



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Desenvolvimento de um sistema acústico para detecção de trincas em ovos

Alean Dos Santos Lima

João Monlevade, MG
2018

Alean Dos Santos Lima

**Desenvolvimento de um sistema acústico para
detecção de trincas em ovos**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof.^o Marcelo Moreira Tiago

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2018**



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 13 dias do mês de dezembro de 2018, às 10 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando Alean dos Santos Lima, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Edgard Gregory Torres Saravia, Gabriel Azevedo Fogli e Marcelo Moreira Tiago.

O candidato apresentou a monografia intitulada: Desenvolvimento de um sistema acústico para detecção de trincas em ovos. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do candidato, com a nota média 10, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Edgard Gregory Torres Saravia	10
Gabriel Azevedo Fogli	10
Marcelo Moreira Tiago	10
Média	10

João Monlevade, 13 de dezembro de 2018.

Marcelo Moreira Tiago
Professor Orientador

Alean dos Santos Lima
Aluno

Edgard Gregory Torres Saravia
Professor Convidado

Gabriel Azevedo Fogli
Professor Convidado

Agradecimentos

Sozinho não se chega a lugar algum!

É com este pensamento que agradeço a todos aqueles que, de uma maneira ou de outra, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

Em primeiro lugar a Deus, pela vida, saúde e pelas pessoas que estão ao meu lado.

À minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, Creusa Lima que já se foi, mas continua sendo minha maior força e inspiração na vida. Pai, Ângelo Lima, sua ajuda e presença significaram segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

A minha namorada, Naiara Lima, pessoa que há anos sempre cobrou minha dedicação em busca desta formação. Obrigado pelo carinho, a paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre.

A Marlene Martins e aos meus padrinhos Sérgio e Ana, pela importante participação na minha vida pessoal e também acadêmica, sempre apoiando e ajudando em meu progresso.

Ao meu orientador professor Marcelo Moreira Tiago, pelo apoio, paciência e ensinamentos, que me ajudaram a concluir este trabalho. Agradeço também aos meus professores que durante muito tempo me ensinaram e que me mostraram o quanto estudar é recompensador.

Aos meus amigos e colegas, que me ajudaram a superar momentos difíceis e acreditaram nessa conquista.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram próximo de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

*"A persistência é o caminho do êxito."
– Charles Chaplin*

Resumo

Neste trabalho, um sistema experimental foi desenvolvido para detectar trincas em cascas de ovos utilizando a técnica do impacto acústico. A inspeção visual humana é o principal procedimento de controle de qualidade na classificação de ovos. As cascas de ovos são inspecionadas quanto a trincas, sujeira e anormalidades internas nos ovos, como sangue e carnes. Pesquisas recentes sobre a automação da detecção de trincas em casca de ovo estão focadas nos princípios de detecção visual e mecânica. Neste estudo, a detecção de trincas de casca de ovo é baseada em dois protótipos. No primeiro protótipo foi desenvolvido um sistema de excitação mecânica controlado através de um solenoide capaz de atingir os ovos com um leve impacto (5 Newtons) em diferentes locais no equador da casca do ovo. Um ovo com uma casca intacta gera um som com um padrão de frequência característico que é altamente repetitivo em diferentes locais ao redor do equador, sendo que os sinais de resposta dos ovos trincados são heterogêneos e não repetitivos. Este método permite um nível de detecção alto, e durante os ensaios realizados neste trabalho foram obtidos índices de acertos na ordem de 100%. No segundo protótipo, um sistema composto por uma estrutura mecânica em forma de degraus foi utilizado. A estrutura apresenta uma inclinação de 5° graus, de modo a permitir que os ovos possam rolar de cima para baixo quando posicionados na parte superior. Durante a descida, os degraus provocam pequenos impactos acústicos na casca do ovo, gerando sons que serão processados na sequência. Os sinais de ovos intactos e trincados foram analisados e comparados, usando o software Matlab. A análise indicou que é possível classificar os ovos através dos sinais adquiridos em função da intensidade sonora. Os índices de acerto para este método foi de 90%.

Palavras-chave: Detecção de Trinca em Ovos, Impacto acústico, Processamento de Sinais.

