que relaciona dinâmica linear e não-linear do sistema fruto-pedúnculo ao grau de desprendimento dos frutos.

Parchomchuk e Cooke (1972) comprovam a teoria apresentada por Cooke e Rand (1969) e Rand e Cooke (1970), demonstrando resultados práticos em que o sistema fruto-pedúnculo corresponde ao pêndulo duplo físico. Comprovam que os modos de vibração em fase e fora de fase correspondem, respectivamente, ao movimento pendular e movimento vibratório do fruto e informam que algumas frequências de vibração são mais eficientes que outras. São testadas variedades como café, maçã e framboesa. Desde então a quantidade de estudos referentes a este tema se multiplicou de forma exponencial, onde a vibração é calculada e aplicada para melhoria de

parâmetros em máquinas e métodos desenvolvidos para agricultura, principalmente com foco em proporcionar derriça seletiva de frutos.

Berlage e Willmorth (1974) afirmam que o dano ocasionado às frutas durante a colheita mecanizada é o maior desafio da técnica. Com o intuito de testar baixas frequências de vibração para colheita, desenvolvem metodologia de testes baseada na aplicação de vibração na ordem de $20Hz$ a $1000Hz$. Para verificar a força aplicada aos frutos utilizam dois sensores de aceleração inercial. O trabalho indica que altas frequências e baixas amplitudes não causam a remoção do fruto devido ao movimento pendular não apresentar movimentação em galhos carregados de frutos. São testadas variedades como cerejas, azeitona, damasco, pêra e maçã. Desta forma, tem-se a necessidade de combinar os modos de oscilação para obter a derriça total, choques mecânicos combinados com a vibração em alta frequência distribuem por toda árvore o padrão de oscilação de forma mais eficaz que frequências fixas.

Smith e Ramsay (1983) realizam testes de campo para investigar o processo de colheita mecânica de framboesa. Estes testes baseiam-se na medição das forças necessárias para remoção do fruto maduro em diferentes fases da colheita e no levantamento da quantidade de fruto removido. Os autores afirmam que as forças necessárias para remoção das frutas podem ser maiores que a indicada na análise pendular devido a presença de folhas e das mesmas não se movimentarem uniformemente. Os resultados apresentaram que algumas frutas não alcançaram a vibração necessária, assim sendo, se todas as frutas fossem submetidas à mesma força a colheita obteria melhor resultado.

Tsatsarelis (1987) realiza testes em oliveiras baseando em modelo de dois graus de liberdade do sistema fruto-pedúnculo com amortecimento externo devido a resistência do ar. O sistema é excitado por deslocamento horizontal harmônico do galho suporte. Após a análise da força de vibração que causa a separação do fruto é indicado que os principais parâmetros influenciadores do sistema são frequência e deslocamento. Os resultados obtidos reforçam a possibilidade de derriça do fruto com ou sem o pedúnculo de acordo com a frequência utilizada e a baixa influência do amortecimento externo.

Kimmel et al. (1992), motivados pelo fato da frequência característica de frutos e vegetais serem fortemente correlacionadas com o grau de maturação, desenvolvem procedimentos experimentais para verificação dos modos de vibração em frutas esféricas. A partir da análise dos resultados é desenvolvido modelo de múltiplos graus de liberdade com parâmetros calculados com base na resposta em frequência obtida ex-

perimentalmente. São realizados procedimentos experimentais em maçãs e laranjas. Apesar de considerarem as deformações do fruto como lineares, obtiveram diferença aceitável entre a frequência obtida através do experimento e a calculada utilizando o modelo desenvolvido.

Mateev e Kostadinov (2004) apresentam modelo probabilístico da remoção de frutos de cerejeira. Este modelo é baseado na quantidade de frutos não removidos e a duração da colheita é variável aleatória. São utilizadas diferentes condições de colheita baseadas na variação da massa oscilante que promove a vibração na árvore. Os autores indicam que apesar das diferentes condições de colheita a probabilidade de remoção de frutos cresce com o aumento do tempo de aplicação da vibração.

Queiroz et al. (2007) apresentam resultados experimentais da colheita de café por vibração utilizando diferentes tipos de café cultivados no Brasil. O estudo utiliza sistema de vibração eletromagnética com o intuito de avaliar os efeitos de frequência, amplitude, direção de vibração, grau de maturação e quantidade dos frutos no sistema de remoção. Os resultados obtidos indicam que a direção da vibração não afeta a eficiência. Frequências de $23.33Hz$ e $26.67Hz$ com amplitude de $15mm$ resultam em alta eficiência de remoção para frutos em grau de maturação cereja e cereja esverdeado para as variedades Catuaí Vermelho e Novo Mundo. Os autores comprovam a influência da frequência e amplitude de vibração na remoção dos frutos, indicando a viabilidade da colheita seletiva baseada no controle da vibração.

Silva et al. (2010) analisam a força de desprendimento dos frutos do cafeeiro como parâmetro na obtenção de métrica para regulagem da colheitadeira em termos de vibração e velocidade operacional. Os autores utilizam cultivares da variedade Novo Mundo, Catuaí Amarelo e Icatú, realizando ensaios em plantas aleatórias e observando a força de desprendimento em diferentes graus de maturação. Os resultados obtidos apresentam diferença significativa entre os estados de maturação verde e cereja, além de indicar que, a variedade Novo Mundo é a que apresenta, dentre as cultivadas no Brasil, menor força média necessária para o desprendimento do fruto maduro.

Guedes (2011) apresenta o efeito da vibração em relação ao tamanho dos galhos do cafeeiro e em diversos graus de maturação . Utiliza como referência para seus experimentos galhos de $50mm$ e $100mm$ da variedade Catuaí Vermelho em diferentes períodos da safra. O autor descreve a eficiência da derriça nas condições estudadas em modelos de regressão estatísticos, apontando a influência do período da colheita na seletividade da derriça. O trabalho indica que em ramos de $50mm$ a eficiência

da derriça é maior em relação a ramos de $100mm$ quando alterada frequência e amplitude de vibração.

Villibor (2012) apresenta estudos sobre a determinação experimental de propriedades mecânicas do sistema fruto-pedúnculo do café juntamente a modelagens matemáticas e simulações, propondo melhorias nas colheitadeiras. Desenvolve experimentos para avaliar a transmissibilidade de vibração no sistema fruto-pedúnculo do café submetido a vibração forçada, indicando que a maior transmissibilidade de vibração se dá na faixa próxima a $20Hz$.

Coelho et al. (2016) produzem modelagem utilizando métodos de elementos finitos para verificar o comportamento dinâmico dos sistema fruto-pedúnculo no café. Frequências naturais e modos de vibração são determinados através de métodos de elementos finitos estocásticos em que o módulo de elasticidade e a massa específica dos frutos, pedúnculo e ramos são tratados como variáveis aleatórias. Os autores indicam que as frequências naturais reduzem com a evolução do grau de maturidade ou com o aumento da massa total do sistema.

Tinoco e Peña (2018) utilizam o método dos elementos finitos para análise das forças no sistema fruto-pedúnculo do café Arábica. O estudo utiliza espectro de frequência de $0Hz$ a $400Hz$, onde são encontrados três modos de vibração. Os autores afirmam que a segunda frequência natural obtida, $128Hz$ é aceitável para simulação de frutos maduros. Observam que a frequência natural do fruto reduz de acordo com a maturação e que a frequência de vibração ideal para derriça seletiva está entre $120Hz$ e $150Hz$ devido ao fato que outros estados de maturação não são estimulados neste intervalo de frequência.

A importância de estudos em relação a melhoria de técnicas de manejo e colheita de café é comprovada economicamente. Dados de 2017 indicam que o café, dentre 1.238 produtos avaliados, é o centésimo produto em valor comercializado no mundo, e que o Brasil é o maior exportador mundial de café, com 17% do comércio, valor correspondente à $US\$\ 5,08$ bilhões. O café representa $2,7\%$ das exportações brasileiras na área agrícola perdendo apenas para a soja, com 10% das exportações (NATIONS, 2018). Estes dados representam a importância do café para a balança comercial brasileira e consequentemente, refletem a necessidade de estudos aprofundados sobre a qualidade dos frutos colhidos (CORREIA et al., 2020).

As aplicações de acústica e vibração na agricultura não se resumem à colheita de frutos. Diversos trabalhos utilizam acústica no manejo agrícola. Maccagnan et al. (2008)

utilizam acústica para o manejo de pragas, mimetizando o som gerado por cigarras. Neste método, as cigarras são atraídas para determinado ponto, no qual é administrado pesticida especifico, reduzindo assim a quantidade de produto gasto e o dano ao meio ambiente. Mankin et al. (2012) utiliza acústica como método de detecção de insetos escondidos nas plantas. Desmet et al. (2003) utilizam sistemas vibro-acústicos para redução de vibração e conforto do operador. Fernandez-Jaramillo et al. (2018) avaliam os efeitos de ondas sonoras em plantas com monitoramento agroecológico molecular e bioquímico.

Analisando as aplicações de acústica na agricultura, juntamente com a evolução obtida nesta área, observa-se que o desenvolvimento de técnicas acústicas aplicadas à agricultura geram avanços e desenvolvem novas metodologias. A agricultura de precisão possui necessidades em relação ao desenvolvimento de equipamentos para testes laboratoriais, manejo e colheita. Diversos destes dispositivos são desenvolvidos utilizando princípios acústicos de choque e vibração, como por exemplo: i) dispositivos para derriça de frutos utilizando vibração, ii) dispositivos para verificação do grau de maturidade dos frutos e iii) análises computacionais referentes a vibração para colheita de grãos (ADRIAN et al., 1958; BREWER, 1965; SMITH; RAMSAY, 1983; GUEDES, 2011; VILLIBOR, 2012).

Vários estudos aplicam a acústica como ferramenta na agricultura, entretanto, existe a lacuna quanto ao modo de vibração, atualmente obtido através do contato direto com a planta. Fontes sonoras controladas geram variação da pressão ambiente, induzindo a vibração. O controle desta vibração ocorre através da frequência e potência do sinal aplicado à fonte, sendo possível retirar os frutos de seus pedúnculos por meio desta vibração. Com a utilização da vibração controlada pode-se produzir a colheita seletiva de acordo com a frequência e a amplitude. Portanto, é possível criar metodologias utilizando vibração induzida acusticamente para verificar o comportamento dos frutos enquanto sujeito à vibração. A indução de vibrações diretamente nos frutos permite a análise das oscilações, descartando a vibração obtida pelo movimento do galho que gera acúmulo de energia cinética.

A originalidade deste trabalho está no controle que é realizado nas fontes sonoras através da frequência e potência do sinal aplicado. Tais fontes sonoras geram variação de pressão no ambiente, induzindo vibrações e o movimento organizado de partículas em suspensão, permitindo seu direcionamento, fator necessário nas aplicações de produtos fitossanitários. A vibração induzida diretamente nos frutos permite evoluir procedimentos laboratoriais, reduzir perdas, aumentar a produtividade da lavoura,

melhorar a qualidade do manejo e evoluir as técnicas agrícolas, definindo a inovação e a justificativa desta pesquisa.

O processo de similitude são aplicados neste trabalho para avaliar a metodologia, nos quais são gerados modelos físicos instrumentados representando os frutos, possibilitando novos estudos práticos sobre acústica e vibração, análise da frequência, amplitude de oscilação e energia aplicada diretamente ao objeto em estudo. A técnica desenvolvida tem implementação que leva em conta o arranjo da fonte sonora, o controle e aquisição de dados. A relevância e aplicabilidade deste trabalho estão de acordo com a necessidade da agricultura em desenvolver equipamentos laboratoriais para manejo e colheita.

Portanto, a hipótese primária pode ser assim descrita: se os campos de pressão sonora promovem o ordenamento das partículas em suspensão e se é possível retirar frutos de seus pedúnculos com vibração e amplitude de frequência corretas, logo, é possível utilizar a pressão sonora para focalizar a pulverização de produtos fitossanitários e realizar a colheita seletiva de frutos. Para validar a hipótese são desenvolvidos metodologia e protótipos.

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de metodologia e dispositivo que utilizem técnicas de acústica e vibração na agricultura de precisão, na tentativa de reduzir as perdas e elevar a produtividade. Ainda como objetivos têm-se: i) construção da modelagem matemática de dispositivos para indução de vibração acústica, ii) aplicação da teoria de similitude na análise da direção da pressão acústica, iii) construção do sistema laboratorial para análise de vibração induzida, iv) desenvolvimento de técnica para aplicação de produtos fitossanitários utilizando campos de pressão sonora controlados e v) desenvolvimento de técnica de colheita seletiva de café utilizando vibração induzida acusticamente.

Esta Tese está dividida da seguinte forma: O Capítulo 2 descreve os princípios de acústica, juntamente com análise de resultados importantes de trabalhos anteriores. O Capítulo 3 apresenta a agricultura de precisão como área propícia a aplicação de técnicas acústicas, analisando aplicações existentes. No Capítulo 4 são apresentadas as modelagens e simulações desenvolvidas para a criação e validação das técnicas. O Capítulo 5 apresenta a metodologia e os procedimentos experimentais e no Capítulo 6 são analisados os resultados obtidos durante o trabalho. Por fim, no Capítulo 7 é apresentado as conclusões do trabalho e a programação utilizada é apresentada nos Apêndices.

CAPÍTULO 2

ACÚSTICA

Este capítulo apresenta as definições básicas da acústica como o som, suas propriedades, modos de medição e análise, além da teoria básica sobre ondulatória, necessária para análise do som em movimento. É também apresentado o estudo de vibrações, que é parte constituinte da acústica, podendo ser utilizada para gerar som ou distúrbios de pressão resultantes da potência acústica.

2.1 Som e propriedades do som

O som pode ser definido como estímulo sonoro ou sensação sonora (KIM, 2010). O som como estimulo sonoro é o movimento de onda no ar ou em outro meio elástico e a sensação sonora é a excitação do mecanismo auditivo que resulta na percepção do som. É verificada a existência de som quando algum distúrbio se propaga através de meio elástico ocasionando alteração na pressão ou deslocamento de partículas do material, sendo detectada de alguma forma por pessoas ou instrumentos (BERANEK; MELLOW, 2012).

A definição utilizada depende do tipo de abordagem, física acústica ou psicoacústica e a escolha da definição correta depende da aplicação proposta. Caso o estudo for relacionado ao distúrbio gerado por transdutores acústicos ou pela vibração em corpos rígidos, o problema é físico. Para verificação da percepção humana do som gerado por este mesmo distúrbio, a definição utilizada deverá ser da psicoacústica (EVEREST, 2001).

O som pode ser produzido por diversos processos, como: i) vibração de materiais no qual ao provocar a vibração é gerado deslocamento de ar e consequentemente variação da pressão de ar, ii) mudança no fluxo de ar na qual cornetas a ar geram deslocamento de ar em espaços com formato específico que indicam a frequência de saída, iii) fontes de calor dependentes do tempo no qual o calor gerado por arco elétrico expande o ar devido ao aquecimento instantâneo e iv) fluxo supersônico no qual as ondas de choque resultantes de turbinas à jato ou bombas forçam o ar a se mover mais rápido que a velocidade do som (DUNN et al., 2015).

Fonseca (2007) afirma que o som corresponde às variações da pressão do ar que conseguem ser captadas pelo ouvido humano. As ondas mecânicas do som possuem frequência entre $20Hz$ e $20kHz$ e energia a partir da ordem $10^{-20}J$. Ondas mecânicas com frequências superiores a $20kHz$ são denominadas ultrassom e frequências abaixo

de $20Hz$, infrassom (TEMPLETON; SAUNDERS, 2014).

A velocidade em que a onda mecânica percorre é determinada pela característica do meio e do tipo de onda. A velocidade do som, ν, depende da temperatura e do fluido que percorre, podendo ser expressa por (SHAW; BUGL, 1969):

$$\nu = (\gamma RT)^{\frac{1}{2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \tag{2.1}$$

onde γ é a taxa de calor específico e é igual a $1,4$ para o ar e outros gases diatômicos, T é a temperatura absoluta em Kelvin e R é a constante específica do gás. Para o ar tem-se $R = 286,9[J/kg \cdot K]$

Especificamente, pode-se analisar a velocidade da partícula que compõe o fluido em determinado ponto. Esta velocidade é devido somente à onda sonora, em parte infinitesimal do meio em determinado instante. A velocidade efetiva da partícula u_{rms}, medida pontualmente na onda, é a raiz quadrática média da velocidade instantânea da partícula. A velocidade instantânea do volume $U(t)$, é a velocidade devido somente à onda sonora e a taxa de fluxo do meio perpendicularmente à área específica S. Desta forma, $U(t) = S \cdot u(t)$, onde $u(t)$ é a velocidade instantânea da partícula (BERANEK; MELLOW, 2012).

Quando ondas acústicas atravessam algum meio, tem-se variação na pressão ambiente. A maior pressão acústicas que pode ser gerada é limitada pela pressão atmosférica, atingindo o nível teórico de $191dB$ (KIM, 2010). Na prática, este limite é reduzido devido a efeitos de não-linearidade, que ocasionam alterações na forma de ondas sonoras em elevadas amplitudes. O formato de onda senoidal é deformado e se aproxima da onda dente de serra, transformando em ondas de choque (DUNN et al., 2015).

A pressão que determinado ponto no ambiente está sujeito caso não exista nenhuma onda sonora presente, é a pressão estática P_0. Em pressão barométrica normal, $P_0 \approxeq 10^5 Pa$. A pressão barométrica considerada normal é de $0,760mHg$ à 0^oC, resultando em $101,325Pa$. O aumento da pressão em relação a pressão estática em determinado instante, devido a presença de onda sonora, é chamado de pressão instantânea $p(t)$. Pressão sonora efetiva p_{rms}, determinada pontualmente, é o valor médio quadrático rms, da pressão sonora instantânea (FONSECA, 2007).

Reynolds (1981) afirma que toda onda transporta energia em sua direção de propagação e a taxa média que esta é transmitida por unidade de área perpendicular

a direção do ponto considerado, é a intensidade sonora I. Em onda sonora livre e progressiva, plana ou esférica, a intensidade sonora na direção de propagação é representada por:

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 \nu} = \frac{|\tilde{p}|^2}{2\rho_0 \nu} \quad [W \cdot m^{-2}] \tag{2.2}$$

onde ρ_0 é a densidade específica do ar e $\tilde{p}$ é a pressão sonora complexa, que é a pressão sonora analisada vetorialmente, na direção da variação da pressão.

A densidade de energia sonora D, é a energia sonora em parte infinitesimal do gás dividido pelo volume do gás e é dado por:

$$D = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 \nu^2} = \frac{p_{rms}^2}{\gamma P_0} \quad [W \cdot s \cdot m^{-3}] \tag{2.3}$$

onde γ é a taxa de calor específico do gás. Desta forma, a pressão acústica média p, em relação a potência elétrica utilizada na fonte ϖ a determinada distancia r é expressa por:

$$p^2 = \frac{\varpi \rho \nu}{4\pi r^2} \tag{2.4}$$

Dunn et al. (2015) afirmam que o nível[1] de potência elétrica (*electric power level* – EPL), e nível de intensidade acústica (*acoustic intensity level* – AIL), representam a razão de duas potências elétricas ou duas intensidades sonoras na forma logarítmica e são definidas respectivamente como:

$$\text{EPL} = 10 \log \left(\frac{\varpi_1}{\varpi_2} \right) \quad [dB] \tag{2.5}$$

$$\text{AIL} = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad [dB] \tag{2.6}$$

onde ϖ_1 e ϖ_2 são potências elétricas e I_1 e I_2 são intensidades sonoras.

O nível da pressão sonora (*sound pressure level* – SPL), é vinte vezes o logaritmo em base dez da razão entre a pressão sonora efetiva medida ρ_{rms} e a pressão sonora efetiva de referência ρ_{ref} que, tratando-se de medições em geral no ar, tem-se $\rho_{ref} =$

[1] Em acústica a palavra nível implica na relação entre duas posições, uma medida e outra de referência. Desta forma, nível é a magnitude de determinada quantia, expressa em unidades logarítmicas, matematicamente expressa por $10 \log(A) - 10 \log(b) = 10 \log(A/B)$.

$20\mu Pa\ rms$, representado por:

$$\text{SPL} = 20\log\left(\frac{\rho_{rms}}{\rho_{ref}}\right) \quad [dB] \tag{2.7}$$

O nível de intensidade sonora (*intensity level source* – ILS), é dez vezes o logaritmo na base dez da razão entre a intensidade sonora medida e a intensidade de referência I_{ref}, usualmente $I_{ref} = 10^{-12}\ [W \cdot m^{-2}]$ em condição atmosférica padrão, para ondas progressivas planas ou esféricas, dada por:

$$\text{ILS} = 10\log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) \quad [dB] \tag{2.8}$$

Segundo Beranek e Mellow (2012), a relação exata entre ILS e SPL, em onda sonora progressiva, plana ou esférica, é dada pela substituição de (2.2) em (2.8), sendo representado por:

$$\text{ILS} = \text{SPL} \cdot 10\log\left(\frac{p_{ref}^2}{\rho_0 \nu I_{ref}}\right) \quad [dB] \tag{2.9}$$

Substituindo os parâmetros referentes ao ar tem-se:

$$\text{ILS} = \text{SPL} \cdot 10\log\left(\frac{400}{\rho_0 \nu}\right) \quad [dB] \tag{2.10}$$

Substituindo a pressão acústica média (2.4) em (2.7), tem-se:

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 10\log\left(\frac{\varpi \rho c}{4\pi r^2 P_0^2}\right) \\ &= 10\log(\varpi) - 20\log(r) - 10\log(4\pi) - 10\log\left(\frac{\rho\nu}{P_0^2}\right) \quad [dB] \end{aligned} \tag{2.11}$$

Segundo Everest (2001), outro parâmetro importante a ser avaliado é o nível de potência acústica (*acoustic power level* – PWL), da fonte sonora, que é dez vezes o logaritmo em base dez da razão entre a potência acústica radiada pela fonte e a potência sonora de referencia ϖ_{ref}, que usualmente é $1pW$, isto significa que quando a fonte sonora irradia $1W$ de potência acústica ela possui nível de potência de $120dB$,

dado por:

$$\mathrm{PWL} = 10 \log \left(\frac{\varpi}{\varpi_{ref}} \right) \quad [dB] \tag{2.12}$$

2.2 Fontes sonoras

Todo e qualquer material que emite ruído pode ser considerado fonte sonora. Porém, no estudo da acústica é necessário a utilização de fontes sonoras controladas. Atualmente, a principal fonte utilizada são os transdutores eletroacústicos, que transformam potência elétrica em potência acústica. A conversão é obtida através da aplicação de corrente alternada controlada em bobinas, que geram campo magnético, induzindo movimentação no transdutor. Esta movimentação gera variação de pressão no ar e consequentemente som (KUTTRUFF, 2006).

O transdutor eletroacústico emite certa quantidade de som, determinada pela potência sonora. Ondas sonoras possuem energia potencial e cinética associada a ela. A energia total presente em unidade de volume de fluido é nomeada como densidade de energia, que é a quantidade de energia que o sistema aplica ao meio. A potência sonora ou potência acústica é a energia sonora transmitida por segundo pela fonte sonora. Esta relação é característica construtiva da fonte sonora, não possuindo variação com relação ao ambiente em que é inserida (KLEINER, 2013).

As ondas sonoras são radiadas pela fonte no lado anterior e posterior do transdutor eletroacústico. Estas ondas são defasadas 180º uma da outra, ou seja, quando se comprime o ar de um lado ele rarefaz do outro. Portanto, se as duas ondas sonoras se juntarem, elas se anulam. Fato este que torna necessário isolamento entre os dois lados para não permitir o cancelamento das ondas (curto-circuito acústico) (BERANEK; MELLOW, 2012).

O isolamento pode ser realizado utilizando caixas acústicas, que funcionam como filtros mecânicos ajustados pela característica construtiva da caixa e podem ser basicamente de três tipos: i) selada, ii) dutada e iii) passa-faixa. Cada caixa possui característica específica quanto a frequência de ressonância, ganho de intensidade sonora e faixa de funcionamento (FONSECA, 2007). O projeto de caixas acústicas considera as seguintes características do transdutor utilizado: i) volume de ar deslocado na movimentação do transdutor, ii) coeficiente de direcionamento e iii) ressonância ao ar livre. Já as características mecânicas da caixa acústica definem parâmetros como: i) ganho do sistema, ii) ruído da ondulação e iii) volume de ar deslocado.

2.2.1 Adição de fontes sonoras

É possível aumentar o nível de intensidade do som ao utilizar fontes sonoras simultaneamente. O nível de pressão sonora resultante não é dado pelo somatório individual do SPL de cada fonte. O valor resultante da adição de fontes p_t é o somatório da pressão acústica de cada fonte, dado por:

$$p_t = p_{1(t)} + p_{2(t)} + \cdots + p_{n(t)} \tag{2.13}$$

Porém, é necessário verificar a pressão *rms* e o nível de pressão sonora correspondente. Logo, deve-se avaliar o somatório em relação ao modo de funcionamento das fontes, como: i) coerentes e ii) incoerentes. Fontes sonoras coerentes produzem a mesma forma de onda em função do tempo, as pressões sonoras devem ser somadas considerando a fase das ondas. Desta forma, esta união de fontes pode ser: i) destrutiva, quando fora de fase e cancelam a pressão ou ii) construtiva, quando as ondas estiverem em fase gerando aumento na pressão (TEMPLETON; SAUNDERS, 2014).

Para fontes exatamente em fase, a pressão resultante p_{rms}, é a soma da pressão *rms* produzida por cada onda, dado por:

$$p_{rms} = p_{rms_1} + p_{rms_2} + \cdots + p_{rms_n} \tag{2.14}$$

Para duas fontes idênticas, p_1 e p_2 o nível de pressão sonora resultante será $6dB$ maior que o individual, como dado por (2.15). Este aumento pode ocorrer também quando a onda é refletida em superfície rígida (BERANEK; MELLOW, 2012).

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 20\log\left(\frac{p_t}{p_0}\right) = 20\log\left(\frac{2p_1}{p_0}\right) \\ &= 20\log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) + 20\log(2) \\ &= \text{SPL}_1 + 6 \quad [dB] \end{aligned} \tag{2.15}$$

onde, SPL_1 é o nível de pressão sonora de cada fonte sonora.

Fontes sonoras incoerentes não possuem relação fixa de fase. A pressão acústica resultante é dada pela raiz quadrada do somatório do quadrado das potências individuais. Desta forma, para análise de duas fontes, o aumento do SPL é de $3dB$.

Para que na adição de fontes incoerentes se obtenha o ganho de $6dB$ é necessário a associação de quatro fontes sonoras.

A variação da pressão sonora resulta em vibrações mecânicas ligadas diretamente à estrutura do material. A necessidade do estudo de vibrações se dá devido a interação entre energia acústica gerada por transdutores acústicos e corpos rígidos afetados por esta energia.

2.3 Ondulatória, vibração e choque

Para aplicações de acústica e vibração é necessário conhecimento de ondulatória e o sistema utilizado como modelo introdutório é o oscilador harmônico simples, formado pelo sistema massa-mola. Analisando pequenos deslocamentos, sua oscilação é senoidal em única frequência de ressonância (REYNOLDS, 1981). Sistemas harmônicos simples são regidos pela Lei de Hooke $F = -kx$ e pela lei do movimento de Newton $F = ma$ (CHEEKE, 2016). Desta forma, para o sistema massa-mola, tem-se:

$$F = m\frac{d^2x}{dt^2} \rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \tag{2.16}$$

Considerando o movimento harmônico, define-se a velocidade angular como sendo $\omega_0^2 = km$, e o deslocamento é dado por:

$$x = A_1 \cos(\omega_0 t) + A_2 \sin(\omega_0 \tau) \tag{2.17}$$

Para este sistema, representado por equação diferencial de segunda ordem, a solução possui duas constantes arbitrarias: i) angulo de fase ϕ_0 e ii) velocidade angular ω_0, obtidas através do período τ e da frequência f, definidos pelas condições iniciais. A solução é dada por:

$$x = A \sin(\omega_0 \tau + \phi_0) \tag{2.18}$$

Utilizando manipulações algébricas e substituindo as condições iniciais para $t = 0$ define-se a condição de deslocamento inicial $x = 0$ e a velocidade inicial v_0, têm-se:

$$A = \left[x_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega_o} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.19}$$

$$\phi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{-v}{\omega_0 x_0}\right) \tag{2.20}$$

Aplicando (2.20) em (2.18) tem-se o valor da velocidade v e aceleração a dados por (2.21) e (2.22), desta forma, deduzindo o deslocamento e velocidade em relação ao deslocamento e a fase.

$$v = v_m \cos(\omega_0 t + \phi_0) \tag{2.21}$$

$$a = -\omega_0 v_m \sin(\omega_0 t + \phi_0) \tag{2.22}$$

Em acústica v é equivalente a velocidade do som no meio e a é a aceleração, que é parâmetro característico do meio relacionado com a densidade específica. Os sistemas mecânicos possuem energia vibracional, que é definida como a energia total U, que é o somatório da energia potencial U_p e a energia cinética U_k. Utilizando o sistema massa-mola, têm-se:

$$\begin{aligned} U &= U_p + U_k = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2 \\ U &= \frac{1}{2} kA^2 = \frac{1}{2} mv_0^2 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Os termos choque e vibração são geralmente utilizados para referir a excitação mecânica que causa resposta dinâmica em determinado sistema físico. Especificamente, choque é a excitação dinâmica com duração relativamente curta e vibração é a excitação dinâmica com duração relativamente longa, quando comparado ao tempo para o sistema físico responder a vibração (HARRIS; PIERSOL, 2009).

Os sistemas vibratórios são divididos em: i) armazenamento de energia potencial (mola), ii) armazenamento de energia cinética (massa ou inércia) e iii) perda gradual de energia (amortecimento). A vibração de sistemas envolve a transferência alternada de energia entre suas formas potencial e cinética. Em sistemas amortecidos, parte da energia é dissipada a cada ciclo de vibração e deve ser substituída por fonte externa se for mantida vibração constante (BLAKE, 2009).