Abstract

In this work, an experimental system was developed to detect cracks in egg shells using the acoustic impact technique. The human visual inspection is the main procedure of quality control in egg classification. Eggshells are inspected for cracks, dirt and internal abnormalities in eggs, such as blood and meat. Recent research on the automation of cracked egg shell detection is focused on the principles of visual and mechanical detection. In this study, the detection of egg shells is based on two prototypes. In the first prototype, a mechanical excitation system controlled by a solenoid capable of reaching the eggs with a slight impact (5 Newtons) was developed in different places in the equator of the eggshell. An egg with an intact shell generates a sound with a characteristic frequency pattern that is highly repetitive at different locations around the equator, and the response signals from the cracked eggs are heterogeneous rather than repetitive. This method allows a high level of detection, and during the tests performed in this work scores were obtained on the order of 100%. In the second prototype, a system composed of a mechanical structure in the form of steps was used. The structure has a slope of 5 degrees so as to allow the eggs to roll from top to bottom when positioned at the top. During the descent, the steps cause small acoustic impacts on the shell of the egg, generating sounds that will be processed in sequence. The intact and cracked egg signals were analyzed and compared using Matlab software. The analysis indicated that it is possible to classify the eggs through the signals acquired as a function of the sound intensity. The hit rates for this method were 90%.

Keywords: Egg Cracking Detection, Acoustic Impact, Signal Processing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Câmara de vácuo de ovo.	3
Figura 2 – Processo de reconhecimento de ovos trincados dentro da câmara de vácuo	4
Figura 3 – Configuração da iluminação do equipamento rotativo de ovo simples. . .	5
Figura 4 – Diagrama esquemático. 1 - Amostra de ovo experimental, 2 – Transdutor Magnetostritivo , 3 - Placa de circuito, 4 - Carcaça, 5 - Cabos, 6 - Computador, 7 - Microfone	6
Figura 5 – Dispositivo proposto por Jin, Xie e Ying (2015).	7
Figura 6 – Diagrama esquemático do Sistema de Detecção de Trincas.	8
Figura 7 – Sinais de resposta da superfície do ovo a estímulos de vibração no domínio do tempo e sua transformação para o domínio das frequências . .	8
Figura 8 – Detecção de trincas em ovos: (1) Objeto para realizar impacto no ovo; (2) Roldana que gira o ovo; (3) O microfone de captura de vibração. . .	9
Figura 9 – Detecção por meio da análise da resposta de frequência acústica	9
Figura 10 – Sistema de Resposta acústica.	10
Figura 11 – Sistema de detecção baseado em visão computacional.	11
Figura 12 – Princípio de Análise de Espectro	15
Figura 13 – Forma geral de um filtro FIR.	16
Figura 14 – Forma geral de um filtro IIR.	16
Figura 15 – Diagrama de bloco das etapas do projeto.	18
Figura 16 – Processo que descreve as etapas do primeiro protótipo.	19
Figura 17 – Imagem do Primeiro Protótipo	20
Figura 18 – Diagrama de Bloco da abordagem 2.	20
Figura 19 – Imagem do Segundo Protótipo	21
Figura 20 – Setor de triagem	22
Figura 21 – Forma de onda do sinal adquirido pelo microfone.	24
Figura 22 – Sinais de resposta no domínio da Frequência de ovos brancos	25
Figura 23 – Sobreposição dos gráficos dos ovos brancos gerados na Figura 22 no domínio da frequência	25
Figura 24 – Sobreposição de gráficos ovos marrons no domínio da frequência	26
Figura 25 – Sobreposição dos gráficos antes e depois do filtro, ovo bom	27
Figura 26 – Sobreposição dos gráficos antes e depois do filtro, ovo ruim	27
Figura 27 – Comparação valores de energia	28
Figura 28 – Fluxograma protótipo 1	29
Figura 29 – Análise no domínio do tempo	32
Figura 30 – Gráfico da energia do Sinal	33
Figura 31 – Fluxograma Protótipo 2	34

Lista de tabelas

Tabela 1 – Teste protótipo 1 em Ovos Bons	30
Tabela 2 – Teste protótipo 1 em Ovos Ruins	31
Tabela 3 – Teste protótipo 2 em Ovos Bons	35
Tabela 4 – Teste protótipo 2 em Ovos Ruins	36

Lista de Siglas

ATM	Pressão Atmosférica
BIBO	Entrada limitada saída limitada, do inglês, <i>Bounded Input-Bounded Output</i>
CCD	Dispositivo acoplado por computador, do inglês, <i>Computer Coupled Device</i>
DFT	Transformada Discreta de Fourier, do inglês, <i>Discrete Fourier Transform</i>
FFT	Transformada Discreta de Fourier, do inglês, <i>Fast Fourier Transform</i>
FIR	Resposta de Impulso Finita, do inglês, <i>Finite Impulse Response</i>
IIR	Resposta de Impulso Infinita, do inglês, <i>Infinite Impulse Response</i>
VAC	Vácuo
VLSI	Escala muito grande integrada, do inglês, <i>Very Large Scale Integrated</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Organização do Texto	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Técnicas Visuais	3
2.2	Técnicas Mecânicas	6
2.3	Comentários	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	Processamento de sinais	12
3.2	A Transformada Discreta de Fourier	13
3.3	Análise Espectral	14
3.4	Filtros Digitais	15
3.5	Sinais de Energia	17
4	METODOLOGIA	18
4.1	Sistema Experimental	18
4.2	Amostra de Ovos	21
4.3	Análise de Sinais	22
5	RESULTADOS	24
5.1	Análise dos espectros de frequência – Primeiro Protótipo	24
5.1.1	Banco de Calibração	24
5.1.2	Projeto Filtro	26
5.1.3	Banco de Teste	29
5.2	Análise no Domínio do Tempo – Segundo Protótipo	31
5.2.1	Banco de Calibração	32
5.2.2	Método de Detecção	32
5.2.3	Fluxograma	33
5.2.4	Banco de Teste	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS	39

1 Introdução

O ovo é um dos alimentos mais completos na alimentação humana, por conter uma composição rica em proteína, vitaminas, minerais, carotenoides e, fonte de colina, um importante componente do cérebro (PIRES et al., 2015).

A produção avícola industrial nas últimas décadas vem se modificando e passa a se destacar no setor agroindustrial brasileiro, sofrendo algumas modificações voltadas para a necessidade do consumidor e para a qualidade do mercado.

O aumento da produção avícola requer uma redução das perdas que ocorrem durante o processo de produção. Além disso, o aumento das exigências impostas pelo mercado nacional e internacional, cada vez mais regularizada e fiscalizada por órgãos competentes, exige um maior controle de qualidade dos produtos, a fim de evitar problemas como contaminação e fornecimento de alimentos de baixa qualidade.

Devido a esses fatores, grandes investimentos têm sido realizados pelas empresas produtoras de ovos em pesquisas para desenvolver métodos de produção com o menor custo possível. Uma das alternativas para a redução dos custos de produção é a automação dos processos e do controle de qualidade, visando reduzir a quantidade de produtos com algum tipo de problema. Vale salientar que esse baixo controle de qualidade dos ovos está presente na realidade brasileira como pode ser observado no estudo realizado por Pascoal et al. (2008), que fez experimentos para avaliar a qualidade de ovos brancos em diferentes estabelecimentos.

No Brasil, esse tipo de problema afeta diretamente a produção de ovos, que em 2016 foi de aproximadamente 3,3 bilhões de dúzias. Apesar de ser um valor alto, o consumo brasileiro de ovos ainda é baixo em comparação com o consumo de outros países. O brasileiro consome 12 kg de ovos por ano, enquanto o consumo da Argentina é de 15,3 kg e do México é de 22,3 kg por ano, de acordo com Gutiérrez (2018). Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) o ovo está presente na dieta alimentar de 99% das famílias brasileiras (ABPA, 2017).

A qualidade do ovo pode estar relacionada à sua parte interna ou externa. A qualidade interna do ovo se relaciona, em geral, com a qualidade do albúmen. Já a qualidade exterior está relacionada à casca do ovo e os principais pontos observados são a cor, a espessura, a porosidade, a resistência e a sujeira da casca. Esses aspectos externos da qualidade dos ovos estão relacionados com a função principal da casca: a proteção do interior do ovo contra danos físicos e invasões bacterianas.