Quando o sistema possui vibração em resposta a excitação contínua, cuja magnitude varia de forma senoidal com o tempo, tem-se a vibração forçada. A excitação do sistema pode ser força aplicada ao sistema ou movimento da base que suporta o mesmo. A vibração resultante do sistema é expressa de acordo com a natureza e objetivo da excitação.

Se a excitação é a força aplicada em sistema massa-mola, o resultado é expresso em termos de: i) amplitude do movimento da massa, ou ii) fração da força aplicada que é transmitida em forma de amplitude pelo sistema de sustentação, o que é conhecido como transmissibilidade de força. Se a excitação é obtida pelo movimento da base, a resultante usualmente é expressa em relação a amplitude do movimento da massa em relação a amplitude do movimento da base, que é conhecida com transmissibilidade de movimento (REYNOLDS, 1981).

2.3.1 Vibração induzida acusticamente

Campos de pressão acústicos podem ser determinísticos ou aleatórios, estacionários ou não-estacionários e homogêneos ou não-homogêneos. Pressões determinísticas são periódicas ou quase-periódicas e podem ser descritas por funções dependentes do tempo. As pressões aleatórias podem ser descritas somente em termos estatísticos. Campos de pressão estacionária possuem propriedades que são, em geral, invariantes no tempo, diferentemente dos campos não-estacionários. A principal característica dos campos sonoros é que as alterações de pressão são distribuídas em toda sua área de influência na estrutura excitada. A resposta desta estrutura depende das propriedades do campo, pressão sonora, frequências envolvidas, distribuição espacial do nível de pressão sonora e fase, além do tempo de exposição (WILBY, 2009).

Estruturas rígidas expostas a campo sonoro através dos fluidos em sua vizinhança respondem à variação de pressão gerada no encontro dos fluidos no sistema. O processo de transmissão de energia sonora pelo ar entre dois meios envolve a resposta vibracional devido a pressão sonora no primeiro meio, juntamente com a radiação sonora no segundo meio, provocando pequeno deslocamento transversal das estruturas. Este processo dá origem ao desgaste induzido acusticamente, o qual foi estudado primeiramente para a pressão sonora gerada por aviões com turbina à jato que causa danos nas estruturas envolvidas (FAHY; GARDONIO, 2007).

A característica de resposta do sistema ao som incidente é estreitamente ligada aos parâmetros de radiação do som. Esta característica é propriedade fundamental para análise de fontes e campos sonoros, expressando o princípio da reciprocidade. Reci-

procidade acústica no domínio da frequência é aplicada essencialmente nas relações entre amplitude harmônica e fases de entrada e saída em pontos discretos.

A transmissão acústica é definida e mensurada em termos de potência. Consequentemente, não podendo ser aplicada diretamente a este problema, sendo necessário a utilização de considerações em relação ao relacionamento entre amplitude de pressão complexa e amplitude de potência sonora. Para isto, utiliza-se perda na transmissão que é relacionada a razão pressão e intensidade sonora (FAHY, 2003).

2.4 Considerações Finais

Variações de pressão em meio material geram ruídos sonoros. Quando esta variação é gerada através de transdutores eletroacústicos tem-se o controle eletrônico do som gerado. O aumento da intensidade sonora é dado pelo aumento da tensão aplicada no transdutor ou pelo somatório de transdutores. Com a elevação da intensidade sonora tem-se o aumento da influência do som no meio, gerando vibração em estruturas sujeitas a esta variação de pressão. A vibração gerada varia com a frequência da fonte sonora. Desta forma, tem-se a possibilidade de gerar vibração controlada em estruturas de acordo com a frequência utilizada nos transdutores. Os conceitos descritos neste capítulo serão utilizados para entender as aplicações descritas nos próximos capítulos.

CAPÍTULO 3

EVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS NA AGRICULTURA

Este capítulo apresenta a evolução da agricultura auxiliada pela engenharia ao desenvolver novas técnicas e dispositivos. Aborda a evolução obtida em pesquisa, manejo e colheita. Apresenta a agricultura de precisão e a forma como esta definição se alterou com o desenvolvimento das tecnologias. Apresenta ainda a análise de técnicas de acústicas que são aplicadas na agricultura e as que podem ser utilizadas no desenvolvimento de equipamentos.

3.1 Desenvolvimento Agrícola

O desenvolvimento da agricultura permite que a espécie humana obtenha domínio sobre o mundo natural. A condição de caçador coletor evolui de forma a promover a modificação do meio ambiente conforme as necessidades humanas. Mesmo com esta evolução, parte da população mundial possui como principal fonte de energia poucas espécies de plantas e animais. Desta forma, a agricultura se apresenta como avanço que permite a evolução humana (BARKER; GOUCHER, 2015).

A agricultura como praticada atualmente é fruto de seguidas revoluções. A primeira ocorre entre o século XVI e XIX com a utilização de tração animal para agilizar o plantio e transporte de mercadorias. Esta primeira revolução dos tempos modernos possibilita aumento na população e melhoria na qualidade da dieta, evolução industrial e fortalecimento da urbanização. Apesar disto, a produtividade de forma geral está limitada a qualidade dos sistemas de produção e transporte, levando a saturação do mercado agrícola, com produção maior que o consumo em diversas localidades (HARLAN, 1971)

A segunda revolução agrícola ocorre no final do século XIX, em que novas técnicas baseadas na motorização e mecanização de equipamentos, fertilizantes sintéticos, seleção de sementes e especialização das áreas de produção são inseridas no meio agrícola. A indústria possui novos meios de transporte, como navios e trens; equipamentos mecânicos têm funcionalidades melhoradas, motores elétricos e de combustão interna começam a ser utilizados possibilitando a criação de novas máquinas e implementos agrícolas. Esta revolução resulta no incremento de produção devido a melhor qualidade de sementes e fertilizantes, reduz a mão de obra e aumenta a área cultivada por trabalhador, devido a motomecanização (MAZOYER; ROUDART, 2007).

A terceira revolução agrícola é a que ocorre atualmente, com a efetiva implemen-

tação da agricultura de precisão. O fator importante é a elevada quantidade de dados obtidos através das novas técnicas de sensoriamento remoto, possibilitando novas técnicas de manejo agrícola. A análise ambiental é cada vez mais importante, onde o aumento de produtividade e a redução do impacto ambiental se tornam metas (SHIVA, 2016).

Lombardo et al. (2017) e Zambon et al. (2019) indicam que a quarta revolução agrícola está em curso e se origina juntamente com as tecnologias que permitem as fazendas inteligentes (*Smart Farm*) e a agricultura 4.0. Estas tecnologias lidam com a automatização e informatização do campo, de forma que o agricultor tenha conhecimento detalhado da sua lavoura e auxilio computacional para tomada de decisões.

Atualmente a agricultura relaciona sociedade e meio ambiente, gerando estudos sobre questões ambientais e sustentabilidade aplicados ao agronegócio. Desta forma, tem-se a necessidade de sistemas confiáveis para redução dos impactos ambientais nestas atividades (VITOUSEK et al., 2009). O aumento da população mundial exerce pressão sobre sistemas de produção agrícola eficientes. Estes sistemas devem suprir as necessidades de produção alimentícia, se adaptando de acordo com as condições de ambiente e mercado (FOLEY et al., 2011).

3.2 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão é o termo que caracteriza o manejo específico do solo com detalhamento local, identificando a variabilidade e planejando o manejo do solo de acordo com as características específicas de cada talhão. Para isto são utilizados: i) análise do solo, ii) mapas de produtividade e iii) ferramentas de gerenciamento agrícola (BALAFOUTIS et al., 2017). Estas informações são georreferenciadas possibilitando a caracterização de zonas de manejo. Pedersen e Lind (2017) indicam que outro termo utilizado é agricultura inteligente, que inclui equipamentos controlados como tratores guiados por GPS, dispositivos autônomos como utilizados em aplicações de taxa variável e sistemas robóticos em geral. A definição segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), é sistema de gerenciamento agrícola com base na varição espacial e temporal da unidade produtiva que visa o aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito da atividade agrícola no ambiente (BRASIL, 2012)

Segundo Molin (1997), a utilização de zonas específicas de manejo inicia-se em 1929 com os pesquisadores Linsley e Bauer da Universidade de Illinois, que dividem o

terreno em quadrantes para realização de testes e correção do pH em área de $17ha$ com base na análise de 23 amostras de solo, possibilitando o manejo específico e alcançando elevada produção. Porém, com a expansão da utilização de máquinas agrícolas, a individualização de zonas de manejo é inviabilizada devido as extensas áreas cultivadas (SHIRATSUCHI, 2001).

Segundo Mantovani et al. (2000), a partir da década de 1980 a evolução tecnológica viabiliza a utilização de sistemas de informações geográficas, técnicas de monitoramento e sensoriamento. Este desenvolvimento auxilia o manejo em zonas específicas, retomando os estudos sobre a agricultura de precisão. Este fato possibilita a evolução conforme as necessidades das técnicas de manejo específico do solo, de acordo com a variabilidade temporal e espacial, variedade plantada e características locais de cada lavoura. Desta forma, promove-se a utilização de máquinas de forma inteligente e eficaz (BLACKMORE et al., 2009).

A evolução da engenharia permite o desenvolvimento de novos equipamentos agrícolas, máquinas menores, leves e flexíveis, reduzindo desperdício e o impacto ambiental, produzindo sustentabilidade da agricultura. A robótica obtém espaço na agricultura e gera novas possibilidades de intervenção no campo e no tratamento da elevada quantidade de dados disponibilizados para análise (DUCKETT et al., 2018).

Segundo Vilela e Rech Filho (2017), o Brasil possui fontes abundantes de recursos naturais que são preservadas com os efeitos da redução do uso da terra. Esta redução é resultado do aumento de produtividade na agricultura brasileira nas últimas décadas devido a evolução da agricultura de precisão. Em termos gerais, este aumento é apresentado em duas frentes: i) tecnologias para redução do uso da terra e ii) tecnologias para redução de mão de obra.

3.3 Tecnologias implementadas

O desenvolvimento de novas tecnologias juntamente com a evolução das aplicações de automação agrícola tornam viáveis as aplicações de robótica e automação no campo. Diversas são as tecnologias existentes a nível laboratorial, porém são necessários testes em cenários controlados antes de serem realmente aplicadas no campo. Algumas tecnologias de monitoramento e maquinários utilizados no campo foram desenvolvidas com outras finalidades e após as devidas adaptações, estão disponíveis comercialmente no meio agrícola, por exemplo veículos autônomos, inteligência artificial e visão computacional (FOUNTAS et al., 2015).

A integração de sistemas sensoriais autônomos possui potencial para realizar aferições que não podem ser obtidas de forma manual. Estes sistemas permitem mapear com precisão áreas agrícolas (BARRETT, 2013). Avanços significativos no campo de imageamento aéreo possibilitam o monitoramento do campo com elevada resolução temporal, espacial e custo acessível. Outra forma de aquisição de dados é baseada em robôs compactos que permitem a aquisição de dados específicos do solo, como umidade e compactação em locais indicados com base em dados históricos ou análise de imagem (FAGNANT; KOCKELMAN, 2015).

Para obter aceitação e geração de lucro é necessário considerar o processo completo, iniciando na preparação e manejo do solo até os procedimentos da colheita e pós-colheita, auxiliando no gerenciamento de toda propriedade (DUCKETT et al., 2018). Nas últimas décadas, novas tecnologias estão em desenvolvimento ou em utilização, na qual as tecnologias utilizadas na agricultura de precisão são dividias em: i) tecnologias de aquisição de dados, ii) tecnologias de análise e verificação de dados e iii) tecnologias para equipamentos. Desta forma, integrando todos os ciclos da agricultura de precisão e gerando o conceito de Fazenda Inteligente (*Smart Farm*) (BALAFOUTIS et al., 2017). Este conceito é baseado na elevada quantidade de dados e interpretações geradas através da análise destes dados.

Estas tecnologias são divididas em localização, aquisição e posicionamento (GRIFFIN et al., 2017). A localização e o posicionamento são realizados utilizando sistema de posicionamento global (GPS), que é utilizado para armazenamento de informações georreferenciadas ou para o posicionamento de máquinas no campo. Tecnologias de mapeamento utilizam os dados adquiridos para construção de mapas de elevação, qualidade do solo, monitoramento de plantações entre outros.

As tecnologias de aquisição de dados contemplam aplicações como levantamento de requisitos, mapeamento, navegação e sensoriamento. Estas tecnologias são utilizadas para monitoramento do campo e de características da plantação, gerando curvas históricas e auxiliando no manejo agrícola. A aquisição de dados é realizada diretamente com a análise do solo e o monitoramento da colheita, ou indiretamente, através de imagens capturadas com câmeras RGB ou câmeras infravermelho (IR) ou infravermelho próximo (NIR) e até câmeras hiperespectrais (TOTH; JÓŹKÓW, 2016).

Tecnologias de análise e verificação de dados utilizam modelos gerados a partir de dados adquiridos do sistema real. Estes modelos são simulados computacionalmente e geram sistemas de decisão que são utilizados para gerenciamento. Este gerenciamento pode ser baseado na análise de dado histórico da plantação ou em dados

adquiridos durante a safra. Estas análises são realizadas a partir do tratamento dos dados obtidos e são utilizadas em aplicações como delimitação de zonas de manejo (MZUKU et al., 2005), sistemas de suporte a decisões (JAKKU; THORBURN, 2010), sistemas de informações para o manejo agrícola (SØRENSEN et al., 2010) entre outros.

As novas tecnologias são utilizadas para implementação de equipamentos na agricultura de precisão. Estes equipamentos contemplam desde a aplicação de produtos fitossanitários com taxa variável e direcionamento de aplicações até equipamentos de preparo do solo, plantio, manejo, colheita e tratamentos pós colheita (PEDERSEN; LIND, 2017).

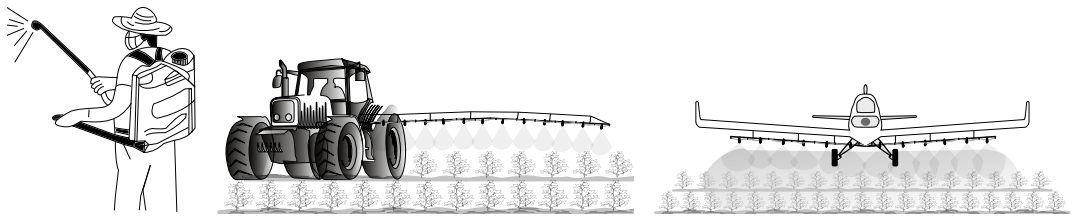
3.3.1 Técnicas de aplicação de produtos fitossanitários

Segundo Furlanetti et al. (2001) as técnicas de aplicação de produtos fitossanitários possuem como objetivo o alcance do produto biologicamente ativo no alvo, em quantidade adequada e com o mínimo de contaminação de outras áreas. Dentre as primeiras máquinas a realizar esta aplicação, destaca-se a polvilhadeira costal, para aplicação de defensivos em forma de pó, construída com tecnologia nacional em 1948 e reformulada em 1958 para utilização de soluções diluídas, dando origem ao pulverizador costal atual (SOUZA et al., 2010).

Geralmente é aplicado o termo agrotóxico para definir produto fitossanitário, porém, o termo agrotóxico é amplo. De acordo com a legislação brasileira, inclui processos e substâncias que controlam pragas, ervas daninhas, insetos e doenças. O termo agrotóxico se refere não apenas as pragas agrícolas, mas também pragas não agrícolas e urbanas. Desta forma, tratando de manejo de pragas agrícolas com a utilização de substâncias químicas ou biológicas, utiliza-se os termos: produto fitossanitário, defensivo agrícola, agroquímico, pesticida, praguicida e outros, sendo o termo produto fitossanitário indicado para textos técnicos/científicos (ALONÇO et al., 2018).

Segundo Souza et al. (2010) a evolução das técnicas de aplicação de produtos fitossanitários ocorre de acordo com a necessidade das culturas, em 1972 surge pulverizadores com tração animal, possuindo maior capacidade para combater a ferrugem do café. Na década de 1980 surgem pulverizadores de longo alcance para utilização em culturas arbóreas, em 1990 são utilizados pulverizadores de longo alcance em culturas perenes, nos anos 2000 tem-se a aplicação bilateral utilizando ventiladores para direcionamento da aplicação. Atualmente, tem-se a aplicação utilizando cortinas de ar e eletrificação das folhas para garantir o alcance do alvo biológico (LIMA et al., 2019).

O maquinário utilizado para a aplicação de produtos fitossanitários varia de acordo com a lavoura. A Figura 3.1, adaptada de Bonadio et al. (2015), ilustra os principais tipos de pulverizadores utilizados. Pulverizadores costais são utilizados em pequenas áreas ou para manejo em locais específicos. Com o aumento da área de aplicação, são utilizadas máquinas motorizadas com longos braços para pulverização, possibilitando a cobertura de extensas áreas com apenas uma aplicação. Existe também técnicas para pulverização aérea, utilizando aviões de pequeno porte, possibilitando elevado alcance em pouco tempo de aplicação (TANIWAKI; SAKURAI, 2010).



(a) (b) (c)

Figura 3.1 - Pulverizadores: (a) costal, (b) propelido e (c) aéreo.

O principal problema relacionado a aplicação é a deriva do produto, que é a perda da calda fitossanitária. A deriva ocorre devido ao diâmetro e peso das gotas, direção do vento e temperatura, ocasionando evaporação, escorrimento e/ou deslocamento, gerando aumento nos custos de produção e deposição do produto fitossanitário em lugares indesejados, como ilustra a Figura 3.2, adaptada de Campanhola e Bettiol (2003). De acordo com Chaim (2009), no Manual de Tecnologia de Aplicação divulgado pela Associação Nacional de Defesa Vegetal, as derivas são classificadas em dois tipos: i) endoderiva, que é a perda do produto dentro dos domínios da cultura com escorrimento ocasionado pelo excesso de calda ou gotas de tamanhos diferentes do ideal e ii) exoderiva, que é a perda do produto fora dos domínios da cultura em que as gotas são levadas por correntes de ar e a evaporação.

Nas técnicas de pulverização agrícola o produto é aplicado na parte superior das folhas, porém, parte das doenças que acometem as plantas são conhecidas como doenças de **baixeiro**, devido ao fato do alvo biológico[1] está localizado na parte inferior das folhas (ROMÁN et al., 2009). Para que o produto (alvo químico) alcance o alvo biológico existem algumas técnicas acessórias como aumentar a quantidade de calda necessária, aplicar utilizando cortina de ar e eletrizar as gotas, direcionando

[1]Segundo Chaim (2009), alvo biológico neste caso é a praga a ser controlada durante a pulverização.

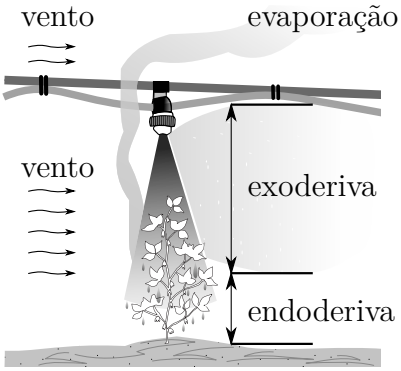


Figura 3.2 - Tipos de deriva em pulverização agrícola.

a aplicação do alvo químico para o alvo biológico (SASAKI et al., 2013).

Pesquisas relacionadas a aplicação de produtos fitossanitários utilizando taxa variável de aplicação são focadas principalmente em herbicidas. Entretanto, alguns estudos promovem a detecção de doenças utilizando aplicação em taxa variável de fungicidas (JØRGENSEN et al., 2007). Tratamento preventivo e em locais específicos com inseticidas é trabalho árduo devido a dificuldade de monitorar insetos no campo. Este fato torna-se mais difícil quando o problema é com plantas daninhas que possuem distribuição parcial no campo e algumas doenças que ocorrem em áreas específicas (CHECHETTO et al., 2017).

A necessidade de utilização destes produtos é amplamente conhecida por produtores rurais, porém as dificuldades de se realizar a aplicação de taxa variável, diversas vezes ultrapassa os benefícios obtidos pela aplicação (PEDERSEN et al., 2004). Esta tecnologia é apresentada em diversos estudos como: i) aplicações de alta precisão utilizando micro jatos aplicadores (SOGAARD; LUND, 2005), ii) seleção do tipo de bico de aplicação, controle do fluxo e redução da sobreposição (SAMA et al., 2016; LUCK et al., 2010), iii) aplicação direta (VONDRICKA; LAMMERS, 2009), iv) detecção rápida de plantas daninhas utilizando imagens (BLASCO et al., 2002; AHMAD et al., 2018), v) sistemas de suporte à decisão para indicar a menor dose de herbicida recomendado (BERTI et al., 2003; SØNDERSKOV et al., 2015) entre outros.

Existem vários estudos com o intuito de determinar o modo eficiente para o controle de plantas daninhas, doenças e insetos ao menor custo possível. Isto permite ao produtor elevar a capacidade de pulverização e a eficiência da mesma enquanto reduz a quantidade da calda necessária. Outro fator importante é a redução do tempo utilizado em atividades como manejo manual de pragas e doenças. Há importância

no suporte à tomada de decisões, indicando o produto fitossanitário e a quantidade a ser aplicada sem reduzir a eficácia, além de reduzir a utilização incorreta e consequentemente o impacto ambiental (PEDERSEN; LIND, 2017).

3.3.2 Técnicas de derriça de frutos

A derriça consiste basicamente na colheita dos frutos. Com o aumento dos tamanhos das lavouras teve-se a necessidade de criar máquinas para executar o trabalho de coleta de frutos. Tais máquinas são no princípio simples, geralmente baseadas na vibração de hastes para promover a queda dos frutos da planta. Com o surgimento da agricultura de precisão, teve-se a necessidade de realizar a derriça seletiva dos frutos pois, frutos colhidos com maturidade uniforme possuem valor comercial elevado (DUAN et al., 2012). A queda de frutos verdes na derriça mecanizada causa prejuízos devido a perdas no peso do grão, reduzindo o rendimento da colheita, aumentando o desgaste da planta ocorrido pela necessidade de aplicar maior força para coletar o grão verde e no processo de secagem que gera perdas devido a fermentação do grão ainda verde (ALVES et al., 2015).

A derriça seletiva implica na colheita apenas dos frutos que atingem determinada qualidade ou grau de maturação, preferencialmente realizada entre limites específicos, evitando a colheita de grãos verdes ou com estágio de maturação avançado (ZHANG; PIERCE, 2013). A seletividade é alcançada de forma manual ou automatizada. Na forma manual é utilizado dispositivo derriçador portátil, ilustrado na Figura 3.3, em que é informado ao operador a amplitude de vibração e o tempo de operação que é utilizado no galho escolhido visualmente, que deve ter acima de 80% de grãos maduros (BARBOSA et al., 2005).

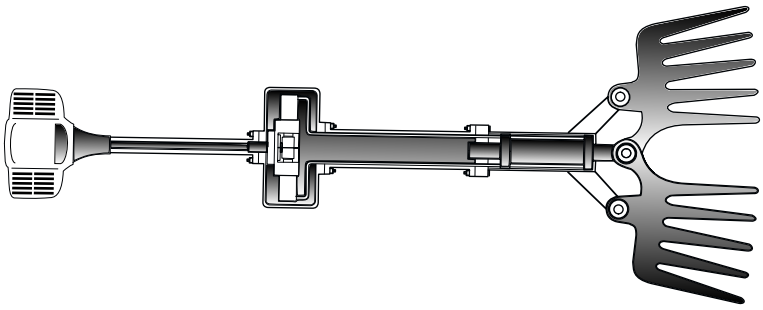


Figura 3.3 - Equipamento de derriça manual.

Para derriça seletiva automatizada são necessários dois procedimentos: i) identifica-

ção do fator qualitativo dos frutos em campo e ii) capacidade de realizar a derriça apenas dos frutos de interesse sem danificar o restante da plantação. Os principais desafios da técnica estão em identificar o fruto no ambiente das plantações e o desenvolvimento de tecnologias para promover a derriça em tempo hábil (BAC et al., 2014).

A identificação destes dois procedimentos é baseada em visão computacional aplicada para reconhecimento, segmentação, localização e posicionamento. A tecnologia baseada em visão necessita da utilização de robôs especializados, que são robustos, precisos e adaptados para cada plantação e modo de cultivo (NARENDRA; HAREESHA, 2010). Robôs para esta finalidade possuem alto custo financeiro, sendo necessário adaptar as funções devido a sazonalidade das colheitas. Desta forma, o mesmo robô pode ser utilizado para retirar frutos individualmente ou balançar a planta em determinada frequência para que apenas frutos maduros sejam colhidos (DUCKETT et al., 2018).

Outro modo de realizar a derriça seletiva de grãos é através da evolução direta das tradicionais máquinas de derriça baseadas em hastes vibratórias, como ilustrado na Figura 3.4, adaptada de Queiroz et al. (2007). Ao utilizar controle em frequência e amplitude da vibração das hastes têm-se a seletividade dos frutos colhidos (NORRIS, 2001). Esta técnica de derriça possui elevada complexidade pois diversos fatores influenciam na frequência ideal de vibração, como grau de maturação (QUEIROZ et al., 2007), quantidade de frutos e tamanho dos galhos (GUEDES, 2011).

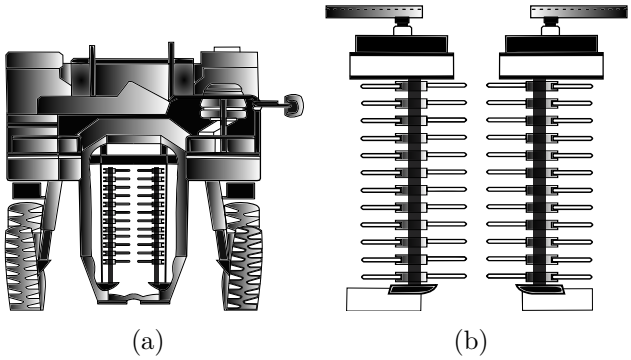


Figura 3.4 - Máquina derriçadora: (a) vista frontal da máquina de derriça e (b) detalhe do mecanismo de derriça.

As máquinas de derriça baseadas em hastes vibratórias apresentam problemática em relação ao estado da planta pós-colheita. A derriça completa dos frutos gera

estresse físico para a planta, reduzindo a vida útil e acentuando a diferença de rendimento entre duas safras (TASCÓN, 2005). Na derriça mecanizada as plantas são direcionadas para o interior da máquina, que possui mecanismo de hastes rígidas vibratórias, que ao oscilarem realizam a derriça dos grãos. Entretanto estas hastes geram desgastes nas plantas causado perda de folhas e quebra de galhos (SILVA et al., 2002). O modo de funcionamento e o monitoramento do desgaste (antes e depois) na planta é ilustrado na Figura 3.5, adaptada de Silva et al. (2006).

Figura 3.5 - Desgaste causado pela derriça mecânica.

3.3.3 Técnicas acústicas

Técnicas acústicas são utilizadas em aplicações agrícolas em diversas áreas, tais como: i) cancelamento de ruido para conforto de operadores de máquinas agrícolas (GULYAS et al., v. 1, p. 11–22, 2002), ii) geração de sons específicos para controle biológico, afastando seres indesejados ao mimetizar o som de seus predadores ou atraindo outros seres utilizando sons de sua própria espécie (MANKIN et al., 2012), iii) derriça de frutos ou grãos, no qual o controle da vibração possibilita melhor eficiência na colheita (NORRIS, 2001), iv) vibração para separação de grãos de diferentes graus de maturação (KRUEGER et al., 2007) entre outros.

Dispositivos ultrassônicos são utilizados na agricultura em aplicações como: i) aumento da taxa de germinação de sementes, reduzindo o período de crescimento em até três semanas ao reduzir a dormência das sementes, possibilitando o aumento de uma para duas safras por estação (GOUSSOUS et al., 2010) e ii) aumento da taxa de crescimento em plantações, ao aumentar o metabolismo das plantas através da aceleração da produção de determinadas enzimas responsáveis pelo crescimento das plantas (GORDON, 1963).

3.4 Considerações Finais

A utilização e o desenvolvimento de novas técnicas permitem a evolução da agricultura, gerando novos equipamentos e obtendo melhor utilização do solo. Para o desenvolvimento de novas técnicas é necessário o estudo completo do ambiente na qual serão aplicadas. Desta forma, é necessária a utilização de técnicas de modelagem e simulação para realizar testes na técnica desenvolvida, reduzindo assim o tempo e custo de desenvolvimento e validação da técnica. Os conhecimentos descrito neste capítulo auxiliará o entendimento das técnicas apresentadas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Este capítulo apresenta as definições necessárias para realizar simulações em redução de escala. Inicialmente são apresentadas as diferenças entre sistema e modelo, a seguir são definidos simulação, similitude e redução de escala. São apresentados os elementos da acústica que serão utilizados para modelagem, juntamente com a teoria base da construção de caixas acústicas relacionando parâmetros elétricos, mecânicos e acústicos. Por fim, é apresentado a modelagem do desgaste devido a vibração induzida acusticamente.

4.1 Sistema e modelo

Estudos envolvendo modelagem e simulação necessitam da análise de características do modelo e definição do sistema modelado para então definir o tipo de simulação adequada. Logo, para a construção correta de simuladores é necessário entender os termos: i) sistema, ii) modelo e iii) simulação. Sistema é a parte do mundo real que se deseja estudar, a união de elementos e características interligados de forma específica que ao serem avaliadas em conjunto produzem resultado único, que não poderia ser obtido utilizando estes elementos individualmente (RECHTIN; MAIER, 2010). O modo que o sistema se comporta é propriedade única relativa a iteração entre os elementos deste sistema com o próprio sistema e com outros elementos de outros sistemas (OCHOA et al., 1999).

A representação do sistema real é o modelo e para sua construção devem ser escolhidos os elementos que possuem maior representatividade para a aplicação. Modelos são desenvolvidos para observar características específicas do sistema e de acordo com os elementos analisados podem ser construídos diversos modelos do mesmo sistema (MELLO, 2007). Desta forma, é gerado modelo funcional do sistema, no qual devem ser analisados os elementos que possuam real influência no funcionamento do modelo (CHWIF; MEDINA, 2007).

Simulação é o teste do modelo utilizando parâmetros de entrada de forma a obter resultados equivalente ao sistema estudado. A simulação pode ser baseada em modelo físico ou matemático. O modelo físico da simulação é o protótipo, construído respeitando parâmetros de similaridade geométrica e princípios de análise dimensional. No modelo matemático, são utilizadas as expressões que regem o sistema, e com a alteração em parâmetros de entrada são obtidos valores como resultado da

simulação.

A simulação pode ser realizada de forma manual ou computacional e esta escolha é definida pelo modelo utilizado. Para obter valores de saída (resposta do modelo) coerentes é importante desenvolver simulação com modelo adequado, pois modelos extremamente detalhados tornam-se virtualmente impossíveis de obter resultados em tempo hábil, do mesmo modo que modelos demasiadamente simples podem deixar de exibir resultados importantes devido a exclusão de alguma variável (CHWIF; MEDINA, 2007). A simulação computacional é amplamente utilizada em áreas da ciência e tecnologia, onde através de sua utilização é reduzido o investimento financeiro no desenvolvimento de projetos.

4.2 Similitude e redução escala

A teoria de similitude é a parte da engenharia que estuda os fatores necessários para estabelecer condições de similaridade entre fenômenos. É amplamente utilizada em análise de estruturas, vibrações, processos químicos e outros. Critérios de similitude auxiliam na geração de modelos, possibilitando correlação com outros sistemas em que as análises são realizadas com menor complexidade que os originais (COUTINHO, 2017).

Caso sejam respeitados os parâmetros iniciais e as condições de similaridade material e geométrica os fenômenos podem ser reproduzidos em protótipos de diferentes escalas possuindo a mesma evolução. Fenômenos de diversas áreas da ciência podem ser utilizados para fins de comparação a outros fenômenos semelhantes de forma a obter a solução do problema. O tipo do problema a ser estudado determina a escolha de quais são os parâmetros relevantes, que devem ser comum a ambos fenômenos e quais são irrelevantes, podendo ser descartados (COUTINHO et al., 2018).

A teoria da similitude indica as condições necessárias para a construção de modelos em escala[1] de forma a obter respostas válidas para o sistema analisado. Os testes de modelos em escala é ferramenta importante na construção, auxiliando na previsão do comportamento do sistema ao utilizar teoria de redução de escala para obter resultados experimentais (CASABURO et al., 2019). Szűcs (1980) divide o estudo da similitude de acordo com os parâmetros analisados em: i) similitude geométrica na qual as características são igualmente escalonadas, ii) similitude cinemática na qual

[1]Modelos em escala descrevem efeitos externos ocasionados por mudanças geométricas dimensionais da estrutura analisada além de variações de força, resistência e rigidez dos materiais devido a variação do tamanho (WISSMANN, 1968).

as características são semelhantes em tempos semelhantes e iii) similitude dinâmica na qual partes semelhantes do sistema são sujeitas a forças similares.

Langhaar (1951) define similaridade de forma matemática, onde determinada função f' é similar a função f de acordo com a razão constante f'/f quando avaliada em situações análogas. A razão $\lambda = f'/f$ é chamada de fator de escala da função f. Posteriormente, Szűcs (1980), define que a condição necessária para existir similitude entre sistemas é que o modelo matemático de um seja relacionado ao outro através de transformação biunívoca. Logo, dada os vetores característicos do protótipo X_p e do modelo X_m, contendo todos parâmetros e variáveis do sistema, pode-se encontrar a matriz de transformação $[\Lambda]$, dado por:

$$X_p = [\Lambda] X_m \tag{4.1}$$

De (4.1) é possível afirmar que os modelos permitem a prévia verificação de similaridade entre sistemas de acordo com os parâmetros aos quais estão submetidos. Westine et al. (2012) afirmam que de acordo com o cumprimento das condições de similitude os modelos podem ser divididos em: i) modelo real no qual todas as condições são satisfeitas e neste caso tem-se a similitude completa, ii) modelo adequado em que são satisfeitas as condições relativas aos parâmetros principais, obtendo similitude de primeira ordem e iii) modelo distorcido no qual pelo menos um dos parâmetros principais não é satisfeito e neste caso tem-se similitude parcial.

A análise dimensional é método tradicional de similaridade e é baseada na definição de conjunto de parâmetros que regem o fenômeno de interesse (COUTINHO et al., 2018). Buckingham (1914) afirma que a análise dimensional é derivada conceitualmente da homogeneidade dimensional e desta forma, a expressão que descreve determinado fenômeno físico deve possuir a mesma dimensão em ambos os lados. Estes conceitos são utilizados no Teorema de Buckingham Π, no qual é enunciado que a partir do número de dimensões fundamentais κ necessárias para descrever as n variáveis físicas e que P_1, P_2, ..., P_n representem as n variáveis físicas, atribui-se a correlação, dada por:

$$f_1\left(P_1, P_2, \ldots, P_n\right) = 0 \tag{4.2}$$

Podendo ser rearranjada em termos de $n - \kappa$ variáveis adimensionais, conhecidas

como variáveis Π, dado por:

$$f_2\left(\Pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_{n-\kappa}\right) = 0 \tag{4.3}$$

Cada variável Π é produto adimensional de $\kappa + 1$ variável física, mantendo a generalização, desta forma, têm-se:

$$\begin{cases} \Pi_1 &= f_3\left(P_1, P_2, \ldots, P_\kappa, P_{\kappa+1}\right) \\ \Pi_2 &= f_4\left(P_1, P_2, \ldots, P_\kappa, P_{\kappa+2}\right) \\ \vdots &= \qquad\qquad \ldots \\ \Pi_n &= f_5\left(P_1, P_2, \ldots, P_\kappa, P_n\right) \end{cases} \tag{4.4}$$

Por exemplo, as aplicações mecânicas possuem como dimensões fundamentais a massa, comprimento e o tempo, logo, $\kappa = 3$. A manipulação das variáveis que se repetem P_1, P_2, ..., P_κ deve incluir as κ dimensões fundamentais e cada variável dependente de interesse deve aparecer em apenas uma variável Π. Para modelagem em escala baseada em análise dimensional é necessário que todas as variáveis adimensionais Π sejam escalonadas de forma que sejam iguais para o modelo e o protótipo. Desta forma, para $j = 1, 2, \ldots, n - \kappa$, tem-se:

$$\Pi_j^{(\text{modelo})} = \Pi_j^{(\text{protótipo})} \tag{4.5}$$

Rosa et al. (2012) afirmam que quando a condição representada por (4.5) é alcançada, todos os parâmetros do modelo se correlacionam por único fator de escala, logo, tem-se a similitude completa. Caso ao menos uma das condições não seja respeitada, tem-se o modelo distorcido. Usualmente apenas as condições de primeira ordem são consideradas e desta forma, o modelo utilizado é adequado e as diferenças entre os modelos podem ser negligenciadas. Aplicações de análise dimensional podem ser utilizadas sem a aplicação do teorema de Buckingham Π. Neste caso, a relação é determinada pela definição do fator de escala e relacionando os parâmetros do protótipo e do modelo, como fatores multiplicativos do fator escolhido (COUTINHO et al., 2016).

4.3 Modelagem acústica

A modelagem acústica é baseada em princípios elétricos e mecânicos utilizados na construção do transdutor eletroacústico, ilustrado na Figura 4.1, adaptada de Bera-

nek e Mellow (2012). Para gerar som, o transdutor eletroacústico converte a energia elétrica em movimento do diafragma, gerando assim variação na pressão ambiente. A modelagem do transdutor é realizada utilizando representação com os circuitos elétricos, possibilitando o uso da mesma base de variáveis para o sistema elétrico e o sistema mecânico.

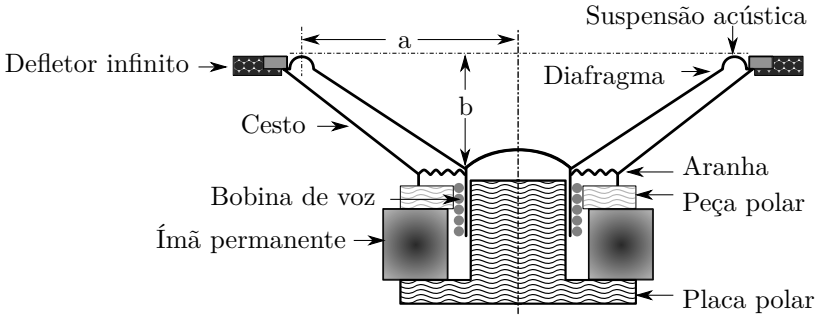


Figura 4.1 - Diagrama de construção do transdutor eletroacústico.

Na Figura 4.1 a bobina de voz possui indutância L_e e resistência R_g, o diafragma e os fios da bobina de voz possuem massa total M_{MD}. O diafragma é montado em suspensão flexível no centro e nas bordas, o efeito destas suspensões dá origem a compliância mecânica C_{MS} e a resistência mecânica R_{MS}. O som é radiado pelas partes frontal e posterior, desta forma, é designada impedância de radiação acústica como sendo $Z_{AR} = 1/Y_{AR}$, onde Y_{AR} é admitância de radiação acústica. A admitância de radiação mecânica, analisada em cada lado do diafragma é $Y_{MR} = S_D^2 \cdot Y_{AR}$, onde S_D é a área efetiva do diafragma, dada por $S_D = \pi \cdot a^2$.

Beranek e Mellow (2012) afirmam que a analogia entre circuitos mecânico e eletromecânico é realizada baseada em princípios de similitude para admitância. Desta forma, a modelagem do sistema de transdutores eletroacústicos é dada de acordo com as Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4.

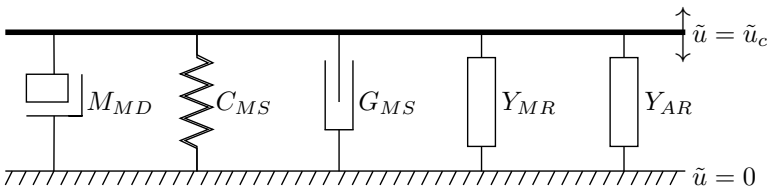


Figura 4.2 - Circuito mecânico do transdutor eletroacústico de radiação direta.

Na Figura 4.2 é ilustrado o circuito mecânico do transdutor eletroacústico de ra-

diação direta, no qual: M_{MD} é a massa total do diafragma e da bobina, C_{MS} é a compliância total da parte da suspensão dada em $[m \cdot N]$, $G_{MS} = 1/R_{MS}$ é a condutância mecânica da suspensão dada em $[m \cdot N^{-1} \cdot s^{-1}]$, $Y_{MR} = 1/Z_{MR} = \mathbf{G}_{MR} + jB_{MR}$ é a admitância de radiação mecânica em um dos lados do diafragma[2], $\tilde{u}_c$ é a velocidade de oscilação da bobina em relação ao imã $\tilde{u}_c = \tilde{e}/B \cdot l$ e $\tilde{e}$ é a tensão aplicada na bobina. Na Figura 4.3 são ilustradas as analogias de impedância e admitância baseada em circuitos elétricos.

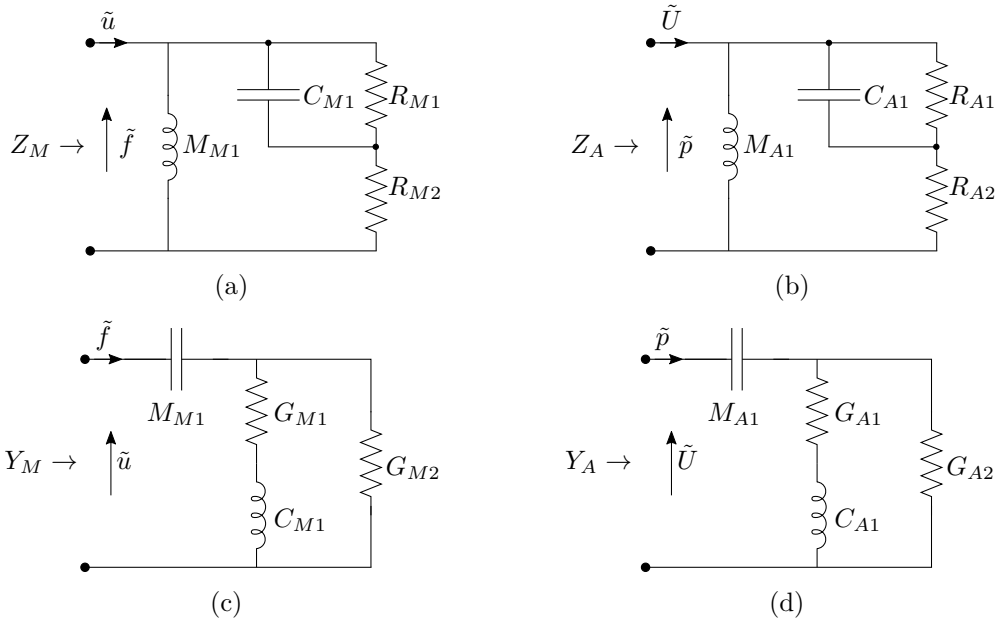


Figura 4.3 - Aproximação análoga da impedância e admitância de radiação: (a) impedância mecânica, (b) impedância acústica, (c) admitância mecânica (d) admitância acústica.

Na Figura 4.3 Z_M é a impedância mecânica, Z_A é a impedância acústica, Y_M e Y_A são, respectivamente, as admitâncias mecânica e acústica. M_{M1} e M_{A1} são as massas em movimento analisadas de forma mecânica e acústica, respectivamente. C_{M1} e C_{A1} são, respectivamente, a compliância mecânica e acústica. R_{M1} e R_{M2} são as resistências mecânicas e R_{A1} e R_{A2} as resistências acústicas. G_{M1} e G_{M2} são condutâncias mecânicas do transdutor e G_{A1} e G_{A2} são as condutâncias acústicas.

A Figura 4.4 ilustra o circuito eletro-mecânico-acústico baseada em admitância, onde L_E é a indutância da bobina de voz, R_E é a resistência elétrica da bobina, R_{MS} é a resistência mecânica da suspensão dada em $[N \cdot s \cdot m^{-1}]$, R_g é a resistência elétrica do amplificador, B é o campo magnético no ar na junção bobina-imã permanente do transdutor, l é o comprimento do fio no enrolamento da bobina, $\tilde{i}$ é a corrente elétrica

[2]O termo em negrito $\mathbf{G}$ indica que $\mathbf{G}_{MR}$ varia com a frequência.

que passa pela bobina, $\tilde{f}_c = B \cdot l\tilde{i}$ é a força gerada na bobina, $\tilde{e}$ é a força contra eletromotriz da junção bobina-imã, $\tilde{p}_R$ é a pressão no diafragma devido a carga de radiação $\tilde{p}_R = 2\tilde{U}_c/Y_{MR}$, $\tilde{U}_c = S_D \cdot \tilde{u}_c$ é a velocidade do volume de ar deslocado pelo diafragma e $\tilde{e}_g$ é a tensão de circuito aberto do amplificador de áudio.

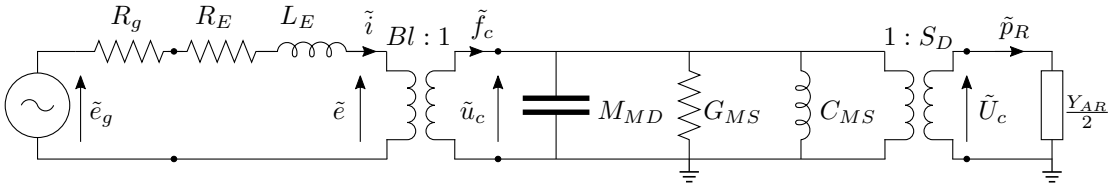


Figura 4.4 - Circuito eletro-mecânico-acústico baseado em admitância.

4.4 Parâmetros de Thiele-Small

Os parâmetros necessários ao estudo de transdutores eletroacústicos são definidos por Albert Neville Thiele, no final da década de 1960 (THIELE, 1971a; THIELE, 1971b), e aprimorados por Richard H. Small, no inicio da década de 1970 (SMALL, 1971; SMALL, 1972; SMALL, 1973). Estes parâmetros são referentes a análise de funcionamento e proposta de construção de transdutores eletroacústicos e caixas acústicas. Segundo Fonseca (2007), estes parâmetros são utilizados em simulações de sistemas acústicos para obter posição, velocidade e aceleração do diafragma, impedância de entrada e níveis sonoros de saída no conjunto transdutor e caixa acústica.

A modelagem do transdutor eletroacústico se inicia com a análise dos parâmetros de Thiele-Small. Tais parâmetros podem ser obtidos na folha de dados disponibilizada pelo fabricante do dispositivo, porém a tolerância utilizada na produção dos mesmos impedem a utilização direta dos parâmetros em simulações. Portanto, para aquisição dos parâmetros de Thiele-Small corretos deve-se realizar a medição, por meio das especificações da norma IEC 60268-5 (IEC, 2007).

A norma indica que o local de medição deve ser silencioso e possuir baixo índice de reverberação e a fonte variável de frequência utilizada deve possuir impedância de saída no mínimo vinte vezes maior que a impedância nominal do transdutor eletroacústico testado. O valor de e_g é o valor aferido no voltímetro CA antes da conexão do dispositivo a ser analisado. Os parâmetros são medidos como ilustrado na Figura 4.5, onde $e_{g(rms)}$ é a tensão rms do gerador de sinal, R_g é a resistência interna do gerador de sinal e $e_{(rms)}$ é a tensão rms aplicada no transdutor eletroacústico.

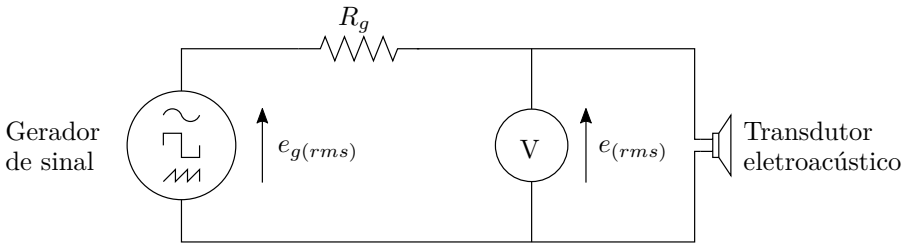


Figura 4.5 - Circuito utilizado na determinação dos parâmetros de Thiele-Small.

O primeiro parâmetro definido por Thiele-Small é a frequência de ressonância da parte móvel do transdutor f_s, dada por:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MS} \cdot C_{MS}}} \tag{4.6}$$

Para medir a frequência de ressonância f_s deve-se elevar a frequência aplicada e simultaneamente verificar a tensão entre os terminais do transdutor eletroacústico. A impedância máxima corresponde a admitância máxima, desta forma, a frequência que indicar a maior tensão entre os terminais e_{max} é f_s. De posse do valor de f_s, deve-se reduzir a frequência aplicada até a estabilização da tensão e neste ponto é obtido o menor valor nesta medição e_{min}. Com a tensão estabilizada eleva-se novamente a frequência até o ponto em que a tensão atinja o valor de $e_{mid} = \sqrt{e_{max} \cdot e_{min}}$. Neste ponto tem-se f_L e mantém-se o aumento na frequência até encontrar o valor de e_{mid} novamente e neste ponto é aferida a frequência f_U.

De posse dos valores de f_s, f_L, f_U, e_{max}, e_{mid} e e_{min} são analisados os demais parâmetros de Thiele-Small: qualidade da parte mecânica do transdutor Q_{MS}, qualidade da parte elétrica do transdutor Q_{ES} e qualidade total do transdutor Q_{TS}. Estes parâmetros podem ser obtidos de duas formas: i) experimentalmente e ii) utilizando a folha de dados disponibilizada pelo fabricante do dispositivo. De forma experimental as expressões são dadas por:

$$Q_{MS_e} = \frac{f_s}{f_U - f_L} \cdot \left(\frac{e_g - e_{min}}{e_g - e_{max}}\right) \cdot \sqrt{\frac{e_{max}}{e_{min}}} \tag{4.7}$$

$$Q_{ES_e} = \left(1 - \frac{e_{max}}{e_g}\right) \cdot \frac{e_{min} \cdot Q_{MS_e}}{e_{max} - e_{min}} \tag{4.8}$$

$$Q_{TS_e} = \frac{Q_{ES} \cdot Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}} \tag{4.9}$$

E as expressões que utilizam os dados disponibilizados pelo fabricante do dispositivo são dadas por:

$$Q_{ES_d} = \frac{R_g + R_E}{B^2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} \tag{4.10}$$

$$Q_{MS_d} = \frac{1}{R_{MS}} \cdot \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} \tag{4.11}$$

$$Q_{TS_d} = \left(\frac{B^2 \cdot l^2}{R_g + R_e} + R_{MS} \right)^{-1} \cdot \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} \tag{4.12}$$

na qual $Q_{MS_e} = Q_{MS_d}$ deve ser igual a Q_{MS}, $Q_{ES_e} = Q_{ES_d}$ deve ser igual a Q_{ES} e $Q_{TS_e} = Q_{TS_d}$ deve ser igual a Q_{TS}. A massa total em movimento M_{MS} é avaliada pelo sistema completo em movimento juntamente com a massa de ar deslocada. Como $M_{MD} = M_{MS} - 2M_{M1}$ e $M_{M1} = 2,67a^3 \cdot \rho_0$, tem-se que a massa total em movimento é dada por:

$$M_{MS} = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 \cdot C_{MS}} \tag{4.13}$$

A resistência da bobina de voz R_E é medida utilizando ohmímetro e a área efetiva do diafragma S_d por medição direta. O Valor de V_{AS} é aferido através da adição de massa não ferrosa M_X ao diafragma, o que causa mudança no valor de f_s para f_s'. Desta forma, utilizando a representação matemática de f_s dada em (4.6) e devido a alteração da massa em movimento pela adição da massa M_X e com o auxílio de (4.13) tem-se o valor de V_{AS}, dado por:

$$V_{AS} = \left(1 - \frac{f_s'^2}{f_s^2} \right) \cdot \frac{S_D^2 \cdot \rho_0 \cdot \nu^2}{(2\pi f_s')^2 \cdot M_x} \tag{4.14}$$

no qual a área projetada do diafragma S_D é dada por:

$$S_D = \pi a^2 \tag{4.15}$$

O volume de ar deslocado que possui a mesma compliância da suspensão V_{AS} é dada por:

$$V_{AS} = C_{AS} \cdot \rho_0 \cdot \nu^2 = C_{MS} \cdot S_D^2 \cdot \rho_0 \cdot \nu^2 \tag{4.16}$$

Os parâmetros de Thiele-Small são utilizados na modelagem acústica completa, onde é possível analisar o desempenho do transdutor juntamente com a caixa acústica. Ao montar o sistema caixa-transdutor com o volume da caixa $V_B = V_{AS}$, a compliância mecânica é irradiada somente para a parte frontal do transdutor, como ilustrado na Figura 4.6, adaptada de Dunn et al. (2015). Onde $\tilde{f}_c$ é a força total atuando no circuito de forma a promover oscilação na velocidade $\tilde{u}_c$ e $\tilde{f}_R$ é a frequência acústica emitida pelo transdutor eletroacústico.

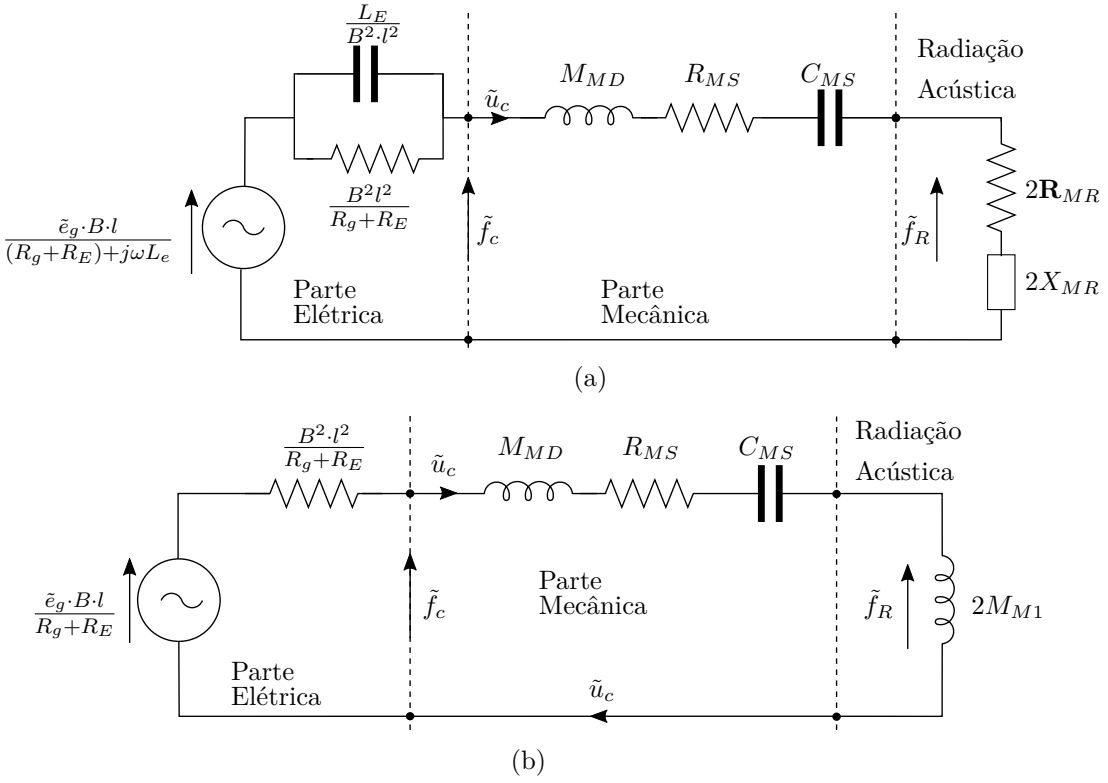


Figura 4.6 - Analogia da impedância em circuito para baixa frequência com a parte elétrica referida no lado mecânico: (a) análise complexa, (b) análise aproximada para quando a radiação acústica real é maior que a imaginária.

Da Figura 4.6 em relação aos parâmetros de Thiele-Small, tem-se que na equivalência do circuito em termos acústicos, a compliância mecânica C_{MS} é dada por:

$$C_{MS} = \frac{V_{AS}}{S_D^2 \cdot \rho_0 \cdot \nu^2} \tag{4.17}$$

4.5 Caixas acústicas

Caixas acústicas são utilizadas para adequar os transdutores eletroacústicos de acordo com a função que ele deve desempenhar e impedir o curto-circuito acústico. Na modelagem de caixas acústicas são utilizados os parâmetros de Thiele-Small do transdutor eletroacústico em conjunto com as propriedades mecânicas das caixas acústicas. A analogia em circuito elétrico do conjunto indica a variação que é obtida pelo sistema real, prevendo fatores como: i) aumento da pressão sonora, ii) ajuste da diretividade e iii) frequência de ressonância do conjunto (FONSECA, 2007).

Segundo Beranek e Mellow (2012), até 1950 todos os transdutores eletroacústicos são montados em caixas seladas para reagirem ao movimento da parte traseira do diafragma. Esta reação é representada por impedância acústica que, em baixas frequências é a compliância atuando para reduzir o movimento do diafragma, desta forma, elevando a frequência de ressonância. A analogia em circuito elétrico da caixa acústica e da carga de radiação no diafragma é ilustrado na Figura 4.7.

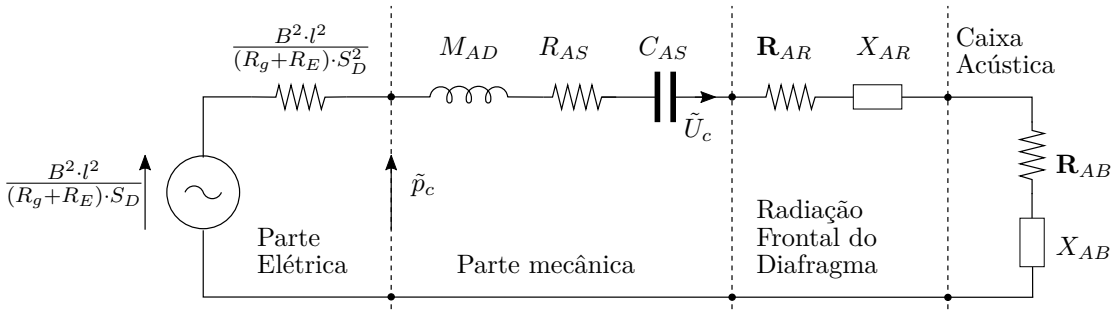


Figura 4.7 - Analogia em circuito elétrico para o transdutor eletroacústico montado em caixa selada.

Os elementos ilustrados na Figura 4.7 são analisados em relação a parte acústica do circuito. A reatância e a resistência da caixa acústica são respectivamente X_{AR} e R_{AB}. A massa em radiação e a resistência a frente do diafragma são M_{AR} e R_{AR}, respectivamente. Os valores das partes mecânicas do circuito são dados por: i) massa acústica do diafragma e bobina de voz $M_{AD} = M_{MD}/S_D^2$, ii) compliância acústica das suspensões do diafragma $C_{AS} = C_{MS} \cdot S_D^2$, iii) resistência acústica da suspensão $R_{AS} = R_{MS}/S_D^2$ e iv) resistência mecânica da suspensão R_{MS}.

Segundo Kleiner (2013) a caixa dutada segue os mesmos princípios da caixa selada, porém é adicionado duto cujo a área S_P deve ser igual ou menor que a área efetiva do diafragma S_D. A Figura 4.8 ilustra a construção típica da caixa dutada. O modo de

funcionamento é baseado na vibração do diafragma, que comprime o ar no interior da caixa e provoca a movimentação de parte do ar para fora da caixa, fazendo com que o duto funcione como diafragma.

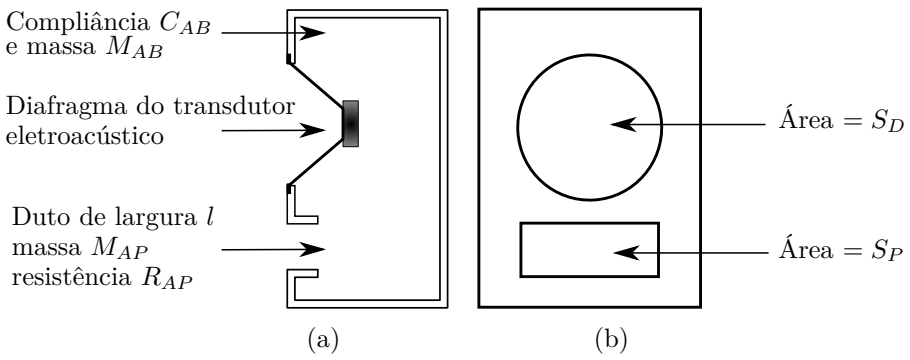


Figura 4.8 - Modelo construtivo da caixa dutada: (a) corte lateral e (b) vista frontal.

A analogia com circuito elétrico para transdutor eletroacústico montado em caixa dutada é ilustrada na Figura 4.9, adaptada de Beranek e Mellow (2012). A massa radiada em série e a resistência na parte frontal do diafragma é dada respectivamente, por M_{A1} e R_{AR1}. A massa em movimento na parte posterior do diafragma é M_{AB}. A resistência considerando os vazamentos de ar presente no sistema é R_{AL}. A massa e a resistência do ar que penetra pelo duto são, respectivamente, M_{AP} e R_{AP}. A massa acústica e a resistência do ar radiado pelo duto é, respectivamente M_{A2} e R_{AR2}. A força total produzida na bobina de voz pela corrente aplicada é $\tilde{p}_c \cdot S_D$. A velocidade de deslocamento em relação ao volume do diafragma $\tilde{U}_c$ em relação ao duto é $\tilde{U}_P$, $\tilde{U}_B$ em relação a caixa acústica e $\tilde{U}_L$ em relação ao ar que flui pelo diafragma.

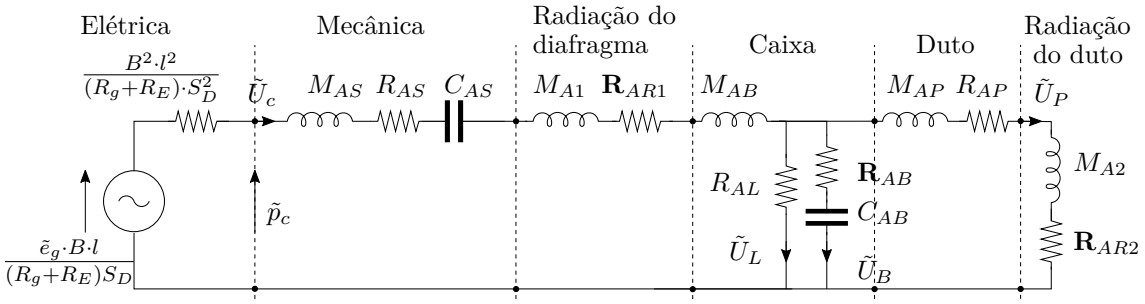


Figura 4.9 - Analogia com circuito elétrico para o transdutor eletroacústico montado em caixa dutada.

Kleiner (2013) afirma que o modelo construtivo passa faixa, ilustrado na Figura 4.10,

é caracterizado pela adição de um ou dois filtros passa baixa na caixa acústica. São dois os modelos base de construção, ambos derivados da caixa dutada. O primeiro modelo, ilustrado na Figura 4.10(a), a parte frontal do diafragma é selada, se assemelhando a caixa selada. O segundo modelo, ilustrado na Figura 4.10(b), é aproximação do filtro passa baixa na parte frontal do diafragma.

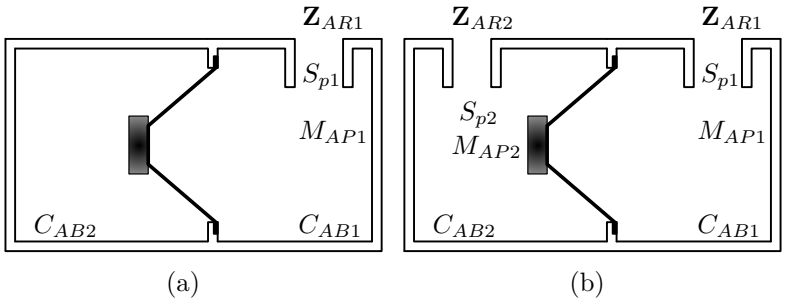


Figura 4.10 - Caixas passa banda: (a) base com caixa selada e (b) base com caixa dutada.

onde, $\mathbf{Z}_{AR1}$ e $\mathbf{Z}_{AR2}$ são as impedâncias acústicas de radiação do duto, S_{p1} e S_{p2} as áreas dos dutos, M_{AP1} e M_{AP2} são as massas de ar em movimento pelo duto e C_{AB1} e C_{AB2} são as compliâncias de cada parte da caixa acústica.

A analogia com circuito elétrico do sistema passa banda é ilustrada na Figura 4.11. A principal vantagem deste sistema é a redução da distorção do transdutor, devido aos dutos funcionarem como filtro passa baixa, sendo útil em sistemas cujo a frequência seja abaixo de $100Hz$, estabilizando a velocidade de escoamento do ar pelo duto em valores abaixo de $5m/s$ apenas aumentando a área S_p, obtendo assim escoamento laminar.

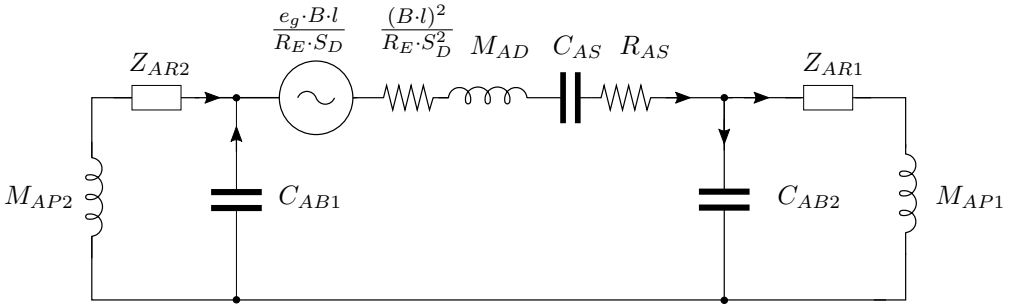


Figura 4.11 - Analogia com circuito elétrico para o transdutor eletroacústico montado em caixa passa banda em base com caixa dutada.

Caixas acústicas utilizam o direcionamento da pressão sonora para obter elevação na pressão acústica média. Analisando a pressão acústica média (2.11) em relação a

variação da distância, tem-se a lei quadrática inversa referente a queda da potência sonora em $6dB$ a cada vez que a distância em relação a fonte dobra (KLEINER, 2013). Ao utilizar fontes sonoras em conjunto é indicado obter arranjos baseados no atraso entre as caixas acústicas. De acordo com a distância e o posicionamento das caixas é definido o atraso entre elas de forma a obter frente única de onda (DUNN et al., 2015). Desta forma, ao avaliar fontes sonoras coerentes em caixas acústicas, tem-se que ao dobrar a distância em relação a fontes sonoras lineares e planares o nível de pressão sonora reduz $3dB$ (MAEKAWA; LORD, 1993).

4.6 Softwares para cálculo dos parâmetros de caixas acústicas

Existem na literatura vários softwares que são utilizando para encontrar os parâmetros de Thiele-Small, calculando os parâmetros construtivos das caixas acústicas. Software como WinIsd, que disponibiliza os dados necessários para construção da caixa como volume e tamanho do duto, a partir de parâmetros desejáveis como ganho em SPL, velocidade do ar, faixa passante e impedância máxima (AHONEN, 2007). Os cálculos dos parâmetros são realizados de forma simples através da análise do equivalente em circuito elétrico (AHONEN, 2003; HILL, 2018; BACH; BONVIN, 2018). Outra forma de avaliação amplamente utilizado é com base em simulação utilizando métodos dos elementos finitos (MEF), em softwares como Comsol Multiphysics (SAHU et al., 2015; AHONEN, 2003) ou Ansys (KARJALAINEN et al., 2001; BEZZOLA et al., 2019). A simulação em software que usam o MEF normalmente são onerosos financeiramente por serem softwares proprietários e as análises possuem alto custo computacional, quando comparado com software como o WinIsd (PEYRE et al., 2007; HU et al., 2017; IBARRA et al., 2018).

4.7 Modelagem do desgaste ocasionado por vibração induzida acusticamente

Qualquer estrutura sólida exposta a campo sonoro irá responder em algum modo de vibração à flutuação de pressão agindo na interface entre os dois meios (WILBY, 2009). Analisando o corpo rígido no qual incide campo sonoro, tem-se que a velocidade das partículas do campo sonoro normal a superfície do corpo deve ser *zero*. Logo, este corpo deve se movimentar de forma que sua velocidade normal de superfície seja igual e oposta a velocidade do campo sonoro na ausência do corpo (FAHY; GARDONIO, 2007).

Segundo Cremer e Heckl (2013), a vibração estrutural induzida acusticamente resulta em estresse devido a oscilação. Em diversos casos, o estresse induzido por campos

de pressão acústica respondem ao primeiro modo de vibração do objeto. Apesar da baixa intensidade, este estresse acumulado durante o tempo ocasiona falhas estruturais em pontos críticos. Wilby (2009) afirma que quando o comprimento de onda é elevado em relação as dimensões do referido objeto, a pressão sonora está em fase no objeto e o estresse médio quadrático $\sigma(t)^2$ devido a pressão estática uniforme de magnitude F_0 pode ser estimado pela aproximação:

$$\sigma^2(t) \approx \frac{\pi}{4\eta} \cdot f_n \cdot G_p(f_n) \cdot \left(\frac{\sigma_0}{F_0}\right)^2 \tag{4.18}$$

onde f_n é o modo de frequência dominante de ordem n, $G_p(f_n)$ é a densidade espectral da pressão de excitação na frequência dominante e η é o coeficiente de amortecimento.

4.8 Considerações finais

Os critérios necessários para modelagem do sistema acústico apresentados neste capítulo, possibilita o desenvolvimento de metodologia de construção, medição e validação de dispositivos que trabalham com vibração induzida acusticamente. A modelagem das caixas acústicas juntamente com o arranjo de fontes coerentes permitem elevar a potência sonora dissipada pelos transdutores eletroacústicos e direcionar corretamente o som produzido. Desta forma, é viável a utilização desta potência acústica para induzir vibração em corpos. A vibração induzida será resultado da variação da pressão no meio devido a oscilação do diafragma do transdutor eletroacústico presente na caixa acústica. No próximo capítulo é apresentada a metodologia para aquisição dos parâmetros de Thiele-Small, construção das caixas acústicas, cálculo dos fatores de redução de escala e simulação em redução de escala para avaliação do dispositivo e protótipo desenvolvido.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para a análise e geração de vibração acústica, aquisição de dados e verificação das características físicas dos transdutores eletroacústicos. É apresentado o sistema para análise dos transdutores eletroacústicos e aquisição dos parâmetros de Thiele-Small. Na sequência, são apresentados os procedimentos de projeto da caixa acústica utilizando parâmetros de Thiele-Small e desenvolvido o projeto em redução de escala seguindo os princípios de similitude. Após a análise em escala, é proposta a caixa acústica e o arranjo para aplicação. Por fim, é apresentado o modelo do protótipo em escala real e a validação dos dispositivos.

5.1 Contextualização

Sistemas que avaliam a vibração e a frequência ideal para ruptura do pedúnculo em equipamentos para derriça de grãos, funcionam com base na transferência direta de vibração para o sistema galho-pedúnculo-grão. No referido sistema o galho é fixado em haste oscilante, desta forma, quando o sistema oferece maior amplitude e/ou frequência de vibração, obtém-se maior taxa de ruptura do pedúnculo liberando o grão.

Induzir acusticamente vibração em sistemas requer elevada potência acústica, que onera financeiramente o desenvolvimento de novas técnicas. Para redução de custos tem-se como opção a simulação do sistema, que pode ser realizada computacionalmente ou através de redução de escala. Devido a complexidade da simulação computacional, utiliza-se simulação em redução de escala, que permite avaliar os ganhos de potência acústica, indução de vibração e análise geométrica do sistema proposto. Neste trabalho é avaliado o modo de vibração em modelos específicos que são desenvolvidos de forma a simular a vibração em frutos de café. Este modelo permite comparação com o sistema real em análises da frequência de ressonância, vibração induzida acusticamente, modos de vibração e desgaste acústico gerado.

A metodologia proposta neste trabalho inicia-se com o desenvolvimento do dispositivo para aquisição dos dados necessários para a modelagem do sistema e análise do modelo proposto. Na sequência, são obtidos os parâmetros necessários para o projeto das caixas acústicas e é realizado estudo computacional do modelo proposto. De posse destes parâmetros é realizado o projeto das bancadas de aplicação, pos-

sibilitando a análise do sistema a partir do modelo em redução de escala. Após a validação do modelo em escala reduzida, é construído e testado protótipo em escala real.

5.2 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados realiza coleta como ilustrado na Figura 5.1, no qual o transdutor eletroacústico é conectado ao amplificador de áudio e ao módulo de aquisição de dados, respeitando a polaridade indicada no dispositivo. Na sequência, é iniciada a geração de sinais e são medidas as características de tensão e corrente no transdutor eletroacústico. A partir dos valores medidos é gerado o gráfico de impedância do dispositivo. A análise do gráfico é realizada para obtenção dos parâmetros de Thiele-Small do transdutor eletroacústico.

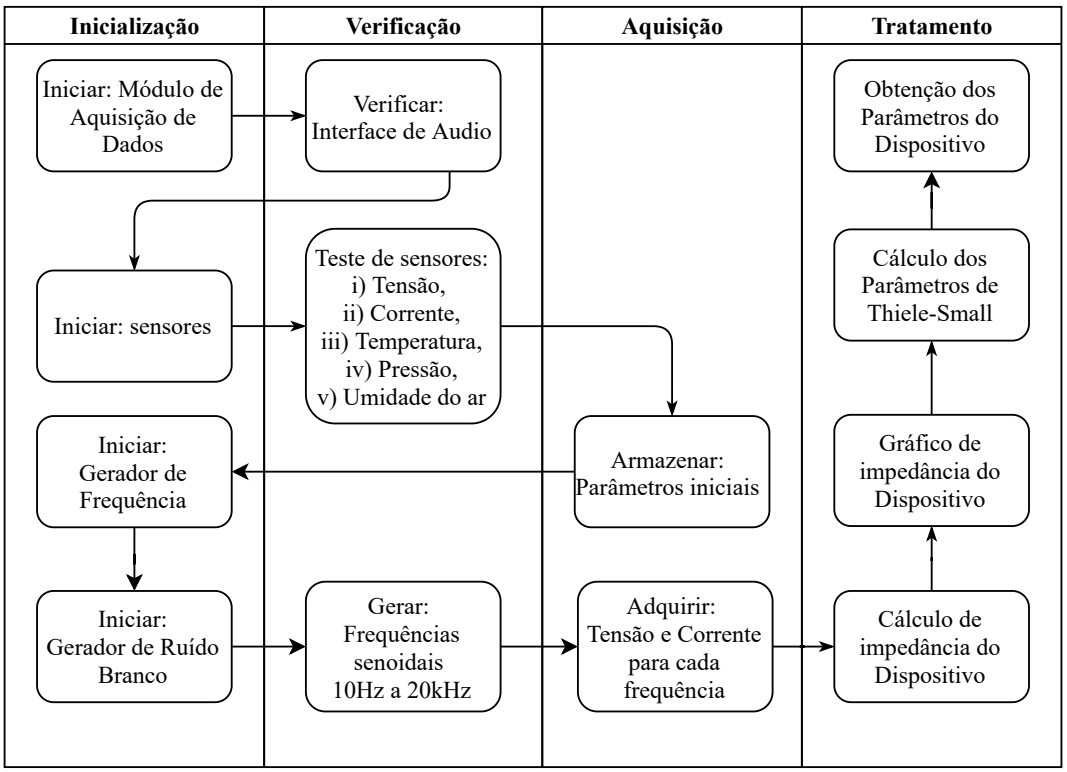


Figura 5.1 - Fluxograma do módulo de aquisição de dados.

O módulo de aquisição de dados é iniciado remotamente e o primeiro teste a ser realizado é o de conexão da interface de áudio, onde é verificado a quantidade de saídas de áudio e canais disponíveis. A seguir, inicia-se os sensores e é verificada as leituras iniciais de tensão, corrente, temperatura, pressão e umidade do ar. Neste

momento armazena-se os parâmetros ambientais iniciais utilizados no cálculo da velocidade do som.

O gerador de frequências é iniciado e testado com ruído branco durante dez segundos para verificar e ajustar a tensão no transdutor eletroacústico para $1V$. Em seguida, é iniciada a geração de frequências entre $10Hz$ e $7,5kHz$ e simultaneamente realiza-se aquisições de tensão e corrente para cada frequência. De posse dos dados de frequência, corrente e tensão, é calculada a impedância para cada frequência, por fim, é gerado o gráfico da impedância do dispositivo. A partir da análise do gráfico de impedância obtém-se os parâmetros de Thiele-Small.

5.3 Parâmetros para projeto das caixas acústicas

Para o projeto das caixas acústicas, deve-se escolher a aplicação, verificar os parâmetros de Thiele-Small, as dimensões do transdutor eletroacústico utilizado e aplicar os valores destes parâmetros na modelagem específica, como ilustrado na Figura 4.7, Figura 4.9 e Figura 4.11. Desta forma, obtendo os parâmetros de montagem das caixas acústicas, como: parâmetros mecânicos de construção, volume interno, frequência de ressonância e tamanho do duto.

O tipo de caixa acústica é escolhido a partir dos valores da frequência de ressonância f_s em (4.6), nível de pressão sonora SPL, obtido a partir da intensidade sonora em (2.10), impedância e potência aparente medidos na saída do amplificador. Elevando o nível de pressão sonora, obtém-se variação positiva da pressão no meio, desta forma, induzindo vibração. O direcionamento acústico de partículas é obtido através da variação de pressão no meio devido ao direcionamento das ondas sonoras e aumento da velocidade do ar deslocado. O desgaste eletromecânico do sistema é verificado através da análise da impedância e potência aparente do sistema transdutor eletroacústico e da caixa acústica.

Os parâmetros construtivos das caixas acústicas são obtidos de duas formas: i) análise direta da analogia com circuito elétrico do transdutor eletroacústico montado nas caixas ou ii) utilizando ferramentas computacionais. Nestes métodos é necessário a substituição dos valores obtidos do tipo de caixa escolhido. Os dados obtidos a partir do tipo de caixa acústica são utilizados em ambas as análises e são divididos em quatro grupos: i) parâmetros de Thiele-Small: Q_{ES}, Q_{MS}, f_s, R_e, S_d e V_{AS}, ii) parâmetros eletromecânicos: M_{MS}, C_{MS}, R_{MS} e L_e, iii) parâmetros de grandes sinais, os valores do deslocamento máximo e limite da bobina X_{max} e X_{lim}, além do volume do diafragma V_d e iv) parâmetros dimensionais, profundidade, volume do

cesto, volume do imã, diâmetro externo e diâmetro interno.

Na análise direta da analogia com circuito elétrico, os valores são substituídos diretamente no circuito equivalente do tipo de caixa escolhido. Para análise computacional, os parâmetros construtivos do tipo, volume interno e tamanho do duto da caixa acústica são alterados. Esta alteração promove variação nos parâmetros: i) nível de pressão sonora, ii) velocidade do ar deslocado e iii) potência aparente fornecida pelo amplificador. Os valores obtidos para cada alteração são avaliados para a escolha dos parâmetros construtivos ideais em cada aplicação.

5.3.1 Avaliação do ganho devido ao arranjo de caixas acústicas

Após a seleção do sistema de caixa acústica, realiza-se testes para obtenção dos parâmetros referentes ao ângulo de direcionamento do sistema de acordo com a norma IEC 60268-5 (IEC, 2007). A caixa acústica deve ser montada a distância de $1m$ do ponto de medição (onde localiza-se os microfones), como ilustrado na Figura 5.2. A aferição da diretividade é realizada em intervalos de 15° em relação ao centro da fonte sonora na direção horizontal e vertical em diversas frequências.

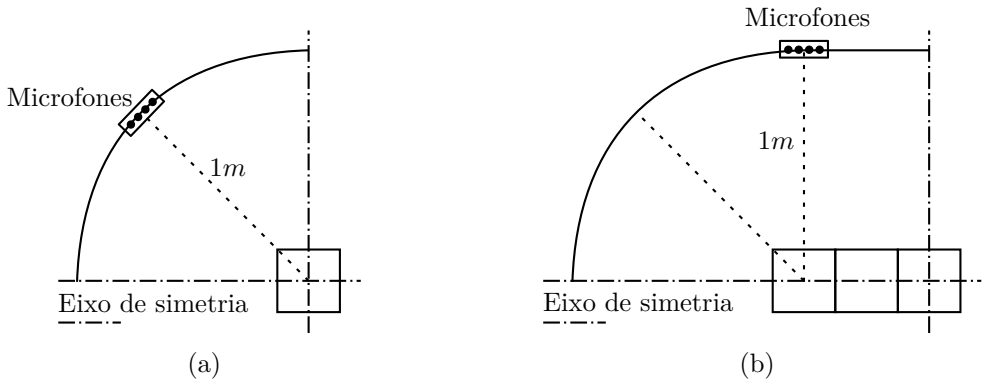


Figura 5.2 - Medição segundo a norma IEC 60268-5: (a) caixa individual e (b) múltiplas caixas.

Após a medição individual da diretividade da caixa acústica, deve-se aferir a diretividade do arranjo de caixas acústicas, onde é calculado o atraso devido as distâncias entre os transdutores eletroacústicos, como ilustrado na Figura 5.3. Através desta análise, verifica-se a alteração na intensidade e pressão sonora e atenuação do espaço livre das mesmas em relação a distância da fonte, dado em (2.15), obtendo o gráfico polar da intensidade sonora pela distância.

Os atrasos ideais do arranjo são calculados a partir do transdutor eletroacústico

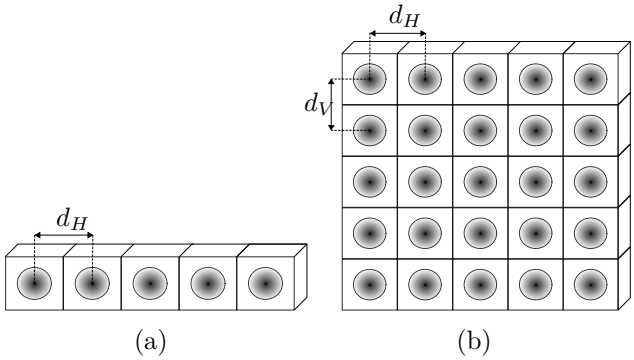


Figura 5.3 - Arranjos de caixas acústicas: (a) linear e (b) planar.

central, obtendo assim os atrasos referentes ao tempo necessário para que as ondas sonoras oriundas das diferentes fontes atinjam o ponto alvo simultaneamente, como ilustrado na Figura 5.4. Para o cálculo do atraso de cada fonte são necessários: i) velocidade do som no meio ν, ii) distância entre os centros dos transdutores eletroacústicos na direção vertical d_V e horizontal d_H e iii) distância em relação ao alvo, que é posicionado relativamente à fonte em distancia d_{Ah} na horizontal e d_{Av} na vertical. De posse das diferenças entre as distâncias para cada fonte é calculado o tempo necessário para que o pico das ondas atinjam o alvo ao mesmo tempo.

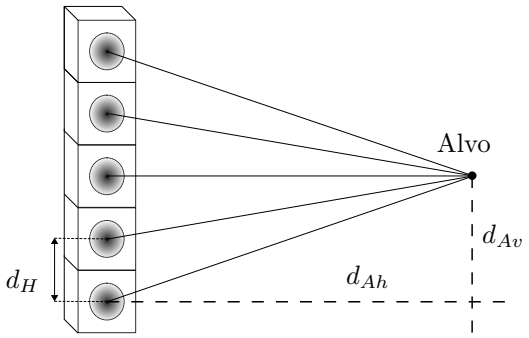


Figura 5.4 - Direcionamento da pressão sonora através da soma de atrasos.

5.4 Simulador de indução da vibração para derriça acústica

De posse dos parâmetros da caixa acústica, desenvolve-se bancada de testes de indução de vibração para realizar a derriça acústica, em redução de escala e, posteriormente, protótipo em escala real. A geometria ideal é obtida utilizando o modelo em escala reduzida, no qual aplica-se os atrasos necessários para experimentação. A bancada consiste em duas frentes de onda, com a distância calculada de forma a obter interferência construtiva no centro, elevando a intensidade e pressão sonora.

A aquisição de parâmetros para monitorar o desgaste acústico induzido requer o desenvolvimento de sistema de aquisição de dados para obter os parâmetros Thiele-Small, diretividade e intensidade sonora. A força acústica aplicada ao objeto de teste e a diretividade do arranjo são modeladas matematicamente utilizando os dados adquiridos. A aquisição dos parâmetros de Thiele-Small é realizada utilizando sensor de corrente e tensão, com sistema de geração de sinal e aplicando o método ilustrado na Figura 4.5. A força aplicada é medida a partir do volume, massa e deslocamento do corpo obtidos através de acelerômetro. O desgaste acústico é medido utilizando a força aplicada.

De acordo com a amplitude de vibração necessária, deve-se aumentar o atraso entre os picos de onda (pressão máxima) para aumentar a amplitude de vibração alvo. Então, a vibração é induzida através de duas frentes de onda opostas, congruentes e fora de fase. A vibração é medida utilizando acelerômetros adicionados ao dispositivo alvo, como ilustrado na Figura 5.5. O dispositivo alvo é desenvolvido em dimensões iguais aos frutos de café, para que seja realizada comparação com o sistema real no que se refere a: i) análises de frequências de ressonância, ii) vibração induzida acusticamente e iii) modos de vibração e desgaste acústico gerado. Utiliza-se diferentes montagens para avaliar qual combinação dos parâmetros: i) formato de onda, ii) frequência e iii) arranjo das caixas possui melhor resultado.

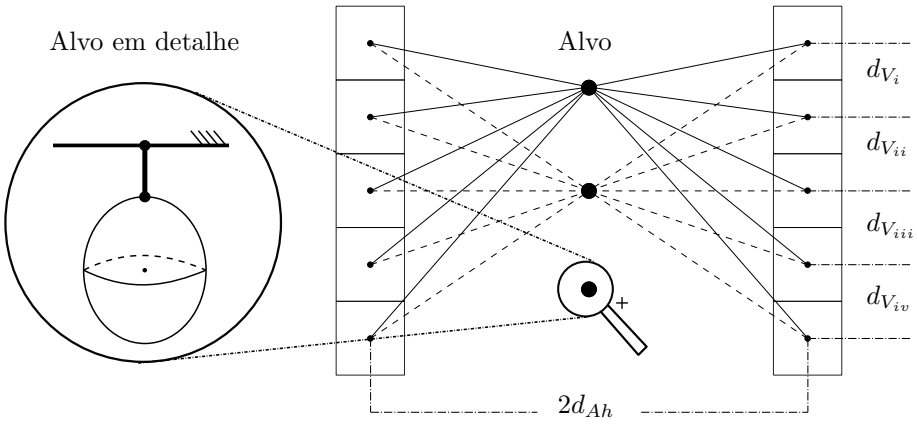


Figura 5.5 - Simulador de indução de vibração para derriça acústica.

Os acelerômetros são montados em envólucros de dimensões físicas conhecidas (área superficial, volume total, massa, densidade e centro de massa), com o propósito de mensurar com precisão a vibração induzida acusticamente, como ilustrado na Figura 5.6. De posse destas características e da vibração, rotacional ou oscilatória, a qual o mesmo é submetido, calcula-se a força aplicada no sistema.

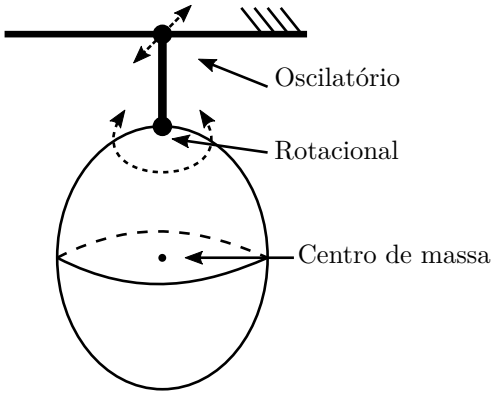


Figura 5.6 - Pontos de verificação da vibração induzida acusticamente no alvo.

Realiza-se a medição da vibração através dos acelerômetros posicionados no centro de massa do corpo de prova, como ilustrado na Figura 5.7. A movimentação do corpo é aferida e é verificada a frequência e amplitude das oscilações. A partir destes parâmetros é calculado o desgaste ocasionado pela vibração induzida acusticamente.

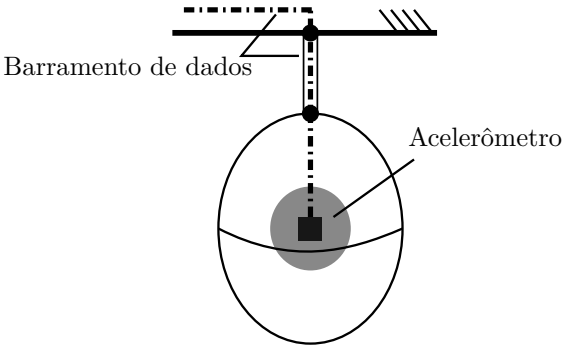


Figura 5.7 - Alvo da vibração com sensores embutidos.

A interferência acústica construtiva em fontes sonoras congruentes é gerada de duas formas: i) frequência fixa, utilizando o atraso entre os alto-falantes, ou ii) frequências diferentes, focando o maior nível de pressão sonora no protótipo dimensionado. A diretividade sonora é medida com arranjo de microfones, que indica a intensidade e direção do som, além de obter gráfico de diretividade sonora do dispositivo avaliado.

5.5 Simulador de direcionamento de produto fitossanitário

Neste modelo, o direcionamento é realizado através do fluxo de ar gerado pelo movimento do diafragma do transdutor eletroacústico. Ao variar o tipo de onda utilizado, varia-se também a vibração induzida, e ao utilizar fontes com diferentes ondas,

torna-se possível controlar os campos de pressão gerados pelo dispositivo proposto. Para esta avaliação, deve-se gerar campos sonoros congruentes em pontos de pressão sonora, que são definidos conforme a frequência utilizada e as distâncias envolvidas. Deve-se deslocar o ponto de máxima pressão sonora através de atrasos entre as fontes e variar a frequência. Esta variação gera o deslocamento do produto fitossanitário, como ilustrado na Figura 5.8.

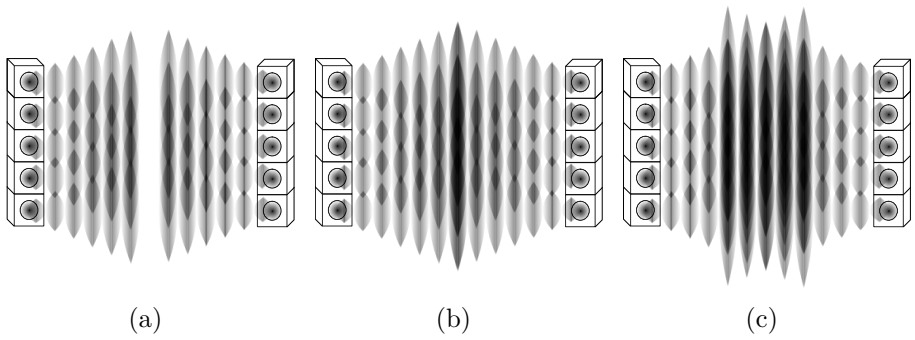


Figura 5.8 - Campo de pressão sonora gerado: (a) instante inicial, (b) interferência construtiva e (c) interferência construtiva e dispersão.

Na Figura 5.8 são ilustrados os campos de pressão sonora e de acordo com o avanço ou atraso nas ondas, altera-se a posição dos campos de pressão, fato este que promove o deslocamento das partículas que estão sobre o efeito destes campos. Para os testes de direcionamento de produtos fitossanitários, é projetada caixa acústica com alto fluxo de ar. A variação de pressão gerada é direcionada para a parte frontal do alto-falante, permitindo o controle sobre o alvo da aplicação, pois não depende apenas da diretividade do alto-falante. A avaliação do direcionamento é realizado utilizando pulverizador costal e papel hidro-sensível, que é posicionado em pontos de medição, como ilustrado nas Figura 5.9 e Figura 5.10. O direcionamento é concentrado para reduzir a deriva e o bico de pulverização deve atravessar toda área aplicando de forma uniforme o produto fitossanitário. O direcionamento é verificado ao analisar maior concentração na linha de aplicação.

Na Figura 5.9 o bico de pulverização move-se na linha central de aplicação com velocidade de deslocamento do pulverizador V_{dp} constante, permitindo a aplicação uniforme em toda área. Desta forma, é mensurada a influência dos campos de pressão em relação a aplicação padrão. Na Figura 5.10, o bico de pulverização e as caixas acústicas movem-se com velocidade de deslocamento V_{dp} constante. Desta forma, é mensurada ação dos campos de pressão em toda extensão da linha de aplicação.

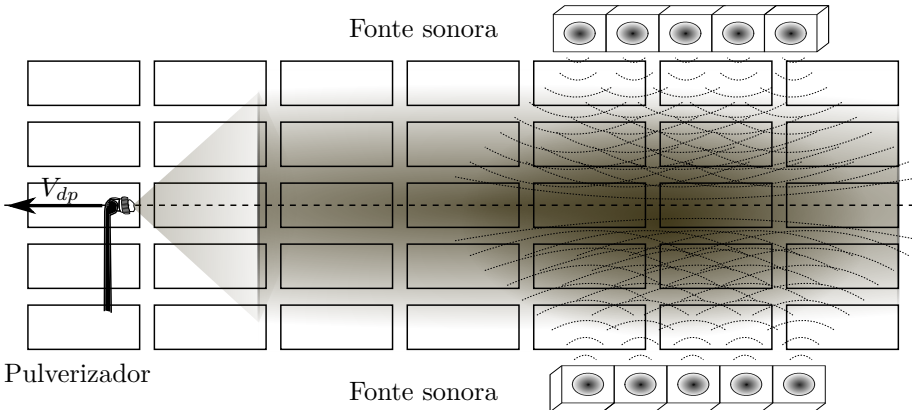


Figura 5.9 - Aplicação com pulverizador em movimento e partículas direcionada acusticamente.

Na Figura 5.11, o bico de pulverização é posicionado ao centro da área de medição e as caixas acústicas nos extremos. São realizadas duas aplicações, a primeira sem o direcionamento e a segunda com o direcionamento. Desta forma, é mensurada a influência dos campos de pressão em relação ao pulverizador estático.

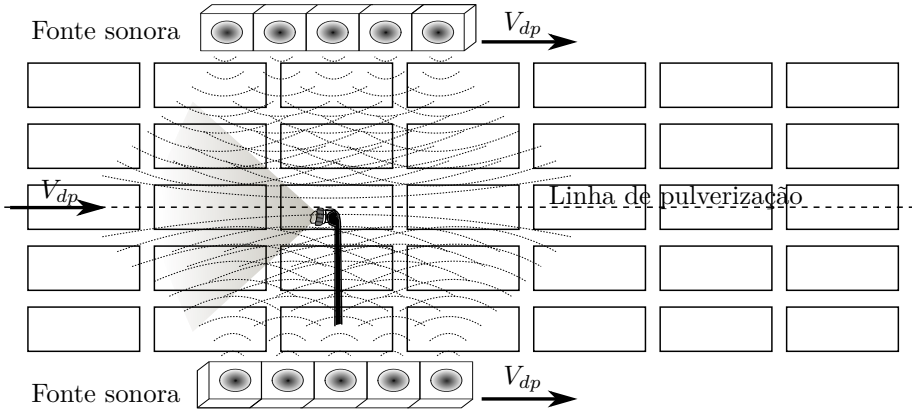


Figura 5.10 - Aplicação com pulverizador e caixas acústicas em movimento e partículas direcionada acusticamente.

5.6 Similitude acústica

Os tipos de similitudes utilizadas são similitude geométrica e similitude dinâmica, que dependem do estudo a ser realizado. Os parâmetros utilizados na redução de escala deste trabalho são: i) intensidade sonora I dado em (2.2), ii) densidade de energia sonora D dado em (2.3), iii) nível da pressão sonora SPL dado em (2.7) e iv) nível de intensidade sonora ILS dado em (2.8). Os estudos destes parâmetros são realizados em função de suas unidades básicas no sistema CGS, reduzindo a quantidade de parâmetros e possibilitando a utilização do teorema de Buckingham Π

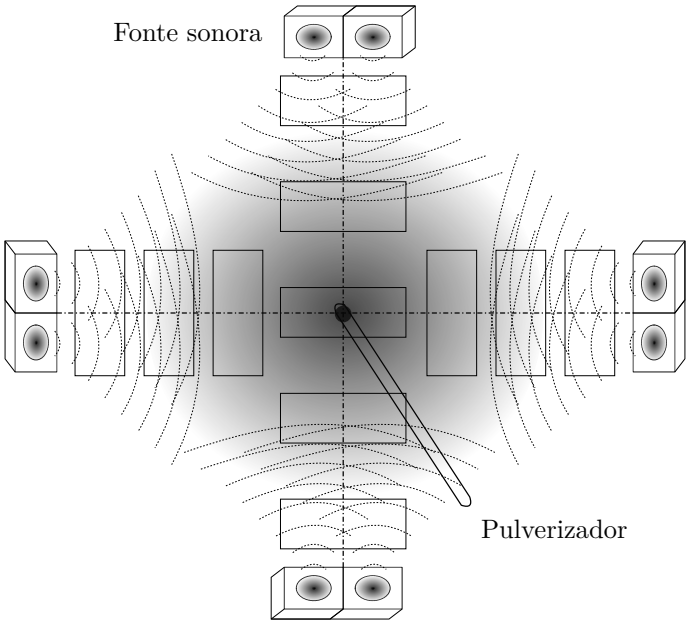


Figura 5.11 - Aplicação com pulverizador estático no centro e partículas direcionada acusticamente.

apresentado em (4.4), para a similitude geométrica e a relação do fator de escala para a similitude dinâmica.

Constrói-se os protótipos utilizando técnicas de redução de escala e respeitando critérios de similitude geométrica, como dado em (4.5), tornando possível analisar o funcionamento do protótipo em escala real a partir do modelo em redução de escala. Cada protótipo em redução de escala é composto por amplificador de áudio com dois canais, fonte de alimentação em corrente contínua e transdutores eletroacústicos montados em caixas acústicas. O formato das caixas é definido a partir da análise dos parâmetros de Thiele-Small para os transdutores eletroacústicos em escala reduzida, de forma que o nível de pressão e intensidade sonora apresentem critérios de redução de escala conhecidos. A análise proposta é realizada nos dois protótipos: i) indução acústica da vibração para derriça acústica seletiva e ii) direcionamento da aplicação de produtos fitossanitários. Para análises da vibração induzida acusticamente é utilizado corpo de prova instrumentado com acelerômetro.

Utilizando o volume do corpo, massa e o deslocamento obtido através do acelerômetro, é mensurada a força aplicada. A partir do valor da força aplicada, é mensurado o desgaste acústico a que o corpo está submetido, dado em (4.18). A vibração é induzida através de duas frentes de ondas opostas, congruentes e defasadas de acordo com a amplitude de vibração necessária. Para elevar a amplitude de vibração do alvo é necessário a elevação no atraso entre os picos de onda (máxima pressão) no

alvo (corpo de prova). A geração dos picos é realizada de duas formas: i) frequência fixa e utilizando atraso entre as caixas ou ii) frequências diferentes de forma que o pico obtenha atraso em relação ao ponto alvo. Para mensurar a intensidade sonora é utilizado conjunto de microfones que indicam a intensidade e a direção sonora, obtendo assim gráfico de diretividade sonora do dispositivo avaliado.

A bancada para análise do direcionamento de produto fitossanitário é desenvolvida utilizando fontes sonoras congruentes. Deve-se realizar dois estudos: i) frente única de onda no qual é utilizado anteparo para reverberação sonora e ii) duas frentes de onda, na qual a pressão sonora é concentrada de acordo com o direcionamento obtido através de atrasos nas ondas e variação de frequência. A aferição é realizada utilizando microfones para obtenção do espectro, direção e intensidade sonora. Para validar o direcionamento do produto é utilizado papel hidro-sensível, mensurando a precisão no direcionamento obtido na aplicação.

5.7 Protótipo em escala real

Após construído e analisado os modelos em escala reduzida é desenvolvido protótipo em escala real. O protótipo em escala real é desenvolvido de forma similar ao modelo em redução de escala, porém respeitando as diferenças em relação à caixa acústica e transdutor eletroacústico utilizados. O sistema de aquisição utilizado no protótipo em escala real é o mesmo utilizado no sistema em escala reduzida, resguardado as escalas de tensão e corrente entregues pelo amplificador.

O protótipo em escala real é desenvolvido utilizando diferentes tipos de caixas acústicas para obter a vibração desejada juntamente com o deslocamento no ponto de maior pressão sonora. Para isto, deve-se utilizar diferentes frequências de forma a obter o deslocamento necessário para a derriça dos frutos. O protótipo proposto induz a vibração através da oscilação de pressão gerada por baixas frequências em conjunto com frequências mais elevadas, onde o fruto a ser derriçado é o obstáculo da onda, desta forma, entregando maior amplitude de vibração para induzir oscilação no fruto. Para analisar a vibração induzida na derriça seletiva, constrói-se protótipo semelhante à colheitadeira de café ilustrada na Figura 3.5. Assim, para promover variação de pressão e induzir vibração através do protótipo é necessária elevada densidade de energia sonora, obtida por meio de transdutores eletroacústicos e amplificadores de alta potência.

Para o protótipo em escala real de direcionamento de produtos fitossanitários é construído caixa acústica que possibilita elevado fluxo de ar. Desta forma, a variação de

pressão gerada é direcionada no sentido frontal da caixa acústica. Este fator permite maior controle quanto ao alvo da aplicação, pois não depende somente da diretividade da caixa acústica. A aplicação do produto fitossanitário é realizada utilizando pulverizador costal, a haste de pulverização é conectada a sistema deslizante com velocidade constante. Desta forma, obtendo pulverização uniforme no ambiente de teste. O direcionamento é mensurado com o auxílio de papel hidro-sensível, posicionado em pontos de medição no solo, com a parte sensível voltada para cima e em tripés próximos ao solo com a parte sensível voltada para baixo, simulando a parte inferior das plantas (baixeiro).

5.8 Validação dos protótipos

A validação dos protótipos é obtida através da comparação entre modelo matemático, modelo em escala reduzida e modelo em escala real. Para isto é desenvolvido dispositivo de aquisição de dados acústicos e elétricos para verificar os parâmetros obtidos nos modelos em redução de escala e nos protótipos em escala real. A comparação entre o modelo matemático, modelos reduzidos e protótipos construídos é realizada com base na análise dos parâmetros resultantes de: i) impedância, ii) frequência de ressonância, iii) intensidade sonora e iv) potência aparente fornecida pelo amplificador.

Cada dispositivo avaliado indicará parâmetros específicos conforme a redução de escala, validando também os parâmetros mecânicos do protótipo em tamanho real com o modelo em escala reduzida. A eficácia dos modelos é avaliada de acordo com o relação entre os valores obtidos no modelo matemático com os valores obtidos no modelo físico em redução de escala e o protótipo em tamanho real.

O protótipo em escala real de indução de vibração para derriça é construído dispositivo com dimensões semelhantes a maquina de derriça de café já existente. Desta forma, para promover a variação de pressão e induzir a vibração no protótipo é necessário alta densidade de energia sonora, que é obtido com a utilização de transdutores eletroacústicos e amplificadores de alta potência. O protótipo é testado com base na aquisição de dados de intensidade sonora e vibração dos frutos. A aquisição de dados é realizada de forma semelhante a aplicado para redução de escala, por meio de microfones e acelerômetros. A comparação dos valores obtidos no protótipo em escala real com o modelo em escala reduzida deve ser condizente com o fator de escala utilizado no protótipo.

A validação da bancada de direcionamento de produtos fitossanitários é realizada

utilizando pulverizador costal e papel hidro-sensível. A pulverização é realizada de cima para baixo, com o bico de pulverização posicionado na distância média entre as caixas e na altura igual ao do conjunto de caixas. O papel é sujeito a pulverização com e sem influência do campo de pressão sonora e posicionado de duas formas diferentes: i) na altura da base das caixas, em que estará diretamente sujeito a influência da pulverização e ii) em meia altura do arranjo das caixas com parte hidro-sensível virada para baixo, de modo que apenas o material direcionado pelo sistema entre em contato com o papel hidro-sensível, como ilustrado na Figura 5.12, em que o produto é direcionado para o ponto de verificação P_4.

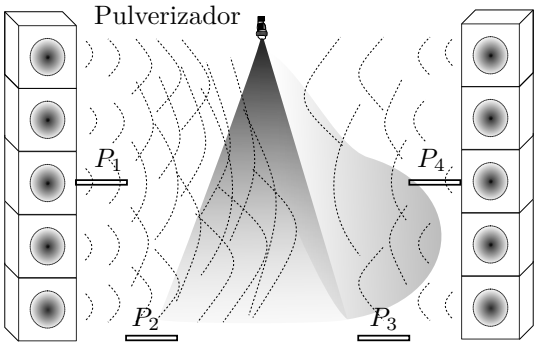


Figura 5.12 - Validação do direcionador de produto fitossanitário.

A eficiência do protótipo é medida através da análise da quantidade de produto que alcançou os pontos de medição. Desta forma, a maior eficiência é obtida quando o ponto P_4 possuir maior porcentual de cobertura que os pontos P_2 e P_3. Analisando em relação à aplicação no campo, é o equivalente ao produto ser direcionado para a parte inferior da folha, alvo biológico das aplicações.

5.9 Considerações finais

Com a metodologia apresentada é possível desenvolver bancada para testes de indução da vibração e direcionamento de produtos fitossanitários, juntamente com a instrumentação necessária para aquisição de dados. A alteração da pressão sonora é obtida utilizando atrasos entre as caixas, sendo estes relativos a distância entre fonte e alvo de aplicação e a velocidade do som no meio. Os testes propostos permitem a validação da indução de vibração e direcionamento do produto fitossanitário além de permitir análises do sistema em redução de escala e o protótipo em escala real. O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação das técnicas de similitude para geração do modelo matemático em redução de escala e construção do modelo físico para validar as técnicas propostas na metodologia. O modelo físico desenvolvido é analisado através de testes em relação a distância e posicionamento das fontes sonoras em arranjos diversos, juntamente com aquisição dos parâmetros de pressão sonora, intensidade sonora e diretividade. O modelo físico construído é utilizado para obtenção de parâmetros relativos a indução acústica de vibração em corpos e direcionamento de partículas através da variação da pressão sonora.

6.1 Requisitos de projeto

Este trabalho desenvolve dois protótipos em escala reduzida e dois protótipos em escala real para os sistemas: i) derriça seletiva e ii) direcionamento de produto fitossanitário. Em ambas escalas são analisados os parâmetros: i) raio do transdutor, ii) intensidade do som I, iii) nível de pressão do som SPL e iv) energia elétrica aplicada. Os estudos destes parâmetros são realizados de acordo com suas unidades básicas no sistema MKS, reduzindo o número de parâmetros e possibilitando a análise do fator de escala para similaridade dinâmica. Os testes produzidos nos protótipos em escala real são: i) indução de vibração acústica para colheita seletiva, utilizando objeto de teste instrumentado e ii) direcionamento da aplicação de produtos fitossanitários.

Os protótipos em escala reduzida respeitam os critérios de similaridade geométrica e dinâmica, permitindo posteriormente a análise do protótipo em escala real. Os protótipos em escala real foram desenvolvidos de forma semelhante aos modelos em escala reduzida, respeitando as diferenças do transdutor eletroacústico. O mesmo sistema de aquisição é utilizado em ambas escalas, alterando somente os sensores, devido as diferenças de tensão e corrente do amplificador. O protótipo proposto para derriça seletiva induz vibração através da oscilação de pressão gerada por baixas e altas frequências. O fruto a ser colhido é o obstáculo da onda, proporcionando assim maior amplitude de vibração para induzir a oscilação no fruto.

Ambos os protótipos são compostos por amplificador de áudio, fonte de alimentação em corrente contínua (CC) e transdutores eletroacústicos montados em alto-falantes. O invólucro acústico é definido a partir dos parâmetros Thiele-Small para os trans-

dutores eletroacústicos. O nível e a intensidade da pressão sonora apresentam fator de escala conhecido Λ.

6.2 Aquisição e análise dos dados

O sistema de aquisição dos dados é desenvolvido utilizando sistema operacional Linux embarcado na placa *Raspberry Pi*, tornando o módulo de aquisição portátil e de baixo custo. O sinal utilizado é gerado através do software GNU Octave, interfaceado com placa de áudio externa USB, podendo ser conectada em expansor de portas de forma a aumentar a quantidade de canais disponíveis. A aquisição de dados em sistemas acústicos depende de fatores ambientais como temperatura, umidade do ar e pressão atmosférica. Logo, para construção do sistema de aquisição de dados, estes parâmetros devem ser adicionados ao sistema desenvolvido. Os parâmetros de temperatura e umidade ambiente são obtidos utilizando o sensor $DHT22$, que possui faixa de medição de temperatura entre -40^oC e 125^oC com precisão de $\pm 0,5^oC$ e umidade do ar entre 0% e 100% com precisão de 2%.

A aferição da pressão é realizada pelo sensor $BMP280$ que possui faixa de medição entre 300 e $1100hPa$ com precisão de $0{,}02hPa$, equivalente à $0{,}17m$ de variação. O $BMP280$ realiza leitura de temperatura, que será comparada com a leitura do $DHT22$ para maior precisão. Com estes valores é calculada a velocidade específica do som ν, nos locais de medição, como dado em (2.1). Simultaneamente a geração do sinal de áudio, são adquiridos parâmetros de corrente e tensão supridos pelo amplificador. Os sinais são adquiridos utilizando o circuito integrado de aplicação específica, INA219, que realiza a leitura da tensão consumida e, a partir de um resistor *shunt*, permite a leitura da corrente, ambas leituras realizadas com precisão de até 18 bits de resolução.

No projeto, são utilizados dois modelos de amplificadores de áudio, que são selecionados de acordo com a potência utilizada. Dado que os estudos de redução de escala são realizados com baixa potência, utiliza-se o amplificador *PAM8403*, que possui dois canais de saída de $3W$ de potência e $5V$ de alimentação em CC. Para o protótipo em escala real, utiliza-se o amplificador *Ground Zero Plutonium GZPA 14000DXII* com potência de $1600W$ e o amplificador *Sound Digital* de $1000W$, ambos com alimentação de $12V$ em CC.

A obtenção dos parâmetros de Thiele-Small depende da aferição da tensão com ruído branco, antes de conectar o transdutor eletroacústico para verificar a curva de funcionamento. Na sequência é conectado o resistor para obter a variação relativa

ao amplificador utilizado. Após análise da curva utilizando resistor de referência, é conectada fonte sonora, na qual realiza-se as medições e gera-se a curva de impedância do dispositivo. Outro parâmetro medido é a intensidade sonora, que é obtida através da utilização de microfone posicionado a distância de um metro da fonte sonora avaliada.

6.3 Desenvolvimento das caixas acústicas

Os testes para a aquisição dos parâmetros de Thiele-Small são realizados utilizando o módulo desenvolvido e os transdutores eletroacústicos selecionados. Os algoritmos utilizados nas análises são apresentados no Apêndice A. Ao conectar o dispositivo de geração de sinais e aquisição de dados ao transdutor eletroacústico em teste, é inicializado o sistema de medição e aquisição de dados, como apresentado na Figura 5.1.

Primeiramente é gerado um minuto de ruído branco para ajuste da tensão de saída em $1V$. Na sequência, inicia-se a geração das frequências entre $10Hz$ e $7.5kHz$ em testes de um segundo por frequência. Durante cada frequência é realizado a medição da tensão e corrente *rms* fornecida pelo amplificador. Para comparação e maior precisão nos resultados são realizados os mesmos testes em frequência utilizando como referência resistor de 10Ω, desta forma, reduzindo os erros devido a imprecisão do amplificador. Com os valores de tensão *rms* obtidos, calcula-se a impedância para cada frequência utilizada, como disposto na Tabela 6.1 e Tabela 6.2.

Nas Tabela 6.1 e Tabela 6.2, as frequências elevadas não são analisadas. Este fato se deve ao aumento da impedância do dispositivo em teste, solicitando elevada tensão para análise. Devido a elevação de tensão, deve-se interromper os testes por dois motivos principais: i) com o aumento da tensão ocorre o aumento da potência fornecida pelo amplificador, reduzindo a fidelidade do mesmo na geração de sinais e ii) parâmetros de Thiele-Small são parâmetros de pequenos sinais[1]. Desta forma, ao analisar acima de $1V$, o sistema apresenta elevação do deslocamento da bobina, iniciando o funcionamento para grandes sinais[2]. As formas gráficas da impedância são apresentadas na Figura 6.1, e são geradas a partir do algoritmo computacional disposto no Apêndice A.1. O cálculo dos parâmetros de Thiele-Small é realizado através da análise dos parâmetros adquiridos de cada dispositivo. A análise matemática é apresentada em forma de algoritmo computacional disposto no Apêndice A.2.

[1] Em acústica pequenos sinais referem-se a amplitudes de tensão $< 1V$.
[2] Grandes sinais referem-se a amplitudes de tensão $\geq 1V$.

Tabela 6.1 - Parâmetros adquiridos - Transdutores i) GTO1514D e ii) GZIW12.

Referência		**GTO1514D**		**GZIW12**	
Frequência	**Tensão** (mV)	**Tensão** (mV)	**Impedância**	**Tensão** (mV)	**Impedância**
10	194,10	54,08	2,75	89,36	4,54
20	207,50	195,68	9,31	136,25	6,48
23	220,90	436,43	19,50	174,33	7,79
25	211,00	602,75	28,20	191,38	8,95
30	209,00	205,82	9,72	314,94	14,87
35	208,50	119,99	5,68	725,63	34,35
37	208,60	104,53	4,95	856,44	40,52
40	208,50	86,53	4,10	571,21	27,04
42	209,50	80,91	3,81	434,16	20,45
43	209,60	78,28	3,69	376,77	17,74
45	208,30	70,91	3,36	297,68	14,11
50	208,30	62,60	2,97	206,00	9,76
60	208,10	52,04	2,47	137,47	6,52
82	208,10	43,24	2,05	98,50	4,67
86	209,50	42,94	2,02	96,41	4,54
90	209,60	42,28	1,99	94,46	4,45
100	208,20	41,13	1,95	90,52	4,29
120	208,30	40,65	1,93	88,74	4,21
160	208,40	42,40	2,01	93,16	4,41
200	208,30	45,92	2,18	102,08	4,84
250	208,20	51,26	2,43	115,70	5,49
260	207,90	52,39	2,49	118,53	5,63
270	207,70	53,62	2,55	121,27	5,76
320	207,50	59,92	2,85	136,99	6,52
500	208,20	84,38	4,00	199,23	9,45
640	206,90	106,22	5,07	247,21	11,79
1000	206,00	159,75	7,65	376,94	18,06
1250	204,70	199,64	9,63	465,04	22,42
1500	202,70	235,21	11,45	551,99	26,88
2000	199,10	304,80	15,11	716,54	35,52
2500	194,30	372,46	18,92		
3000	189,00	434,32	22,68		
4000	177,40	539,21	30,00		
5000	165,30	619,67	37,00		
7500	136,60	761,20	55,00		

Os valores de impedância são mensurados para analisar o funcionamento do dispositivo, verificando se são condizentes com os parâmetros fornecidos pelo fabricante. A ausência de parâmeros fundamentais e a influência do processo construtivo de cada dispositivo são analisados e sanados nesta fase. A partir dos parâmetros de Thiele-Small de cada dispositivo, é possível realizar a simulação no software WinIsd de forma a obter os parâmetros necessários para a construção do protótipo em escala real. São utilizados quatro tipos de transdutores eletroacústicos diferentes. Para testes em redução de escala é utilizado o transdutor **I** que possui diâmetro de 50 mm, potência de 3 W e impedância de 4 Ω, o mesmo não possui folha de dados disponível. Os demais transdutores são utilizados para testes em escala real, as características mecânicas e elétricas indicadas pelo fabricante são dispostas na Tabela 6.3.

Estudos de acústica se iniciam com a análise e construção das fontes sonoras. Esta análise tem base nos parâmetros de Thiele-Small do transdutor eletroacústico utilizado e da caixa acústica em que este é montado. O software WinISD possibilita a

Tabela 6.2 - Parâmetros adquiridos - Transdutores iii) UVSUB1k2 e iv) UVWO2K2.

Referência		**UVSUB1k2**		**UVWO2K2**	
Frequência	**Tensão** (mV)	**Tensão** (mV)	**Impedância**	**Tensão** (mV)	**Impedância**
10	194,10	38,66	1,97	77,23	3,93
20	207,50	54,79	2,61	86,91	4,13
23	220,90	66,00	2,95	94,54	4,22
25	211,00	69,71	3,26	91,80	4,29
30	209,00	96,64	4,56	95,25	4,50
35	208,50	156,79	7,42	100,41	4,75
37	208,60	214,26	10,14	102,95	4,87
40	208,50	425,34	20,14	107,02	5,07
42	209,50	865,28	40,77	110,71	5,22
43	209,60	849,44	40,00	112,32	5,29
45	208,30	428,04	20,28	115,27	5,46
50	208,30	157,33	7,46	125,76	5,96
60	208,10	74,57	3,54	157,12	7,45
82	208,10	42,89	2,03	584,05	27,70
86	209,50	41,50	1,96	891,49	42,00
90	209,60	40,43	1,90	580,13	27,32
100	208,20	38,88	1,84	189,28	8,97
120	208,30	39,91	1,89	93,09	4,41
160	208,40	47,28	2,24	108,78	5,15
200	208,30	56,60	2,68	139,71	6,62
250	208,20	68,68	3,26	177,89	8,43
260	207,90	70,52	3,35	185,32	8,80
270	207,70	73,97	3,52	192,38	9,14
320	207,50	86,99	4,14	229,76	10,93
500	208,20	134,60	6,38	363,98	17,26
640	206,90	170,91	8,15	463,27	22,10
1000	206,00	265,48	12,72	723,36	34,66
1250	204,70	329,30	15,88	856,15	41,28
1500	202,70	389,20	18,95		
2000	199,10	513,32	25,45		
2500	194,30	625,19	31,76		
3000	189,00	729,67	38,11		
4000	177,40				
5000	165,30				
7500	136,60				

Tabela 6.3 - Parâmetros dos transdutores eletroacústicos utilizados.

Fabricante	**Ultravox**		**Ground Zero**	**JBL**
Modelo	**UVWO2k2**	**UVSUB1k2**	**GZIW12**	**GTO1514D**
Diâmetro (mm)	284	285	310	345
Potência (W)	2200	1200	1000	350
F_s (Hz)	79,59	42,44	36,90	24,90
Q_{TS}	0,75	0,67	0,67	0,47
Q_{ES}	0,81	0,70	0,75	0,51
Q_{MS}	10,43	16,19	6,57	7,15
V_{AS} (l)	15,17	17,92	35,60	161,40
R_e (Ω)	2,80	1,80	4,10	1,90
BL (Tm)	13,33	12,35	16,1	12,08

análise da fonte sonora através da modelagem do sistema com base em: i) tipo de caixa acústica utilizada, ii) parâmetros mecânicos e iii) parâmetros de Thiele-Small do transdutor eletroacústico utilizado.

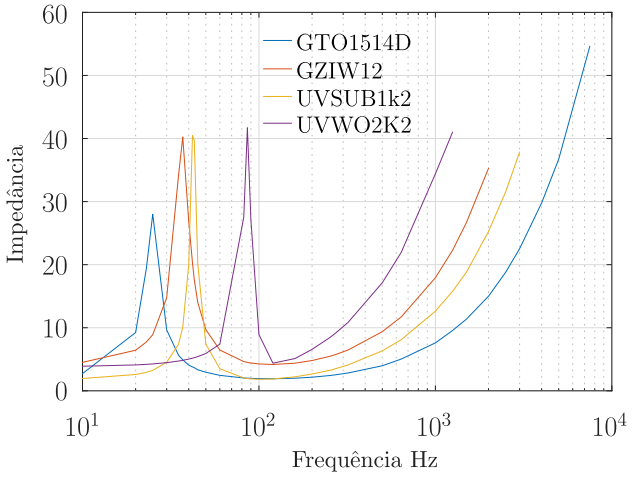


Figura 6.1 - Impedância dos transdutores eletroacústicos apresentados na Tabela 6.1 e Tabela 6.2.

6.4 Arranjo de fontes sonoras

As fontes sonoras congruentes permitem elevar a intensidade sonora devido a obtenção de interferência construtiva de ondas. Para gerar estas ondas é utilizado o atraso individual nas fontes em relação ao ponto alvo. Inicialmente o cálculo é realizado para frequência única e posteriormente é verificado as próximas frequências que obtém o pico no mesmo ponto. O pico das ondas é direcionado ao ponto médio entre as fontes, podendo ser deslocados de acordo com a necessidade, alterando a frequência. Para direcionar pontos de máxima pressão no alvo utiliza-se frequências variadas, desta forma, ao selecionar a distância do alvo, são calculadas as frequências que atingem o pico de pressão sonora de acordo com o algoritmo disposto no Apêndice A.3. Para a velocidade do som $\nu = 343ms$ e distância entre a fonte e o alvo de $2,0m$, têm-se que as 5 primeiras frequências que atingem o pico de pressão no alvo são: i) $42{,}875Hz$, ii) $214{,}38Hz$, iii) $385{,}88Hz$, iv) $557{,}38Hz$ e v) $728{,}88Hz$, como apresentado na Figura 6.2.

O software GNU Octave é utilizado para gerar o sinal aplicado juntamente com o atraso necessário para cada fonte sonora e utilizando processamento paralelo cada vetor de áudio é direcionado ao canal específico do modelo em redução de escala. Para isto, utiliza-se o conjunto placa de áudio e amplificador totalizando dois canais de saída por conjunto. De foma matemática, o atraso é dado pelo tempo necessário para a onda alcançar o ponto alvo, logo, os atrasos são obtidos por meio do cálculo da distância entre dois pontos. A velocidade do som utilizada é calculada para o ambiente no momento da medição, considerando temperatura e pressão atmosférica

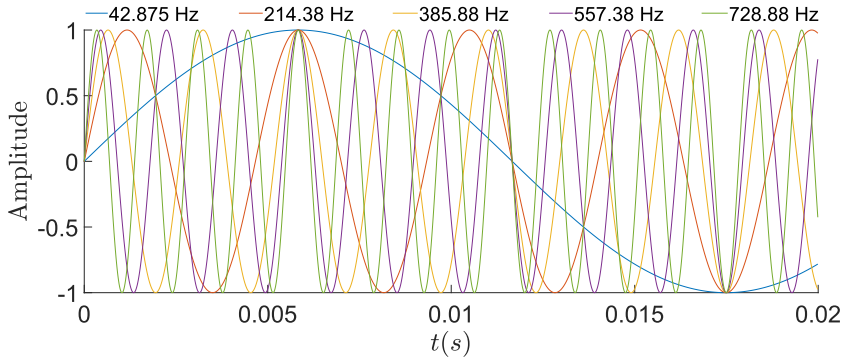


Figura 6.2 - Cálculo no atraso de onda para o arranjo de caixas acústicas propostas.

no ambiente.

6.4.1 Avaliação em redução de escala

O ganho de pressão sonora é obtido ao utilizar ondas sonoras congruentes, geradas através de soma de atrasos para direcionar a pressão sonora no alvo. O atraso é calculado a partir do centro do arranjo. O direcionamento obtido é aferido com auxílio de microfones e decibelímetro. Para verificação, o arranjo é rotacionado em 15^o a cada medição, com microfone a distância de um metro. A avaliação deste ganho de pressão é realizada através de modelo em redução de escala, contando com 25 fontes sonoras. São montados quatro arranjos diferentes: i) 3×3, ii) 4×4 e iii) 5×5. A análise é realizada através do gráfico polar indicando a direção obtida, como apresentado na Figura 6.3. A Tabela 6.4 dispõe a análise da diretividade do arranjo, indicando a intensidade máxima e dispersão.

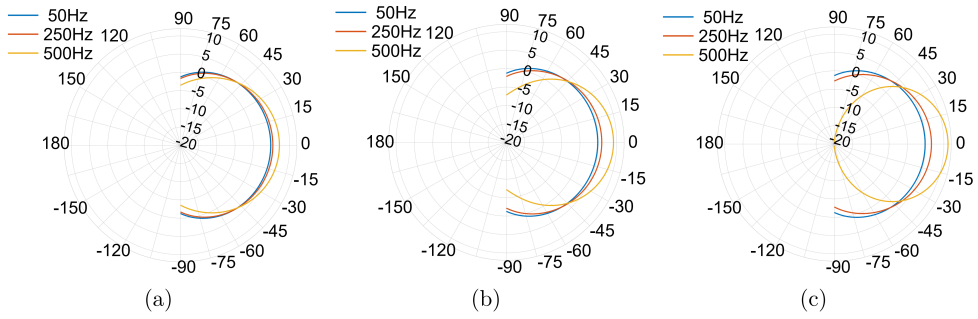


Figura 6.3 - Gráfico polar do direcionamento do arranjo quadrático em frequências de $50Hz$, $250Hz$ e $500Hz$ mensurados em: (a) 9 fontes sonoras, (b) 16 fontes sonoras e (c) 25 fontes sonoras.

A partir da análise da Figura 6.3, observa-se o aumento da diretividade com o au-

Tabela 6.4 - Análise de dispersão do arranjo das caixas acústicas propostas.

Número de elementos	Dispersão	50 Hz	250 Hz	500 Hz
3×3	Diretividade do arranjo	4.80 dBi	5.38 dBi	7.19 dBi
	Azimutal	131.00°	115.00°	81.96°
	Elevação	132.00°	116.00°	82.00°
4×4	Diretividade do arranjo	4.82 dBi	5.91 dBi	9.10 dBi
	Azimutal	129.00°	103.02°	64.24°
	Elevação	130.00°	104.00°	66.00°
5×5	Diretividade do arranjo	4.84 dBi	6.58 dBi	11.12 dBi
	Azimutal	130.00°	92.00°	54.00°
	Elevação	129.00°	90.76°	52.28°

mento da frequência. Ao desenvolver o arranjo com maior número de fontes obtém-se elevação na diretividade. A Figura 6.4 apresenta o arranjo de 16 fontes sonoras (4×4) utilizado para testes. O arranjo pode ser realizado linearmente, como apresentado na Figura 6.5, na qual é apresentado o resultado do arranjo de 3, 5, 7 e 9 caixas para obter frente única e uniforme de onda utilizando frequência de $250Hz$. A análise do gráfico polar obtido nas Figura 6.4 e Figura 6.5 apresentam o aumento na diretividade de acordo com a quantidade de transdutores e frequência do arranjo. A Tabela 6.5 dispõe a análise da diretividade do arranjo, indicando a intensidade máxima e dispersão.

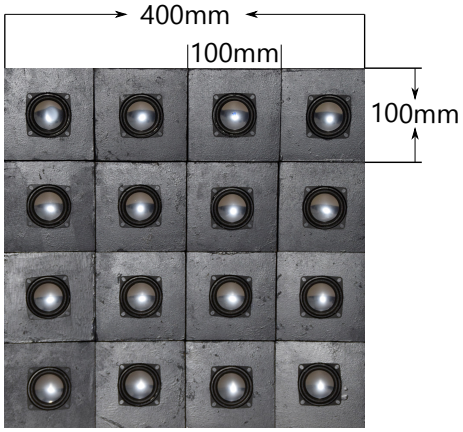


Figura 6.4 - Arranjo 4×4 de caixas acústicas.

Tabela 6.5 - Diretividade do arranjo linear de caixas acústicas a $250Hz$.

Número de elementos	Diretividade do arranjo	Dispersão	
		Azimutal	Elevação
3	8.06 dBi	47.10°	132.00°
5	10.08 dBi	28.02°	132.00°
7	11.49 dBi	19.94°	132.00°
9	12.56 dBi	15.48°	132.00°

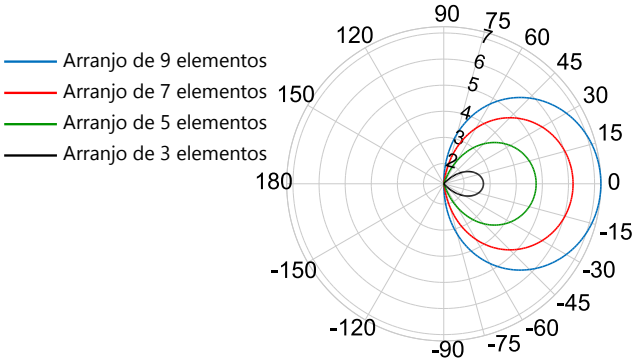


Figura 6.5 - Diretividade devido ao arranjo linear de caixas acústicas.

6.5 Protótipo I: indução da vibração para derriça acústica

Para a simulação do Protótipo de indução da vibração para derriça acústica são utilizados instrumentos de medição, geração de sinal, amplificadores, transdutores eletroacústicos e invólucros acústicos. Diferente das demais aquisição e análise dos dados, esta utilizou acelerômetro MPU9250, conectado através de interface I2C na placa Raspberry *Pi*. Utilizou-se ainda decibelímetro com capacidade de medição de $30dB$ a $130dB$, resolução $0,1dB$, resposta de frequência $31,5Hz$ a $8,5kHz$, fabricante Minipa, modelo MSL-1355B. O restante dos equipamentos para aquisição e análise dos dados permanecem os mesmos. Os dispositivos utilizados estão descritos na Tabela 6.6 e as características dos transdutores eletroacústicos estão dispostas na Tabela 6.7.

Tabela 6.6 - Dispositivos utilizados na simulação da indução da vibração para derriça.

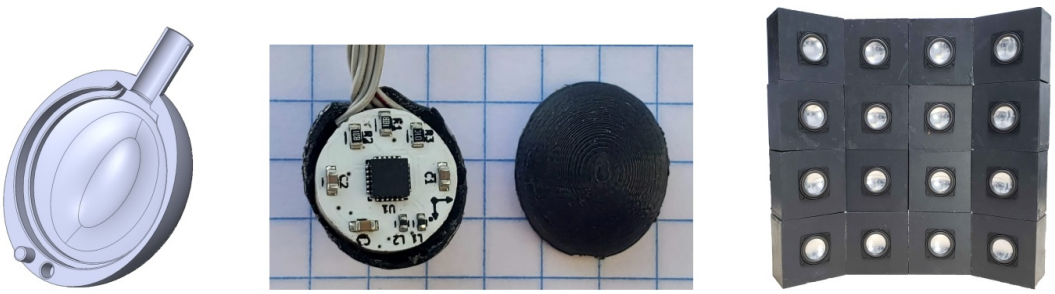
Dispositivo	**Aplicação**	**Datasheet**
MPU9050	Sensor inercial	InvenSense Inc. (2016)
DHT22	Sensor de temperatura e umidade	Aosong Electronics Co. (2015)
BMP280	Sensor de pressão	Bosch Sensortec GmbH (2021)
Raspberry Pi 3B+	Placa controladora	Raspberry Pi Foundation (2018)
GZPA 1.6 HC	Amplificador de áudio	Ground Zero Mobile Entertainment (2015)
Soundigital 1000.1D	Amplificador de áudio	Soundigital Amplifiers (2015)
Ground Zero GZIW 12"	*Subwoffer*	Ground Zero (2017)
Ultravox 1k2 12"	*Subwoffer*	Ultravox Group (2015b)
JBL GTO1514D	*Subwoffer*	Harman International Industries, Inc. (2012)
Ultravox 2k2 12"	*Woffer*	Ultravox Group (2015a)
Loudspeaker 3W 4ohm	*Full range*	N.A.
PAM8403	Amplificador de áudio	Diodes Incorporated (2012)
USB Soundboard	Interface de áudio	N.A.
Shure SM58	Microfone	Shure (2006)
Behringer X1204USB Xenyx	Controlador e interface de áudio	Behringer (2021)

Tabela 6.7 - Características dos transdutores eletroacústicos utilizados na simulação da indução da vibração para derriça.

Caixa Acústica	4^{th}	**A.**2^{nd}	**B.**2^{nd}	**C.**2^{nd}
Transdutor eletroacústico	Ground Zero GZIW 12"	Ultravox UVSUB1k2 12"	JBL GTO1514D 15"	Ultravox UVWO2k2 12"
Potência rms $[W]$	700	1200	350	2200
Potência de pico $[W]$	1000	2400	1400	4400
Frequência de resposta [Hz]	35 - 120	20 - 1700	23 - 400	50 - 3000
Tipo	Passa banda 4ª ordem	Dutada	Dutada	Dutada
Volume	V1: 21L / V2: 35L	40L	55L	35L

6.5.1 Grão de café hipotético para simulação

O grão de café hipotético para simulação utiliza na sua construção os dispositivos: i) sensor inercial encapsulado (MPU9250), ii) acelerômetro e iii) giroscópio, como apresentado na Figura 6.6. De posse do grão de café hipotético, submete-o a vibração para derriça acústica no modelo em redução de escala. Os dados são analisados para obter a amplitude de vibração, oscilações e indicar a aceleração do grão de café hipotético. A posição no tempo é obtida aplicando dupla integração nos sinais de aceleração. A Figura 6.6(c) apresenta o protótipo em escala reduzida com arranjo quadrático de dezesseis alto-falantes, no qual cada transdutor eletroacústico tem diâmetro de $50mm$ e potência de $3W$. A transformada rápida de Fourier (TRF) é aplicada para cada uma das três dimensões e calcula-se o vetor resultante para obter a direção da vibração. Os valores de intensidade e direção oscilam em função da frequência da fonte sonora e do amortecimento do ambiente. Os modos de vibração são apresentados na Figura 6.7.



(a) (b) (c)

Figura 6.6 - Modelo do grão de café hipotético e instrumentado: (a) projeto 3D para impressão, (b) grão hipotético com MPU9250 em papel quadriculado $5mm \times 5mm$ e (c) protótipo para derriça acústica em escala reduzida.

A Figura 6.7 apresenta o movimento induzido pela fonte sonora ao grão de café

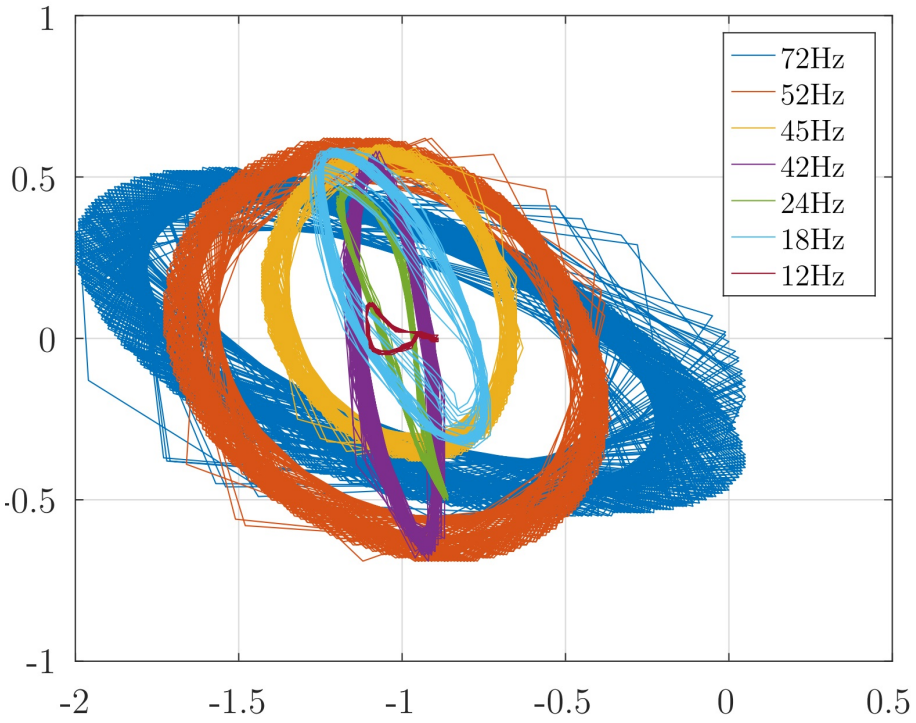


Figura 6.7 - Análise em escala reduzida da vibração do grão.

hipotético. Cada frequência gera deslocamentos diferentes, como: i) oscilatório com $72Hz$, $52Hz$ e $45Hz$, em que o alvo se move em única direção, ii) rotacional com $42Hz$ e $24Hz$ em que o alvo se move em duas direções diferentes e iii) oscilatória e rotacional com $18Hz$ e $12Hz$. A amplitude de movimento indica deslocamento mais significativo no grão, entretanto, a amplitude maior (frequência de $72Hz$) não implica em maior taxa de colheita. A taxa de colheita depende principalmente do movimento oscilatório e rotacional, ideal para a colheita de grãos sem o pedúnculo.

6.5.2 Protótipo em escala real

O protótipo em escala real foi desenvolvido a partir da análise dos parâmetros dos transdutores eletroacústicos. São projetadas caixas acústicas específicas para cada transdutor de acordo com a utilização. A limitação no projeto das caixas é relacionada as dimensões do transdutor utilizado, porém caixas acima de $0{,}10m^3$ são inviáveis devido ao peso e dimensões. O protótipo construído conta com três amplificadores, dois *Sound Digital* de $1000W$ e um *Ground Zero* de $1600W$, banco de baterias com quatro baterias de $12V$ e $150A$ e filtro capacitivo de $5F$, como apresentado na Figura 6.8. O amplificador *Ground Zero* é utilizado nos transdutores eletroacústicos GZIW12SPL, que são testados em caixa passa banda de quarta or-

dem e em passa banda de segunda ordem. Na Figura 6.8, os fios e conexões foram removidos para não poluir a imagem.

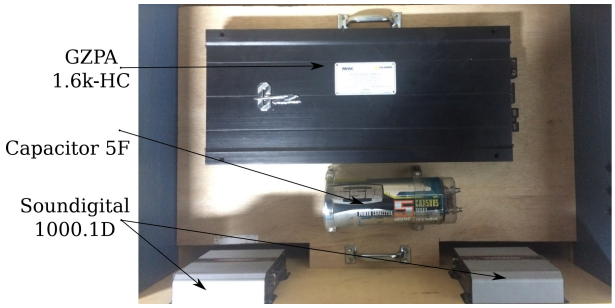


Figura 6.8 - Painel de controle de áudio.

A principal diferença entre ambas as caixas (quarta e segunda ordem) é a presença de dutos na parte frontal e traseira do invólucro acústico, o passa-banda de quarta ordem, permite maior fluxo de ar e alta potência acústica em uma estreita faixa de operação. O protótipo em escala real é desenvolvido usando 20 transdutores eletro-acústicos. A dimensão final é $2,40m$ de altura e $1,60m$ de largura, tendo dimensões baseadas em colheitadeiras de café comerciais. O protótipo é apresentado na Figura 6.9 e as características de cada fonte acústica são dispostas na Tabela 6.7.

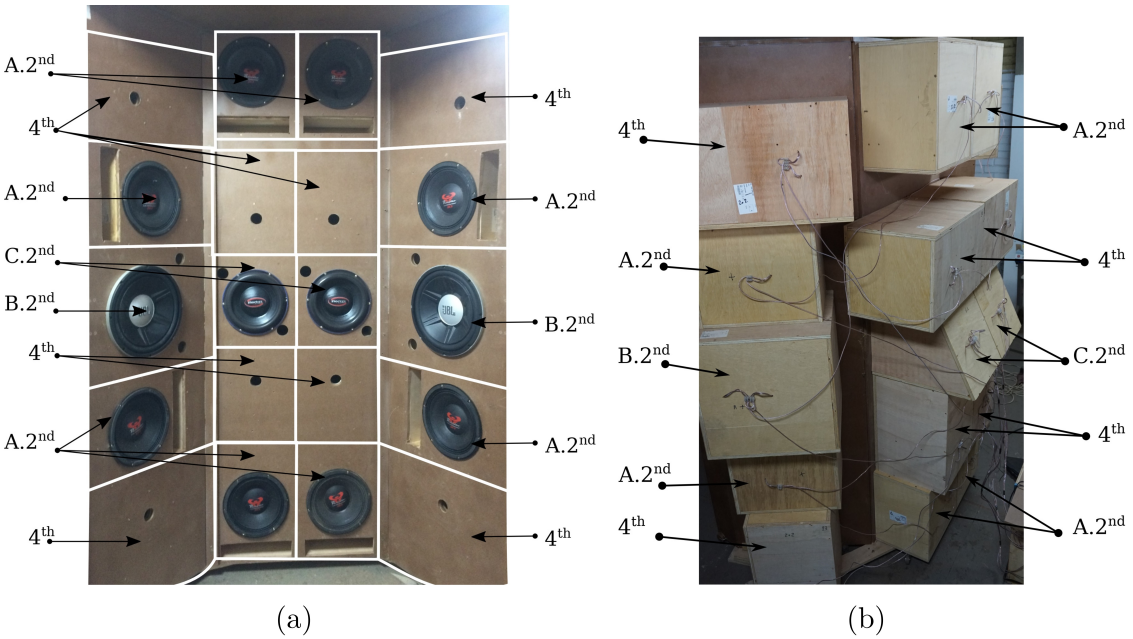


Figura 6.9 - Protótipo em escala real da derriça acústica: (a) vista frontal e (b) vista posterior.

O protótipo em escala real da derriça acústica, Figura 6.9, apresenta: i) oito caixas passa banda utilizadas para o transdutor GZIW12SPL que é conectado ao amplificador *Ground Zero Plutonium GZPA 16000DXII* com potência de $1600W$, ii) oito caixas seladas utilizadas para o transdutor UVWO2k2, conectado ao amplificador *Sound Digital* de $1000W$, iii) quatro caixas dutadas, duas utilizando o transdutor GTO1514D e duas com o UVSUB1k2, conectadas ao segundo amplificador *Sound Digital* de $1000W$. A vibração é resultado da variação de pressão sonora no meio e o nível desta pressão sonora, SPL, é relacionado diretamente com o grau de oscilação transmitido ao alvo. Neste projeto, o procedimento para medir a vibração é realizado com base em valores obtidos por sensor inercial do tipo acelerômetro, que de posse da vibração a qual o sensor está sujeito, juntamente com a área da superfície do mesmo, é calculada a força aplicada devido a variação da pressão sonora.

O movimento induzido pode ser: i) oscilatório, no qual o corpo todo está sujeito a movimentação e funciona como pêndulo simples, ii) rotacional, na qual apenas o corpo de prova se movimenta ou iii) oscilatório e rotacional, no qual o corpo de prova possui movimentação total e funciona como pêndulo duplo. O modo oscilatório e rotacional é o ideal para colheita de grãos sem pedúnculo. Este modo de vibração é obtido com a utilização de ao menos duas fontes acústicas, induzindo a vibração de frente e na lateral do corpo ao mesmo tempo. O modo de vibração é obtido a partir da análise do giroscópio, encapsulado em conjunto com o acelerômetro.

6.5.3 Validação do protótipo de derriça por indução acústica

O protótipo em escala real é testado em laboratório com partes do cafeeiro (*plagiotrópicos*[3]) para colher grãos no estado adequado de maturação. A Figura 6.10 apresenta o teste experimental com detalhes dos grãos de café antes e após a colheita por indução acústica. Para a análise da metodologia proposta, foram utilizados *plagiotrópicos* do cafeeiro com folhas e considerando três estágios de maturação dos frutos: i) frutos verdes $\approx 15\%$, ii) frutos maduros (adequados) $\approx 60\%$ e ii) frutos secos $\approx 25\%$. Obteve-se taxa de derriça de $\approx 40\%$ para frutos no estádio adequado de maturação e $\approx 10\%$ para grãos verdes e secos, garantindo a precisão desejada na realização da colheita seletiva.

O *plagiotrópicos* do cafeeiro foi cortado com cuidado para não desprender o fruto no campo. Para o transporte do campo para o laboratório, foi necessário cobrir o galho em fibra de silicone para reduzir o desprendimento dos frutos. Para a derriça seletiva,

[3]Ramos que crescem em posição horizontal ou decumbente e ramificam produzindo flores e folhas, seguindo padrão de simetria bilateral em único plano.

(a) (b)

Figura 6.10 - Validação da colheita acústica seletiva com *plagiotrópicos* do cafeeiro: (a) antes e (b) após.

foi utilizada a frequência de $18Hz$ nos grãos. No entanto, para obter $18Hz$ nos grãos foi necessário gerar $42Hz$ nos transdutores eletroacústicos 4^{th}, $A.2^{nd}$ e $B.2^{nd}$ e $557Hz$ nos transdutores eletroacústicos $C.2^{nd}$, como apresentado na Figura 6.9 e disposto na Tabela 6.7. Estes valores de frequência são apresentados na Figura 6.2.

6.6 Protótipo II: direcionamento de produto fitossanitário

Para os testes de simulação do Protótipo de direcionamento de produto fitossanitário são realizadas comparações com o sistema de pulverização tradicional e o protótipo proposto. O direcionamento foi mensurado com papel hidro-sensível produzido pela *Syngenta Crop Protection AG*, que é construído com cobertura amarela que se torna azul ao ser exposta à água pulverizada. A aplicação é realizada com pulverizador costal que possui pressão de operação de $45psi$ e a aplicação é realizada em ambiente livre de correntes de ar. É utilizado transdutor eletroacústico montado em caixa específica que promove elevado fluxo e ar e variação dos campos sonoros.

6.6.1 Estudo de caso com pulverizadores em movimento e fonte sonora fixa

O estudo de caso sobre o direcionamento do produto fitossanitário representa o teste de cobertura foliar. O bico de pulverização é o cone cheio, posicionado a $0,60m$ de altura, com os papéis hidrossensíveis medindo $10mm \times 30mm$,, separados por $0,15m$ na horizontal e $0,20m$ na vertical. O papel hidrossensível tem a função de simular as folhas e está posicionado na área de teste como apresentado na Figura 5.9 e Figura 5.10. O primeiro teste realizado utiliza o bico de pulverização emmovimento

e a fonte sonora fixa, na qual os alto-falantes possuem 56 litros com $510mm$ de altura, em base de $350mm \times 350mm$ e são colocados ao lado da coluna **6** para focar a aplicação. Os resultados da aplicação são apresentados na Figura 6.11 e a análise do percentual de cobertura é disposta na Tabela 6.8.

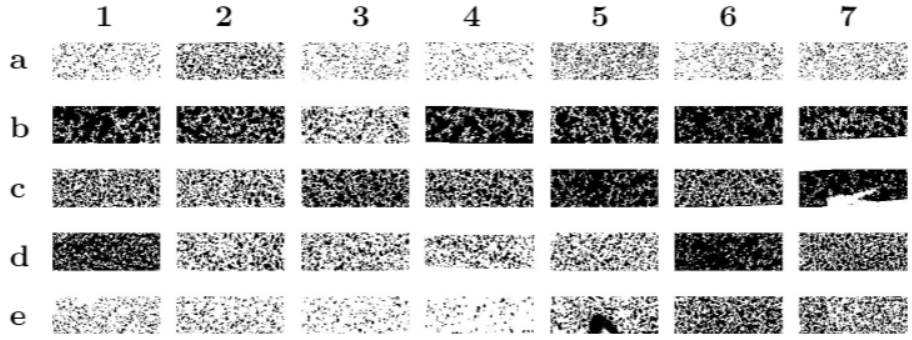


Figura 6.11 - Direcionamento em coluna.

Tabela 6.8 - Percentual de cobertura foliar para direcionamento em coluna, conforme Figura 6.11.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
a	12,16	32,82	11,90	9,23	27,38	14,89	18,87
b	78,34	72,00	29,84	76,32	74,85	85,59	66,61
c	49,47	39,53	66,48	56,41	84,49	61,42	72,09
d	75,51	33,86	31,14	28,08	32,76	86,04	57,70
e	16,35	16,75	9,29	6,30	39,31	57,94	40,80

A Figura 6.11 apresenta os papéis hidro-sensíveis coletados após o procedimento de pulverização. A cobertura foliar é representada na imagem a partir da quantidade de pontos escurecidos, que indicam os pontos em que o papel entra em contato com o produto fitossanitário. Os papéis hidrossensíveis da coluna **6** apresentam cobertura foliar elevada em relação as demais regiões. Observa-se também que a pulverização sem focalização, nas colunas **1** a **5** e **7**, apresenta maior taxa de dispersão, resultando em maior deriva do produto fitossanitário.

6.6.2 Estudo de caso com pulverizadores e fonte sonora em movimento

No segundo teste, o bico de pulverização é o cone cheio e a fonte sonora se move uniformemente junto com o bico de pulverização ao longo do plano de aplicação, focando nas linhas **c** e **d**. Os resultados da aplicação são apresentados na Figura 6.12 e o percentual de cobertura é disposto na Tabela 6.9. A Figura 6.12 apresenta os papéis hidro-sensíveis coletados após o procedimento de pulverização. A partir da

análise dos dados, observa-se que nas linhas **c** e **d**, para quais são direcionadas a aplicação, a cobertura foliar é maior que nas demais regiões. Na Tabela 6.9, observa-se que a pulverização nas linhas **a** e **e** possuem acentuada redução, comprovando o aumento na diretividade da aplicação, consequentemente, reduzindo a deriva na aplicação.

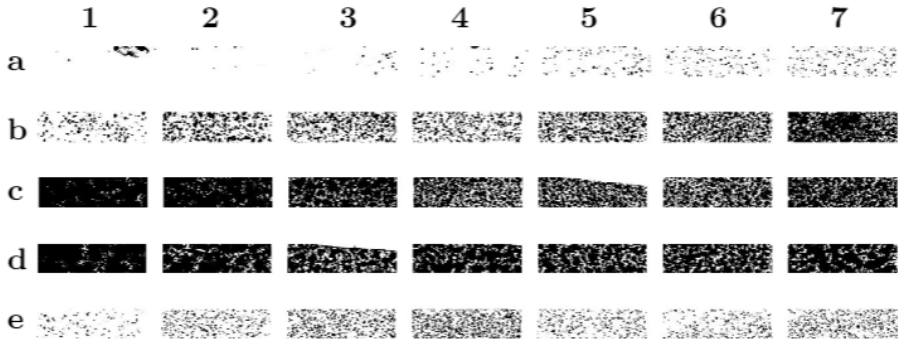


Figura 6.12 - Direcionamento em linha.

Tabela 6.9 - Percentual de cobertura foliar para direcionamento em linha.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
a	4,19	0,41	1,29	2,46	5,23	5,92	7,71
b	13,18	33,62	34,39	26,56	39,91	52,04	77,74
c	97,22	94,79	84,80	64,76	60,10	63,63	77,46
d	95,85	87,08	67,80	83,46	77,59	77,21	84,28
e	4,75	14,11	24,39	31,58	13,88	12,13	19,69

6.6.3 Estudo de caso do direcionamento estático

Este estudo de caso é realizado com o bico pulverizador de cone cheio e aplicação pontual durante dois segundos. São realizadas duas aplicações, a primeira sem a influência do direcionador acústico e a segunda com o direcionador acústico, como ilustrado na Figura 5.11. A Figura 6.13 apresenta a cobertura foliar obtida após o resultado da pulverização, nas quais as Figura 6.13(a) e Figura 6.13(b) apresentam os papéis hidro-sensíveis coletados após o procedimento de pulverização sem e com direcionamento acústico, respectivamente. Observa-se que na comparação entre os pontos de aplicação na Figura 6.13, ao utilizar o direcionamento acústico, tem-se elevação da cobertura foliar nos pontos centrais e redução nos pontos periféricos, demonstrando a redução da deriva e melhor cobertura no ponto de aplicação.

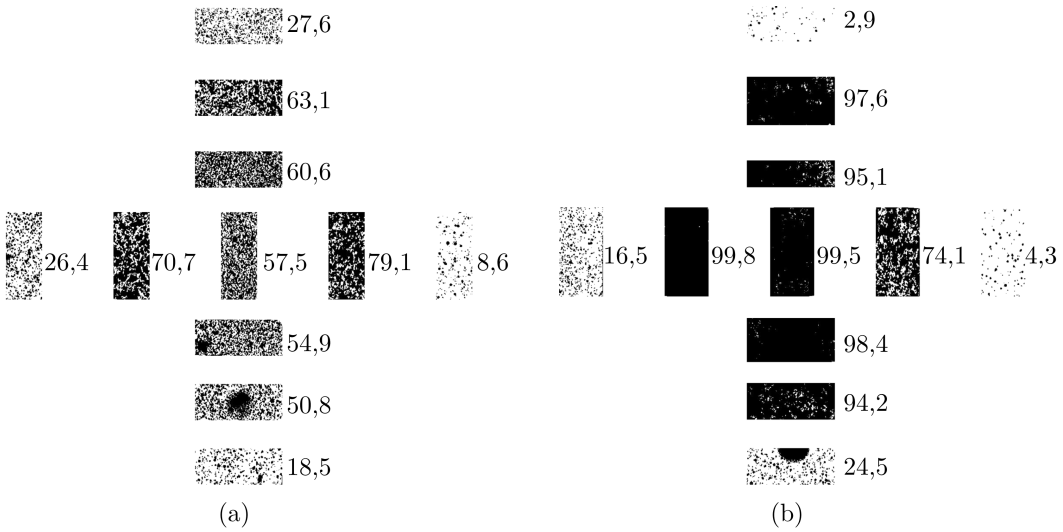


Figura 6.13 - Percentual de assertividade: (a) aplicação normal sem direcionamento acústico, (b) aplicação com direcionamento acústico.

6.6.4 Análise da diretividade

Relacionando a cobertura foliar média disposta na Tabela 6.8, as linhas **b**, **c** e **d** nas colunas **1** até **5** e **7**, obtém-se cobertura média de $62,09\%$. A média da coluna **6**, linhas **b**, **c** e **d**, nas quais a aplicação é focada utilizando a técnica proposta, obtém cobertura média de $85,59\%$. O aumento da cobertura foliar de $62,09\%$ para $85,59\%$ representa aumento na eficiência de $37,85\%$. A eficiência do direcionamento com pulverizador e fonte sonora em movimento é obtida através da cobertura foliar média nas linhas **c** e **d** da Tabela 6.9, obtendo valor de cobertura de $80,52\%$ utilizando o direcionamento acústico. Comparando os valores médios de cobertura foliar com pulverizadores em movimento e fonte sonora fixa e sem direcionamento acústico, nas linhas **c** e **d** e colunas **1** até **5** e **7**, da Tabela 6.8, observa-se que o valor da cobertura foliar de $52,94\%$ aumenta para $80,52\%$, representando acréscimo de $52,10\%$ na eficiência.

Analisando os experimentos, com aumento de $37,85\%$ para $52,10\%$, obtém-se acréscimo médio de $44,97\%$ na cobertura foliar com a técnica proposta. Para verificar os locais de redução de deriva, linhas **a** e **e** da Tabela 6.9 e as linhas **a** e **e** e colunas **1** até **5** e **7**, da Tabela 6.8, a taxa de deriva reduz em de $16,55\%$ para $6,81\%$. No geral, a taxa de deriva é reduzida em $58,82\%$, demostrando o aumento na diretividade, melhorando a eficiência e eficácia na assertividade do alvo. O aumento de desempenho é devido a direção produzida pelo fluxo de ar controlado pelos transdutores eletroacústicos, que produz deslocamentos em pontos de maior pressão sonora.

A variação da pressão sonora induz a diretividade através da oscilação da pressão gerada pelas baixas e altas frequências, proporcionando assim maior amplitude de cobertura das folhas.

6.7 Discussão

As técnicas acústicas aplicadas na agricultura limitam-se a reduzir as vibrações e ruídos sonoros, visando o conforto do operador e reduzindo o desgaste da máquina. Neste trabalho, técnicas acústicas são aplicadas para auxiliar em: i) induzir vibrações de forma controlada, sem contato com as plantas e realizar a colheita seletiva direcionando a aplicação do produto fitossanitário e ii) reduzir a deriva e obtendo melhor percentual de cobertura foliar. A aplicação das técnicas propostas neste trabalho à agricultura tem potencial para melhorar o desenvolvimento agrícola devido redução de perdas devido ao desgaste inerente ao método tradicional de colheita e aumento do valor agregado do grão devido à derriça seletiva e a redução da quantidade de produto fitossanitário utilizado.

A aplicação de vibração para colheita é prática recorrente na agricultura. Vários trabalhos que analisam esta técnica têm base na tecnologia existente de hastes vibratórias em contato com a planta. Os estudos para a evolução da técnica limitam-se à análise da frequência e amplitude de vibração das hastes para realizar a colheita seletiva. As análises laboratoriais têm base na transmissão direta de vibração, em que o galho é conectado a plataforma oscilante controlada, e os valores ideais para derriça são baseados no acúmulo de energia cinética (NORRIS, 2001; SILVA et al., 2002; QUEIROZ et al., 2007; JÚNIOR et al., 2020). Este trabalho obtém a frequência de vibração para colheita analisando o modo de vibração e oscilação induzida sem contato diretamente no fruto.

O desenvolvimento da fruta eletrônica (alvo instrumentado), utilizando sensores inerciais foi importante para reduzir o tempo de experimentação e otimização dos parâmetros, auxiliando na aquisição de dados e permitindo realizar estudos fora do período de colheita. Comparado com os resultados de Silva et al. (2015) e Kazama et al. (2021), que apresentam eficiência na colheita seletiva de 72% a 92%, altamente relacionada com a época de colheita. Este trabalho apresenta nova tecnologia que está em fase de protótipo e realiza colheita seletiva sem contato com a planta. Mesmo assim, foi alcançada eficiência de aproximadamente 40% e reduzindo o desgaste na planta, justificando a menor eficiência quando comparada a outras técnicas comerciais.

Tradicionalmente, o direcionamento de produtos fitossanitários é obtido por meio de barreira de ar ou eletrificação de gotas (CAMPANHOLA; BETTIOL, 2003; JØRGENSEN et al., 2007; ROMÁN et al., 2009; SASAKI et al., 2013). Segundo Balsari et al. (2007), os bicos de indução de ar podem reduzir a deriva para média de $6,80\%$, comprovando a precisão da metodologia proposta, que obtém deriva média de $6,81\%$. As técnicas tradicionais não permitem a aplicação em condições ambientais adversas. Neste trabalho, o direcionamento da aplicação é obtido com a variação da pressão sonora, permitindo o direcionamento de acordo com o posicionamento do alvo biológico na planta. Outro fator crítico é a aquisição de parâmetros ambientais, analisando estas variações nos cálculos utilizados para o direcionamento. Se houver mudança na direção do vento, a direção da pressão sonora pode ser alterada para compensar as mudanças do ambiente.

Outro ponto inovador abordado neste trabalho é a aplicação de similitude acústica, métodos de redução de escala para criar, analisar e validar técnicas acústicas. Estudos acústicos têm geralmente base em simulações de métodos de elementos finitos, mas a complexidade da simulação limita seu uso (KARJALAINEN et al., 2001; AHONEN, 2003; SAHU et al., 2015; BEZZOLA et al., 2019). Os resultados obtidos na redução de escala permitem fazer inferências sobre as medidas do protótipo em tamanho real com a facilidade e precisão dos instrumentos utilizados na bancada e reduzindo o custo financeiro e o tempo necessário para a construção e teste dos dispositivos.

Durante o desenvolvimento deste trabalho surgiram dificuldades como: i) necessidade de equipamentos específicos para medir os parâmetros mecânicos e elétricos do sistema, exigindo a construção de diferentes tipos de equipamentos para realizar os estudos e ii) curto período de colheita na fazenda que fornece os grãos, limitando o tempo para ajustar a técnica e testar os dispositivos desenvolvidos. Alguns erros foram superados, como i) utilização de transdutores com descrição incompleta do fabricante e parâmetros incorretos, ii) construção de alto-falantes utilizando os parâmetros fornecidos pelo fabricante e não com parâmetros reais do dispositivo, iii) amplificadores que necessitam pós-tratamento para redução de ruído, iv) ensaios realizados com grãos fora do período ideal de colheita e v) ensaios realizados com a frequência de vibração indicada para colheita tradicional.

Neste trabalho, vários resultados com potencial de aplicação foram alcançados, tais como: i) frentes de onda para aumentar a pressão sonora, ii) direção da pressão sonora a partir da variação de frequência, iii) diferença do movimento induzido de acordo com o tipo de forma de onda utilizada, iv) utilização de técnicas de redução

de escala para realizar testes fora do período de colheita, v) redução de escala para avaliar a direção e parametrização acústica, vi) verificação de parâmetros ambientais para obter a velocidade do som no ambiente, aumentando precisão em aplicações acústicas e permitindo testes em diferentes condições ambientais e vii) utilização de conjunto de microfones para verificar a direção do som.

A metodologia proposta é técnica em desenvolvimento cujo tempo para análise de campo está limitado ao período de colheita. Em laboratório, a metodologia apresentada é promissora, pois parte dos grãos com grau de maturação adequado se desprende durante o transporte do campo para o laboratório. Mesmo assim, obteve-se taxa média de $\approx 40\%$ na derriça seletiva. Espera-se que os testes de campo atinjam valores em torno de 65% para colheita de grãos com grau de maturação adequado.

A Tabela 6.10 fornece resumo da colheita seletiva realizada no galho (*plagiotrópicos*) transportado do campo para o laboratório, apresentada na Figura 6.10. Observou-se que atrasos individuais no protótipo em escala real devem ser usados para medir vibração em testes de campos. Além disto, testes devem ser evitados em algumas circunstâncias como: i) ambientes fechados devido à influência da pressão sonora no corpo humano, ii) testes com fontes de alimentação incorretas e uso de transdutores acima da potência nominal e iii) adaptação de alto-falantes sem realizar testes de software, pois alterações de impedância podem ocasionar danos ao dispositivo.

Tabela 6.10 - Resumo da utilização da técnica para derriça seletiva em laboratório

	Estágio de maturação		
	Verde	**Cereja**	**Seco**
Distribuição	15%	60%	25%
Taxa de derriça	3%	40%	7%

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento e aplicação de técnicas acústicas na cafeicultura de precisão. O trabalho propõe o desenvolvimento de: i) sistema de colheita seletiva de café sem contato com a planta e ii) direcionamento de produtos fitossanitários a ser aplicado utilizando fluxo ordenado de ar e vibração. Ao realizar o desenvolvimento de metodologia e dispositivo utilizando técnicas de acústica e vibração obteve-se exito na redução de perdas do produto fitossanitário, ao aumentar a assertividade da aplicação e melhoria na produtividade, ao realizar a derriça seletiva de grãos de café. Desta forma, comprovando que a utilização de campos de pressão sonora para focalizar a aplicação de produtos fitossanitários e realizar a derriça seletiva de grãos é prática viável.

Para desenvolver a pesquisa, são produzidos sistemas de aquisição de dados elétricos e acústicos para analisar os protótipos antes de sua construção. O projeto da caixa acústica tem base nos parâmetros adquiridos e validados para o transdutor eletroacústico e as características mecânicas são analisadas por software. O simulador de indução de vibração é construído para ambas as aplicações, colheita seletiva de café e produtos fitossanitários, permitindo analisar o controle sobre as variáveis e a precisão nas medições. Com o simulador validado, utilizando técnicas de similaridade, são desenvolvidos protótipos instrumentados. O protótipo para aplicação de produtos fitossanitários é construído e são obtidos resultados de redução da deriva e aumento da cobertura foliar. Através do protótipo de vibração de indução acústica para colheita seletiva, analisa-se o modo de vibração obtido por diferentes frequências, sendo possível utilizar a frequência de $18Hz$ no grão para derriça seletiva.

A análise realizada neste trabalho apresenta argumentos que acompanham a literatura ao observar a vibração do fruto na frequência de $18Hz$. No entanto, para gerar esta vibração diretamente no grão de café, é necessário induzir alta frequência, na faixa de $42Hz$ a $557Hz$. Este trabalho propôs o uso de frequências variáveis a fim de direcionar o feixe de pressão, obtendo a maior pressão sonora diretamente sobre o fruto, que é alvo da derriça seletiva. Portanto, conclui-se que a metodologia proposta pode ser utilizada na agricultura de precisão, pois foi possível realizar a derriça seletiva com aproximadamente 40% de eficiência e obter redução na deriva e aumento na cobertura foliar em média de aproximadamente 44%.

7.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições podem assim ser descritas:

- Desenvolvimento de metodologia para derriça seletiva de grãos sem contato com o fruto;
- Desenvolvimento de metodologia para direcionamento de produto fitossanitário;
- Desenvolvimento de sistema para controle da pressão sonora utilizando técnicas acústicas;
- Desenvolvimento de fruto eletrônico para avaliação de sistemas de derriça;
- Desenvolvimento de sistema para obtenção de parâmetros em transdutores eletroacústicos;
- Desenvolvimento de simulador em redução de escala para avaliação de sistemas de derriça e direcionamento de produtos fitossanitários utilizando técnicas de similitude em acústica.

Artigo em periódico

FURRIEL, G. P.; SILVA, BRUNNA C. R.; COIMBRA, A. P.; CALIXTO, W. P., Acoustics applied in the development of equipment for precision agriculture: Coffee handling and harvesting. Computers and Electronics in Agriculture, ISSN 0168-1699, Volume 198, July, 2022.

SILVA, A. H. F.; MAGALHAES, A. S.; BULHOES, JUNIO S.; WAINER, G. A.; FURRIEL, G. P.; CALIXTO, W. P., Parametric Regression Applied for Determination of Electrical Parameters of Synchronous and Induction Generators Operating in Parallel on the Electrical Energy Repowering System. Energies, ISSN 1996-1073, 2021.

SILVA, U. F.; Q. JUNIOR, M. I.; LEMOS, S.; FURRIEL, G. P.; SEGATTI, N. M. S.; SILVA, A. H. F.; CALIXTO, W. P., Estimate of Geopressures using Conformal Mapping in Eccentrical Wellbores. Transactions on Environment and Electrical Engineering, v. 2, p. 36-42, 2017.

MATIAS, CALEBE A.; MEDEIROS, GIRODANI P.; MORAES, PEDRO H. F.; FERNANDES, BRUNO DE A.; ALVES, AYLTON J.; CALIXTO, WESLEY P.;

FURRIEL, GEOVANNE P., Simulation and analysis of an isolated full-bridge DC/DC boost converter operating with a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm. Transactions on Environment and Electrical Engineering, v. 2, p. 45, 2017.

PAIVA, J. R. B.; GOMES, V. M.; RODRIGUES, B. A.; SILVA, L. F. A.; ANICETO, B. C. M.; FURRIEL, G. P.; CALIXTO, W. P., Metric for Calculation of System Complexity based on its Connections. Transactions on Environment and Electrical Engineering, v. 2, p. 67, 2016.

Patentes:

- BR 10 2019 004280 0 A2 - Equipamento e processo de aplicação de produtos fitossanitários com exposição total da folha ao jato aplicador.
- BR 10 2019 004274 5 A2 - Técnica de derriça seletiva de grãos/frutos utilizando vibração/movimentação induzida sem contato com a planta.
- BR 10 2019 007908 8 A2 - Sistema interpretador de movimentos corporais

Artigo em congresso:

MATIAS, CALEBE A.; FURRIEL, GEOVANNE P.; SANTOS, LICINIO M.; CALIXTO, WESLEY P.; BARBOSA, JOSE LUIZ F.; DE OLIVEIRA, SERGIO B.; ALVES, AYLTON J., Optimized Solar Simulator Structure for Uniform Irradiance Distribution. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. EEEIC / ICPS Europe, 2018.

BOTELHO, JEREMIAS L.; OLIVEIRA, JOSEPH R.; REIS, MARCIO R. C.; SILVA, FELIPPE S.; DO COUTO, LUIZ A.; ARAUJO, WANDERSON R. H.; CALIXTO, WESLEY P.; MAGALHAES, ALANA S.; FURRIEL, GEOVANNE P., Parametric regression methodology and optimized control for DC motor. International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE, 2017.

DIAS, RAFAEL N. H. M.; GANZAROLI, CLEBER A.; DE CARVALHO, DOUGLAS F.; FURRIEL, GEOVANNE P.; COUTO, LUIZ A.; CALIXTO, WESLEY P., Comparative study between optimized controllers fuzzy X MPC. International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE, 2017.

MAGALHAES, ALANA S.; BULHOES, JUNIO S.; FURRIEL, GEOVANNE P.; REIS, MARCIO R. C.; ALVES, AYLTON J.; SILVA, ALAN H. F.; CALIXTO, WESLEY P., Parametric regression in synchronous and induction generators. International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE, 2017.

ARAUJO, VANESSA K. A.; DE ALMEIDA, SUZEL; DE OLIVEIRA, SERGIO B.; CALIXTO, WESLEY P.; FURRIEL, GEOVANNE P.; BARBOSA, DANNS P., Anaerobic digestion using residue of soybean processing: Biogas production and it is potential to generate energy. International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE, 2017.

SILVA, BRUNNA C. R.; FURRIEL, GEOVANNE P.; CALIXTO, WESLEY P.; BULHOES, JUNIO S., Methodology and comparison of devices for recognition of sign language characters. International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE, 2017.

FURRIEL, GEOVANNE P.; MATIAS, CALEBE A.; CALIXTO, WESLEY P.; OLIVEIRA, SERGIO B.; DA SILVA, JOSE G.; NARCISO, MARCELO G., Acoustics Applied in Precision Agriculture. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

DE MELO, GILBERTO; OLIVEIRA, SANDERSON M.; FERREIRA, CINTIA C.; VASCONCELOS FILHO, ENIO P. ; CALIXTO, WESLEY P.; FURRIEL, GEOVANNE P., Evaluation techniques of machine learning in task of reprovation prediction of technical high school students. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

MAGALHAES, ALANA S.; BULHOES, JUNIO S.; MATIAS, CALEBE A.; SILVA, ALAN H. F.; FURRIEL, GEOVANNE P.; REIS, MARCIO R. C.; WAINER, GABRIEL A.; GOMES, VIVIANE M.; CALIXTO, WESLEY P.; ALVES, AYLTON J., Sensitivity analysis of the synchronous generation repowering system in parallel withinduction generator. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

SILVA, BRUNNA; CALIXTO, WESLEY; FURRIEL, GEOVANNE, Devices analysis and artificial neural network parameters for sign language recognition. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

REZENDE, KAREN K. M.; RODRIGUES, LUANN ; CAMPOS, PEDRO H. M.; CALIXTO, WESLEY P.; FURRIEL, GEOVANNE P., Technique development to improve electrical grounding systems performance. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

LINO, ATTYLA F. S.; SILVA, BRUNNA C. R.; ROCHA, DANILO P. C.; FURRIEL, GEOVANNE P.; CALIXTO, WESLEY P., Performance of haar and LBP features in cascade classifiers to whiteflies detection and counting. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

BULHOES, JUNIO S.; ASSIS, ALFREDO O.; MARTINS, CRISTIANE L.; FURRIEL, GEOVANNE P.; SILVA, BRUNNA C. R.; RODRIGUES, LUANN; REIS, MARCIO R. C.; CALHEIROS, DEBORA F.; OLIVEIRA, MARCIA D.; CALIXTO, WESLEY P., Gap filling in time series: A new methodology applying spectral analysis and system identification. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

BARBOSA, JOSE LUIZ F.; FURRIEL, GEOVANNE P.; CALIXTO, WESLEY P., Improved optimization methodology for high power LED matrix luminaire. CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON, 2017.

GOMES, V. M.; PAIVA, J. R. B.; FURRIEL, G. P.; ANICETO, B. C. M.; SILVA, L. F. A.; CALIXTO, W. P., Complexity Metric Applied to the Discrete Events Systems. International Conference on Nonlinear Science and Complexity, São José Dos Campos, INPE, 2016.

FURRIEL, GEOVANNE P.; ALVES, AYLTON J.; SILVA, BRUNNA C. R.; MATIAS, CALEBE A.; SILVA, UYARA; CALIXTO, WESLEY P.; Methodology for validating measurement systems of soil compaction. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC, Florence, 2016.

ALVES, AYLTON J.; FURRIEL, GEOVANNE P.; CALIXTO, WESLEY P.; GODOI, FABIANA; SILVA, JOSE R. S.; PROFETA, FRANCISCO A.; DOMINGOS, JOSE L., Geoelectrical method to obtain 3D maps for distribution of fertilizer in the soil. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC, Florence, 2016.

SILVA, UYARA F.; MANOEL, I. Q.; SILVA, ALAN H. F.; CALIXTO, WESLEY P.; LEMOS, SANTIAGO; FURRIEL, GEOVANNE P., Conformal mapping applied to the estimate of Surge and Swab geopressures. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC, Florence, 2016.

DE OLIVEIRA, SERGIO B.; ALVES, AYLTON J.; CALIXTO, WESLEY P.; FURRIEL, GEOVANNE P.; GODOI, FABIANA; SILVA, JOSE R. S.; PROFETA, FRANCISCO A., Geoelectrical prospection to obtain distribution maps of fertilizer in the soil. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC, Florence, 2016.

FURRIEL, GEOVANNE P. ; ALVES, AYLTON J.; GODOI, FABIANA; SILVA, JOSE R. S.; PROFETA, FRANCISCO A.; DOMINGUES, ELDER G.; CALIXTO, WESLEY P., Methodology to correlate fertilizer and electrical resistance of soil. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC, Florence, 2016.

7.2 Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros relacionados são:

- Análise do consumo energético em relação a capacidade de colheita;
- Validação do equipamento no campo para avaliar a derriça em condições reais;
- Teste de direcionamento de produtos fitossanitários em espécies diferentes de plantas;
- Testes do dispositivo desenvolvido com outros grãos para avaliar a viabilidade de derriça;
- Otimização do formato do dispositivo para redução de peso e aumentar a portabilidade do equipamento;
- Proposta de utilização em conjunto com a colhedeira tradicional, separando inicialmente os grãos de maior qualidade;

APÊNDICE A

Códigos Fonte

Abaixo está descrito os códigos fontes utilizados no dispositivo. Os códigos são desenvolvidos para o software Octave.

A.1 Cálculo da impedância e geração do gráfico

Codigo Fonte A.1 - Gráfico de impedância

```
x=csvread('impval.csv');
r= input(" Entre com o valor exato do resistor utilizado: ");

imp=[];
% Frequencia = x(:,1)
% Tensao resistor  = x(:,2)
% Tensao falante  = x(:,3)

for i=1:length(x)
imp(i,1)=x(i,1);
imp(i,2)= (x(i,3)*r)/x(i,2);
endfor
%

hf = figure ();
semilogx(imp(:,1),imp(:,2));
xlabel ("Frequencia Hz");
ylabel ("Impedancia");
grid on

print(hf,"Impedancia.pdf", "-dpdflatexstandalone")
system ("pdflatex Impedancia");
open Impedancia.pdf
```

A.2 Parâmetros de Thiele-Small

Codigo Fonte A.2 - Parâmetros de Thiele-Small

```
## Medicao e calculo dos parametros de Thiele-Small
## Geracao do grafico da impedancia
% Re  Resistencia Eletrica da bobina de voz
% Fs  Frequencia de ressonancia de espaco livre. 1m de raio livre
% Qes Qualidade eletrica
% Qms Qualidade mecanica
% Qts Qualidade total
% Vas Volume de ar deslocadado

## Pacote de audio necessario
% verificar pacote
## Equipamento Utilizado
% Amplificador 5W
% Placa de audio
% Aquisicao de tensao e corrente
% Resistor 10 Ohm 5W
clc

Re = input("Entre com a resistencia medida nos terminais do
    transdutor eletroacustico: ");
Rs = input("Entre com a resistencia medida no resistor de
    referencia: ");

disp ("Verifique se a conexao do circuito esta correta.\n");
Vs = input("Ajuste o volume ate obter 1 V na saida do amplificador
    .\n Digite o valor exato obtido:");

disp ("Ajuste a frequencia ate que o tensao no resistor tenha o
    valor minimo.\n");
printf("Grafico de impedancia do transdutor eletroacustico.")
Imp=(Vt/Vm)Rs;

Vm=input("Indique a tensao em Volts medida no resistor para Fs. ");
Is=input("Indique a corrente em amperes fornecida pelo amplificador
    : ");
Im=Vm/Rs;

disp ("Corrente do transdutor eletroacustico Im:"), disp (Im);
Fs = input("Indique a frequencia de ressonancia em Hz: ");
Fl = input("Indique a frequencia Fl, abaixo de Fs em que a tensao
    Vm se repete, em Hz: ");
```

```
Fh = input("Indique a frequencia Fh, acima de Fs em que a tensao Vm
    se repete em Hz: ");

Ge=Fs/sqrt(Fl*Fh);
disp ("Grau de eficiencia da medicao: "), disp(Ge);

Rm=(Vs-Vm)/Im;
disp ("Impedancia de ressonancia Rm: "), disp(Rm);

Ro=Is/Im;
disp ("Valor de referencia de corrente: "), disp(Ro);

Ir=sqrt(Im*Is);
disp ("Reducao de 6dB em corrente: "), disp(Ir);

Vr=Ir*Rs;
disp("Reducao de 6dB em tensao: "), disp(Vr);

Qms = Fs * sqrt(Ro / (Fh - Fl));
disp("Qualidade mecanica Qms: "), disp(Qms);

Qes = (Qms/(Ro - 1)) * (Re / (Rs + Re));
disp("Qualidade eletrica Qes: "), disp(Qes);

Qts = Qms * Qes / (Qms + Qes);
disp ("Qualidade total do transdutor"), disp(Qts);

printf("Parametros para o circuito equivalente do transdutor
   eletroacustico:\n")
Rp=Rm-Re;
disp("Resistencia em paralelo: "), disp(Rp);

Le=(Rp/Qms)/(2*pi*Fs)*1000
disp("Indutor, em mH: "), disp(Le);
```

A.3 Distâncias do pico

Codigo Fonte A.3 - Distâncias do pico.

```
%% Teste para verificacao de somatorio de onda
%  Obtencao do pico a partir da distancia entre as caixas.
% c velocidade do som no ar
% f frequencia desejada
% l comprimento de onda

clear all
close all
clc
a=0;
Fs = 20000;
intvl = 1/Fs;

disp ("Digite 1 para pico na distancia especificada ou")
a = input("2 para distancia do pico dada a frequencia ");

if (a==1)
  c = input("Velocidade do som: ");
  x = input ("Entre com a distancia do pico em metros: ");
  z = input ("Entre com a distancia total a ser analisada em metros
      : ");
  q = input ("Quantidade de frequencias desejadas: ");
  secs = 4*z/c;
  tim = intvl : intvl : secs;
  a = 0:q;
  amp=1;
  f0 = c/(4*x);
  b(1) = f0/4;
  disp ("Frequencia base: "), disp (b(1));
  d(1) = sin(secs*2*pi*(b(1)))*amp;
  plot(tim,d(1))
  hold on

  for i=1:q
    b(i+1)=c/(x*16/(5+((4*i)-4)));
    printf ("Frequencia %d ", (i));
    disp (b(i+1))
    d(1) = sin(secs*2*pi*(b(1)))*amp;
    plot(tim,d(1+i)* amp);
  endfor

elseif (a==2)
```

```
42    f = input("Entre com a frequencia a ser utilizada: ");
43    q = input("Quantidade de picos desejados: ");
44    c = input("Velocidade do som: ");
45
46    for i=1:q
47      x(i)=(i*c/f)/4;
48    endfor
49    printf ("Para frequencia de: %d ", (f));
50    disp ("Os picos estao em: ");
51    x
52  else
53    disp ("Escolha entre os valores disponiveis!")
54  endif
```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIAN, P.; FRIDLEY, R. et al. Mechanical fruit tree shaking: Effect of frequency and stroke on fruit removal and power requirements analyzed in study of reciprocating type shaker. **California Agriculture**, University of California, Agriculture and Natural Resources, v. 12, n. 10, p. 3–15, 1958. 28, 33

AHMAD, J.; MUHAMMAD, K.; AHMAD, I.; AHMAD, W.; SMITH, M. L.; SMITH, L. N.; JAIN, D. K.; WANG, H.; MEHMOOD, I. Visual features based boosted classification of weeds for real-time selective herbicide sprayer systems. **Computers in Industry**, Elsevier, v. 98, p. 23–33, 2018. 51

AHONEN, J. Equalization of the closed box. 2003. 70, 105

_____. Electroacoustic modelling of the subwoofer enclosures. **Linear Team technical paper**, 2007. 70

ALONÇO, P. do A.; ALONÇO, A. dos S.; MOREIRA, A. R.; CARPES, D. P.; PIRES, A. de L. Distribuição longitudinal de sementes de soja com diferentes tratamentos fitossanitários e densidades de semeadura. **Revista Engenharia na Agricultura**, Revista Engenharia na Agricultura, v. 26, n. 1, p. 58–67, 2018. 49

ALVES, E.; COSTA, J.; SANTOS, J. Procedimentos de colheita do café. **Embrapa Rondônia-Capítulo em livro científico (ALICE)**, In: MARCOLAN, AL; ESPINDULA, MC (Ed.). Café na Amazônia. Brasília, DF, 2015. 52

AOSONG ELECTRONICS CO. **Temperature and humidity module - AM2302 Product Manual**. [S.l.], 2015. 95

BAC, C. W.; HENTEN, E. J. van; HEMMING, J.; EDAN, Y. Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. **Journal of Field Robotics**, Wiley Online Library, v. 31, n. 6, p. 888–911, 2014. 53

BACH, A. M.; BONVIN, G. C. **Construção e estudo de uma caixa acústica bookshelf**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. 70

BALAFOUTIS, A. T.; BECK, B.; FOUNTAS, S.; TSIROPOULOS, Z.; VANGEYTE, J.; WAL, T. van der; SOTO-EMBODAS, I.; GÓMEZ-BARBERO, M.; PEDERSEN, S. M. Smart farming technologies–description, taxonomy and

economic impact. In: **Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives**. [S.l.]: Springer, 2017. 46, 48

BALSARI, P.; MARUCCO, P.; TAMAGNONE, M. A test bench for the classification of boom sprayers according to drift risk. **Crop protection**, Elsevier, v. 26, n. 10, p. 1482–1489, 2007. 105

BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. d. Operational performance of portable mechanical coffee harvesters in different conditions of coffee planting. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 9, n. 1, p. 129–132, 2005. 52

BARKER, G.; GOUCHER, C. A world with agriculture: Introduction. In: BARKER, G.; GOUCHER, C. (Ed.). **THE CAMBRIDGE WORLD HISTORY: A World with Agriculture**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015. 45

BARRETT, E. C. **Introduction to environmental remote sensing**. [S.l.]: Routledge, 2013. 48

BEHRINGER. **XENYX X1204USB - User Manual**. [S.l.], 1 2021. V1.0. 95

BERANEK, L. L.; MELLOW, T. J. **Acoustics: sound fields and transducers**. [S.l.]: Academic Press, 2012. 27, 35, 36, 38, 39, 40, 61, 67, 68

BERLAGE, A.; WILLMORTH, F. Fruit removal potential of high frequency vibrations. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 17, n. 2, p. 233–0234, 1974. 30

BERTI, A.; BRAVIN, F.; ZANIN, G. Application of decision-support software for postemergence weed control. **Weed Science**, Cambridge University Press, v. 51, n. 4, p. 618–627, 2003. 51

BEZZOLA, A.; DEVANTIER, A.; MCMULLIN, E. Loudspeaker port design for optimal performance and listening experience. In: AUDIO ENGINEERING SOCIETY. **Audio Engineering Society Convention 147**. [S.l.], 2019. 70, 105

BLACKMORE, S. et al. New concepts in agricultural automation. In: **HGCA conference**. [S.l.: s.n.], 2009. 47

BLAKE, R. E. Basic vibration theory. In: PIERSOL, A. G.; PAEZ, T. L. (Ed.). **Harris' shock and vibration handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2009. 42

BLASCO, J.; ALEIXOS, N.; ROGER, J.; RABATEL, G.; MOLTO, E. Automation and emerging technologies: Robotic weed control using machine vision. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 83, n. 2, p. 149–157, 2002. 51

BONADIO, J. A. B.; NETO, R. A.; COSTA, N. V. da; RAMELLA, J. R. P. Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas: inovações. **CIÊNCIAS AGRÁRIAS**, p. 207, 2015. 50

BOSCH SENSORTEC GMBH. **BMP280 - Digital Pressure Sensor**. [S.l.], 10 2021. 1.26. 95

BRASIL, M. d. A. P. e. A. Portaria nº 852 - art. 1º criar a comissão brasileira de agricultura de precisão. **CBAP. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 21 set. 2012. Seção 1, n. 184**, 2012. 46

BREWER, H. Theoretical foundations for an engineering measurement of ease of detachment of individual fruits from a tree at harvest time. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Elsevier, v. 10, n. 3, p. 235–240, 1965. 29, 33

BUCKINGHAM, E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. **Physical review**, APS, v. 4, n. 4, p. 345, 1914. 59

CAMPANHOLA, C.; BETTIOL, W. Panorama sobre o uso de agrotóxicos no brasil. **Embrapa Meio Ambiente-Capítulo em livro científico (ALICE)**, In: CAMPANHOLA, C.; BETTIOL, W.(Ed.). Metodos alternativos de controle, 2003. 50, 105

CASABURO, A.; PETRONE, G.; FRANCO, F.; ROSA, S. D. A review of similitude methods for structural engineering. **Applied Mechanics Reviews**, American Society of Mechanical Engineers, v. 71, n. 3, p. 030802, 2019. 58

CHAIM, A. **Manual de tecnologia de aplicação de agrotóxicos**. [S.l.]: Embrapa Informação Tecnológica; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 50

CHALFANT, R. Corn sheller. US Patent, n. 4979, 1847. 28

CHECHETTO, R. G.; MOTA, A. A. B.; ANTUNIASSI, U. R.; CARVALHO, F. K.; VILELA, C. M.; ARRUDA, A. C. et al. Caracterização da taxa de aplicação e pontas de pulverização utilizadas no estado de mato grosso. **Magistra**, v. 26, n. 1, p. 89–97, 2017. 51

CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. [S.l.]: CRC press, 2016. 41

CHURCHILL, A. Improvement in the mode of harvesting grain. US Patent, n. 2007, 1841. 27

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. [S.l.]: Autores, 2007. 57, 58

CLARK, H. L.; WALTER, M. **Fruit ripeness tester**. [S.l.]: Google Patents, mar. 24 1942. US Patent 2,277,037. 28

COELHO, A. L. d. F.; SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M. d.; PINTO, F. d. A. d. C. Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. Editora UFLA, 2016. 32

COOKE, J.; RAND, R. Vibratory fruit harvesting: a linear theory of fruit-stem dynamics. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Elsevier, v. 14, n. 3, p. 195–209, 1969. 29

CORREIA, P. F. da C.; REIS, J. G. M. dos; TOLOI, R. C.; ARAÚJO, F. A. de; BONILLA, S. H.; SOUZA, J. S. de; FORMIGONI, A.; SOUZA, A. E. de. Economic and environmental perfomance in coffee supply chains: A brazilian case study. In: SPRINGER. **IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems**. [S.l.], 2020. p. 631–639. 32

COUTINHO, C. J. P. **Structural Reduced Scale Models Based on Similitude Theory**. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto (Portugal), 2017. 58

COUTINHO, C. P.; BAPTISTA, A. J.; RODRIGES, J. D. Modular approach to structural similitude. **International Journal of Mechanical Sciences**, Elsevier, v. 135, p. 294–312, 2018. 58, 59

COUTINHO, C. P.; BAPTISTA, A. J.; RODRIGUES, J. D. Reduced scale models based on similitude theory: a review up to 2015. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 119, p. 81–94, 2016. 60

CREMER, L.; HECKL, M. **Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. 70

DESMET, W.; PLUYMERS, B.; SAS, P. Vibro-acoustic analysis procedures for the evaluation of the sound insulation characteristics of agricultural machinery cabins. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier, v. 266, n. 3, p. 407–441, 2003. 33

DIODES INCORPORATED. **PAM8403 Filterless 3W Clas-D Stereo Audio Amplifier**. [S.l.], 11 2012. Rev. 1-4. 95

DUAN, J.-l.; LU, H.-z.; WANG, W.-z.; WANG, L.; ZHAO, L. Present situation and development of the fruit harvesting machinery [j]. **Guangdong Agricultural Sciences**, v. 16, p. 060, 2012. 52

DUCKETT, T.; PEARSON, S.; BLACKMORE, S.; GRIEVE, B. Agricultural robotics: the future of robotic agriculture. **arXiv preprint arXiv:1806.06762**, 2018. 47, 48, 53

DUNN, F.; HARTMANN, W.; CAMPBELL, D.; FLETCHER, N. H. **Springer handbook of acoustics**. [S.l.]: Springer, 2015. 27, 35, 36, 37, 66, 70

EVEREST, F. A. **Master handbook of acoustics**. [S.l.]: ASA, 2001. 35, 38

FAGNANT, D. J.; KOCKELMAN, K. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier, v. 77, p. 167–181, 2015. 48

FAHY, F. Some applications of the reciprocity principle in experimental vibroacoustics. **Acoustical Physics**, Springer, v. 49, n. 2, p. 217–229, 2003. 44

FAHY, F. J.; GARDONIO, P. **Sound and structural vibration: radiation, transmission and response**. [S.l.]: Elsevier, 2007. 43, 70

FERNANDEZ-JARAMILLO, A. A.; DUARTE-GALVAN, C.; GARCIA-MIER, L.; JIMENEZ-GARCIA, S. N.; CONTRERAS-MEDINA, L. M. Effects of acoustic waves on plants: an agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective. **Scientia Horticulturae**, Elsevier, v. 235, p. 340–348, 2018. 33

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 478, n. 7369, p. 337, 2011. 46

FONSECA, N. **Introdução à engenharia de som**. [S.l.: s.n.], 2007. 35, 36, 39, 63, 67

FOUNTAS, S.; SORENSEN, C. G.; TSIROPOULOS, Z.; CAVALARIS, C.; LIAKOS, V.; GEMTOS, T. Farm machinery management information system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 110, p. 131–138, 2015. 47

FURLANETTI, A.; MATUO, T.; BARBOSA, J. Uniformidade de deposição da calda de pulverização de herbicidas em barra lateral protegida com diferentes combinações de pontas de pulverização. **Planta Daninha**, SciELO Brasil, v. 19, p. 445–455, 2001. 49

GORDON, A. G. The use of ultrasound in agriculture. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 1, n. 2, p. 70–77, 1963. 54

GOUSSOUS, S.; SAMARAH, N.; ALQUDAH, A.; OTHMAN, M. Enhancing seed germination of four crop species using an ultrasonic technique. **Experimental Agriculture**, Cambridge University Press, v. 46, n. 2, p. 231–242, 2010. 54

GRIFFIN, T. W.; MILLER, N. J.; BERGTOLD, J.; SHANOYAN, A.; SHARDA, A.; CIAMPITTI, I. A. Farm's sequence of adoption of information-intensive precision agricultural technology. **Applied engineering in agriculture**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 33, n. 4, p. 521, 2017. 48

GRIMES, W. C. Machine for separating garlic from wheat. US Patent, n. 1763, 1840. 27

GROUND ZERO. **GZIW 12 SPL**. [S.l.], 2017. Rev. 0. 95

GROUND ZERO MOBILE ENTERTAINMENT. **Ground Zero Plutonium GZPA 1.6K-HC Owner's Manual**. [S.l.], 2015. 95

GUEDES, D. M. Efeito da utilização de frequências de vibração na faixa de 35 a 55 hz sobre a eficiência de derriça do café. 2011. 31, 33, 53

GULYAS, K.; PINTE, G.; AUGUSZTINOVICZ, F.; DESMET, W.; SAS, P. Active noise control in agricultural machines. In: **Proceedings of International Conference of Noise and Vibration Engineering (ISMA)**. [S.l.: s.n.], v. 1, p. 11–22, 2002. 54

HARLAN, J. R. Agricultural origins: centers and noncenters. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 174, n. 4008, p. 468–474, 1971. 45

HARMAN INTERNATIONAL INDUSTRIES, INC. **Grand Touring Series - GTO1514D**. [S.l.], 2012. 95

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. Introduction to the handbook. In: PIERSOL, A. G.; PAEZ, T. L. (Ed.). **Harris' shock and vibration handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2009. 42

HILL, G. **Loudspeaker Modelling and Design: A Practical Introduction**. [S.l.]: Routledge, 2018. 70

HU, X.; CUI, X.; ZHANG, Q.; WANG, G.; LI, G. The stable node-based smoothed finite element method for analyzing acoustic radiation problems. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, Elsevier, v. 80, p. 142–151, 2017. 70

IBARRA, D.; LEDESMA, R.; LOPEZ, E. Design and construction of an omnidirectional sound source with inverse filtering approach for optimization. **HardwareX**, Elsevier, v. 4, p. e00033, 2018. 70

IEC, I. **60268-5: 2007 Sound system equipment-part 5: Loudspeakers**. [S.l.]: Sl]: IEC, 2007. 63, 76

INVENSENSE INC. **MPU-9250 Product Specification**. [S.l.], 06 2016. Rev. 1.1. 95

JAKKU, E.; THORBURN, P. A conceptual framework for guiding the participatory development of agricultural decision support systems. **Agricultural systems**, Elsevier, v. 103, n. 9, p. 675–682, 2010. 49

JØRGENSEN, L. N.; NOE, E.; LANGVAD, A.-M.; JENSEN, J.; ØRUM, J. E.; RYDAHL, P. Decision support systems: barriers and farmers need for support. **EPPO bulletin**, Wiley Online Library, v. 37, n. 2, p. 374–377, 2007. 51, 105

JÚNIOR, L. d. G. F.; SILVA, F. M. da; FERREIRA, D. D.; SOUZA, C. E. P. de; PINTO, A. W. M.; BORGES, F. E. de M. Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 173, p. 105415, 2020. 104

JUTRAS, P.; COPPOCK, G.; PATTERSON, J. Harvesting citrus fruit with an oscillating air blast. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 6, n. 2, p. 192–194, 1963. 28

KARJALAINEN, M.; IKONEN, V.; ANTSALO, P.; MAIJALA, P.; SAVIOJA, L.; SUUTALA, A.; POHJOLAINEN, S. Comparison of numerical simulation models and measured low-frequency behavior of loudspeaker enclosures. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 49, n. 12, p. 1148–1166, 2001. 70, 105

KAZAMA, E. H.; SILVA, R. P. da; TAVARES, T. d. O.; CORREA, L. N.; ESTEVAM, F. N. de L.; NICOLAU, F. E. d. A.; JÚNIOR, W. M. Methodology for selective coffee harvesting in management zones of yield and maturation. **Precision Agriculture**, Springer, v. 22, n. 3, p. 711–733, 2021. 104

KIM, Y.-H. **Sound propagation: an impedance based approach**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. 35, 36

KIMMEL, E.; PELEG, K.; HINGA, S. Vibration modes of spheroidal fruits. **Journal of agricultural engineering research**, Elsevier, v. 52, p. 201–213, 1992. 30

KLEINER, M. **Electroacoustics**. [S.l.]: CRC Press, 2013. 39, 67, 68, 70

KRUEGER, N. A.; BERN, C. J.; MISRA, M. K.; ADAM, K. Gravity table sorting of commodity corn. **Applied engineering in agriculture**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 23, n. 3, p. 319–325, 2007. 54

KUTTRUFF, H. **Acoustics: an introduction**. [S.l.]: CRC Press, 2006. 39

LANGHAAR, H. L. **Dimensional analysis and theory of models**. [S.l.: s.n.], 1951. 59

LIMA, A. A. dos R.; OLIVEIRA, J. C. D.; ALMEIDA, L. G. F. de; RAMOS, L. X.; TEDARDI, V. M. Pulverização com redução de vazão e utilizaçao de adjuvante com arbus 2000 na cultura do cafeeiro. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2019. 49

LOMBARDO, S.; SARRI, D.; CORVO, L.; VIERI, M. Approaching to the fourth agricultural revolution: Analysis of needs for the profitable introduction of smart farming in rural areas. In: **CEUR Workshop Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2017. 46

LUCK, J.; PITLA, S.; SHEARER, S.; MUELLER, T.; DILLON, C.; FULTON, J.; HIGGINS, S. Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 70, n. 1, p. 19–26, 2010. 51

MACCAGNAN, D. H.; MARTINELLI, N. M.; MATUO, T. K.; MATUO, T. Cigarras do café: Biologia, ecologia e manejo. 2008. 32

MAEKAWA, Z.; LORD, P. **Environmental and architectural acoustics**. [S.l.]: CRC Press, 1993. 70

MANKIN, R. W. et al. Applications of acoustics in insect pest management. **CAB Reviews**, CABI, v. 7, n. 001, p. 1–7, 2012. 33, 54

MANTOVANI, E. C. et al. Agricultura de precisão e sua organização no brasil. **Agricultura de precisão. Viçosa: UFV**, p. 77–92, 2000. 47

MATEEV, L.; KOSTADINOV, G. Probabilistic model of fruit removal during vibratory morello harvesting. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 87, n. 4, p. 425–435, 2004. 31

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **A history of world agriculture: from the neolithic age to the current crisis**. [S.l.]: Routledge, 2007. 45

MELLO, B. d. Modelagem e simulação de sistemas. **Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Santo Ângelo**, 2007. 57

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão, parte i: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, v. 17, n. 2, p. 97–107, 1997. 46

MZUKU, M.; KHOSLA, R.; REICH, R.; INMAN, D.; SMITH, F.; MACDONALD, L. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. **Soil Science Society of America Journal**, Soil Science Society, v. 69, n. 5, p. 1572–1579, 2005. 49

NARENDRA, V.; HAREESHA, K. Quality inspection and grading of agricultural and food products by computer vision-a review. **International Journal of Computer Applications**, Foundation of Computer Science, USA, v. 2, n. 1, p. 43–65, 2010. 53

NATIONS, U. **International Trade Statistics Yearbook 2017 Edition**. [S.l.]: UNITED NATIONS PUBLICATION, 2018. 32

NORRIS, C. Mechanisation of the harvesting of coffee. **Coffee Futures. Chinchiná, CABI-FEDERACAFE-USDA-ICO**, p. 44–55, 2001. 53, 54, 104

OCHOA, G.; HARVEY, I.; BUXTON, H. On recombination and optimal mutation rates. In: MORGAN KAUFMANN PUBLISHERS INC. **Proceedings of the 1st**

Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation-Volume 1. [S.l.], 1999. 57

PARCHOMCHUK, P. Vibratory fruit harvesting: An experimental investigation of an apple fruit-stem response to forced oscillations. Cornell University, 1971. 29

PARCHOMCHUK, P.; COOKE, J. R. Vibratory harvesting: an experimental analysis of fruit-stem dynamics. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 15, n. 4, p. 598–0603, 1972. 29

PATRIC, C. E. Improvement in seeding machines. US Patent, n. 159.210, 1875. 28

PEDERSEN, S. M.; FOUNTAS, S.; BLACKMORE, B.; GYLLING, M.; PEDERSEN, J. L. Adoption and perspectives of precision farming in denmark. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science**, Taylor & Francis, v. 54, n. 1, p. 2–8, 2004. 51

PEDERSEN, S. M.; LIND, K. Precision agriculture–from mapping to site-specific application. In: **Precision agriculture: Technology and economic perspectives**. [S.l.]: Springer, 2017. 46, 49, 52

PEYRE, P.; CHAIEB, I.; BRAHAM, C. Fem calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels. **Modelling and simulation in materials science and engineering**, IOP Publishing, v. 15, n. 3, p. 205, 2007. 70

PIERSOL, A. G.; HARRIS, C. M. **Harri's Shock and Vibration Handbook Fifth Edition**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2017. 27

QUEIROZ, D.; SANTOS, F.; PINTO, F. Analysis oh coffee harvesting process by vibration. **ASAE Annu. Meet**, v. 7, p. 41–46, 2007. 31, 53, 104

RAND, R.; COOKE, J. Vibratory fruit harvesting: a non-linear theory of fruit-stem dynamics. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Elsevier, v. 15, n. 4, p. 347–363, 1970. 29

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi 3 Model B+**. [S.l.], 03 2018. 95

RECHTIN, E.; MAIER, M. W. **The art of systems architecting**. [S.l.]: CRC Press, 2010. 57

REYNOLDS, D. D. **Engineering principles of acoustics: noise and vibration control**. [S.l.]: Allyn & Bacon, 1981. 36, 41, 43

ROMÁN, R. A. A.; CORTEZ, J. W.; FERREIRA, M. D. C.; OLIVEIRA, J. R. G. di. Cobertura da cultura da soja pela calda fungicida em função de pontas de pulverização e volumes de aplicação. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 3, p. 223–232, 2009. 50, 105

ROSA, S. D.; FRANCO, F.; LI, X.; POLITO, T. A similitude for structural acoustic enclosures. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Elsevier, v. 30, p. 330–342, 2012. 60

SAHU, K. C.; TUHKURI, J.; REDDY, J. Active attenuation of sound transmission through a soft-core sandwich panel into an acoustic enclosure using volume velocity cancellation. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 229, n. 17, p. 3096–3112, 2015. 70, 105

SALTER, R. M. Technical progress in agriculture. **Journal of Farm Economics**, JSTOR, v. 32, n. 3, p. 478–485, 1950. 28

SAMA, M. P.; EVANS, J. T.; TURNER, A. P.; DASIKA, S. S. Applied estimation of volumetric flow rate from a single sprayer nozzle series using water-sensitive spray cards. **Transactions of the ASABE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 59, n. 3, p. 861–869, 2016. 51

SASAKI, R. S.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; MONTEIRO, P. M. d. B.; RODRIGUES, D. E. Deposição e uniformidade de distribuição da calda de aplicação em plantas de café utilizando a pulverização eletrostática. Universidade Federal de Santa Maria, 2013. 51, 105

SHAW, R. P.; BUGL, P. Transmission of plane waves through layered linear viscoelastic media. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 46, n. 3B, p. 649–654, 1969. 36

SHIRATSUCHI, L. S. Mapeamento da variabilidade espacial de plantas daninhas com a utilização de ferramentas da agricultura de precisão. **Embrapa Cerrados-Tese/dissertação (ALICE)**, 2001., 2001. 47

SHIVA, V. **The violence of the green revolution: Third world agriculture, ecology, and politics**. [S.l.]: University Press of Kentucky, 2016. 46

SHURE. **Shure S58 User Guide**. [S.l.], 2006. Rev. 3. 95

SILVA, F. C. d.; SILVA, F. M. d.; ALVES, M. d. C.; FERRAZ, G. A.; SALES, R. S. et al. Efficiency of coffee mechanical and selective harvesting in different vibration during harvest time. Editora UFLA, 2015. 104

SILVA, F. C. da; SILVA, F. M. da; ALVES, M. de C.; BARROS, M. M. de; SALES, R. de S. Behavior of the coffee fruit detachment force throughout the harvest period. **Ciência e Agrotecnologia**, Directory of Open Access Journals, v. 34, n. 2, p. 468–474, 2010. 31

SILVA, F. M. d.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, R. J.; FIGUEIREDO, C. A. P. d.; SILVA, F. C. Desempenho operacional e econômico da derriça do café com uso da derriçadora lateral. Editora UFLA, 2006. 54

SILVA, F. M. d.; SALVADOR, N.; PÁDUA, T. d. S. Café: mecanização da colheita. 2002. 54, 104

SMALL, R. H. Efficiency of direct-radiator loudspeaker systems. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 19, n. 10, p. 862–863, 1971. 63

_____. Closed-box loudspeaker systems-part 1: Analysis. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 20, n. 10, p. 798–808, 1972. 63

_____. Vented-box loudspeaker systems-part 2: large-signal analysis. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 21, n. 6, p. 438–444, 1973. 63

SMITH, E.; RAMSAY, A. Forces during fruit removal by a mechanical raspberry harvester. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 21–32, 1983. 30, 33

SOGAARD, H.; LUND, I. Investigation of the accuracy of a machine vision based robotic micro-spray system. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 613–620, 2005. 51

SØNDERSKOV, M.; FRITZSCHE, R.; MOL, F. de; GEROWITT, B.; GOLTERMANN, S.; KIERZEK, R.; KRAWCZYK, R.; BØJER, O. M.; RYDAHL, P. Dssherbicide: Weed control in winter wheat with a decision support system in three south baltic regions–field experimental results. **Crop Protection**, Elsevier, v. 76, p. 15–23, 2015. 51

SØRENSEN, C.; FOUNTAS, S.; NASH, E.; PESONEN, L.; BOCHTIS, D.; PEDERSEN, S. M.; BASSO, B.; BLACKMORE, S. Conceptual model of a future farm management information system. **Computers and electronics in agriculture**, Elsevier, v. 72, n. 1, p. 37–47, 2010. 49

SOUNDIGITAL AMPLIFIERS. **Instruction Manual SD1000.1D**. [S.l.], 2015. 95

SOUZA, A. de; LOURENZANI, W. L.; QUEIROZ, T. R. Análise da evolução da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. 2010. 49

SZŰCS, E. **Similitude and modelling**. [S.l.]: Elsevier Science Ltd, 1980. 58, 59

TANIWAKI, M.; SAKURAI, N. Evaluation of the internal quality of agricultural products using acoustic vibration techniques. **Journal of the Japanese Society for Horticultural Science**, THE JAPANESE SOCIETY FOR HORTICULTURAL SCIENCE, v. 79, n. 2, p. 113–128, 2010. 50

TASCÓN, C. E. O. Cosecha del café con vibradores portátiles del tallo. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 58, n. 1, p. 2697–2708, 2005. 54

TEMPLETON, D.; SAUNDERS, D. **Acoustic design**. [S.l.]: Elsevier, 2014. 36, 40

THIELE, N. Loudspeakers in vented boxes: Part 1. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 19, n. 5, p. 382–392, 1971. 63

_____. Loudspeakers in vented boxes: Part 2. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 19, n. 6, p. 471–483, 1971. 63

TINOCO, H.; PEÑA, F. Finite element analysis of coffea arabica l. var. colombia fruits for selective detachment using forced vibrations. **Vibration**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 1, n. 1, p. 207–219, 2018. 32

TOTH, C.; JÓŹKÓW, G. Remote sensing platforms and sensors: A survey. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Elsevier, v. 115, p. 22–36, 2016. 48

TSATSARELIS, C. Vibratory olive harvesting: the response of the fruit-stem system to fruit removing actions. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Elsevier, v. 38, n. 2, p. 77–90, 1987. 30

ULTRAVOX GROUP. **Ultravox - Pancadão 2k2**. [S.l.], 2015. 95

_____. **Ultravox - Shocker Terremoto 1k2**. [S.l.], 2015. 95

VILELA, E. F.; Rech Filho, E. L. Food and nutrition security in brazil. In: CLEGG, M.; BIANCHI, E.; MCNEIL, J.; ESTRELLA, L. H.; VAMMEN, K. (Ed.). **Challenges and Opportunities for Food and Nutrition Security in the Americas**. [S.l.]: IANAS, 2017. 47

VILLIBOR, G. P. Modelagem do sistema fruto-pedúnculo no processo de derriça de café. Universidade Federal de Viçosa, 2012. 32, 33

VITOUSEK, P. M.; NAYLOR, R.; CREWS, T.; DAVID, M. B.; DRINKWATER, L.; HOLLAND, E.; JOHNES, P.; KATZENBERGER, J.; MARTINELLI, L.; MATSON, P. et al. Nutrient imbalances in agricultural development. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 324, n. 5934, p. 1519–1520, 2009. 46

VONDRICKA, J.; LAMMERS, P. S. Real-time controlled direct injection system for precision farming. **Precision agriculture**, Springer, v. 10, n. 5, p. 421–430, 2009. 51

WANG, J.-K. Mechanical coffee harvesting (part a). **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 8, n. 3, p. 400–0402, 1965. 29

WESTINE, P. S.; DODGE, F. T.; BAKER, W. **Similarity methods in engineering dynamics: theory and practice of scale modeling**. [S.l.]: Elsevier, 2012. 59

WILBY, J. F. Vibration of structures induced by sound. In: PIERSOL, A. G.; PAEZ, T. L. (Ed.). **Harris' shock and vibration handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2009. 43, 70, 71

WISSMANN, J. Dynamic stability of space vehicles. structural dynamics model testing. 1968. 58

ZAMBON, I.; CECCHINI, M.; EGIDI, G.; SAPORITO, M. G.; COLANTONI, A. Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for smes. **Processes**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 1, p. 36, 2019. 46

ZHANG, Q.; PIERCE, F. J. **Agricultural Automation: Fundamentals and Practices**. [S.l.]: CRC Press, 2013. 52