Dentre os vários fatores que podem influenciar na qualidade dos ovos, podem-se destacar a resistência à manipulação, idade das aves, nutrição, genética e condição sanitária das aves (PIRES et al., 2015). Segundo Rodrigues e Elisabete (2001): “Para entender e procurar garantir a segurança dos alimentos é necessário intensificar os estudos

relativos a essa problemática".

A avaliação da qualidade do ovo comercial passa pela análise da qualidade da casca do ovo, pois produtos com casca intacta podem permanecer por mais tempo nas prateleiras de supermercados sem deixar de atender as exigências sanitárias e do consumidor final. Por causa das dificuldades de conferir os ovos de forma manual no processamento de triagem, a automação produz técnicas eficazes, fornecendo agilidade, precisão e aumentando a qualidade do ovo.

1.1 Objetivos

Com base nessas informações, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo para detecção de trincas em ovos.

1.2 Organização do Texto

No capítulo 1 é apresentado uma introdução do problema, destacando-se a motivação para o desenvolvimento deste trabalho e os objetivos propostos. No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica, abordando os principais trabalhos utilizados para desenvolver os sistemas de detecção.

O capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica, abordando os principais conceitos utilizados para desenvolver o sistema de detecção. O capítulo 4 apresenta a metodologia proposta. Os resultados preliminares obtidos com a metodologia proposta são mostrados no capítulo 5. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e comentários, além de propostas para trabalhos futuros.

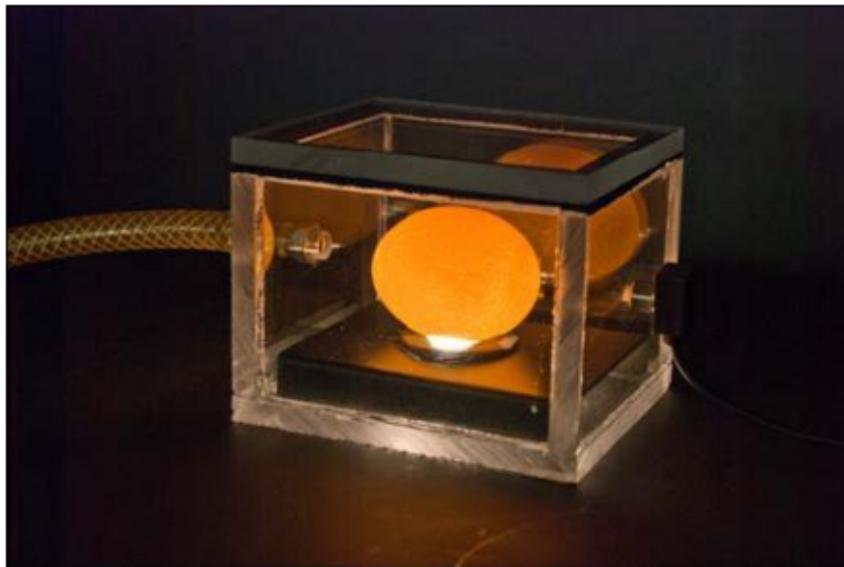
2 Revisão Bibliográfica

Nesta parte do trabalho são mencionados alguns dos principais estudos relacionados ao desenvolvimento de técnicas para detecção de trincas em ovos. Dois conjuntos de técnicas diferentes serão abordados nesta seção: as técnicas visuais e as técnicas mecânicas. As técnicas visuais utilizam o processo de detecção de trincas em ovos a partir de uma imagem de ovoscopia e as técnicas mecânicas, avaliam a casca do ovo por meio da análise das frequências de ressonância após uma excitação externa.

2.1 Técnicas Visuais

O trabalho apresentado por Lawrence et al. (2008) apresenta um método de detecção de trincas em ovos na cor branca, através de fotografias tiradas com uma câmera. Foi utilizada uma câmera de resolução alta com um recipiente a vácuo conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Câmara de vácuo de ovo.



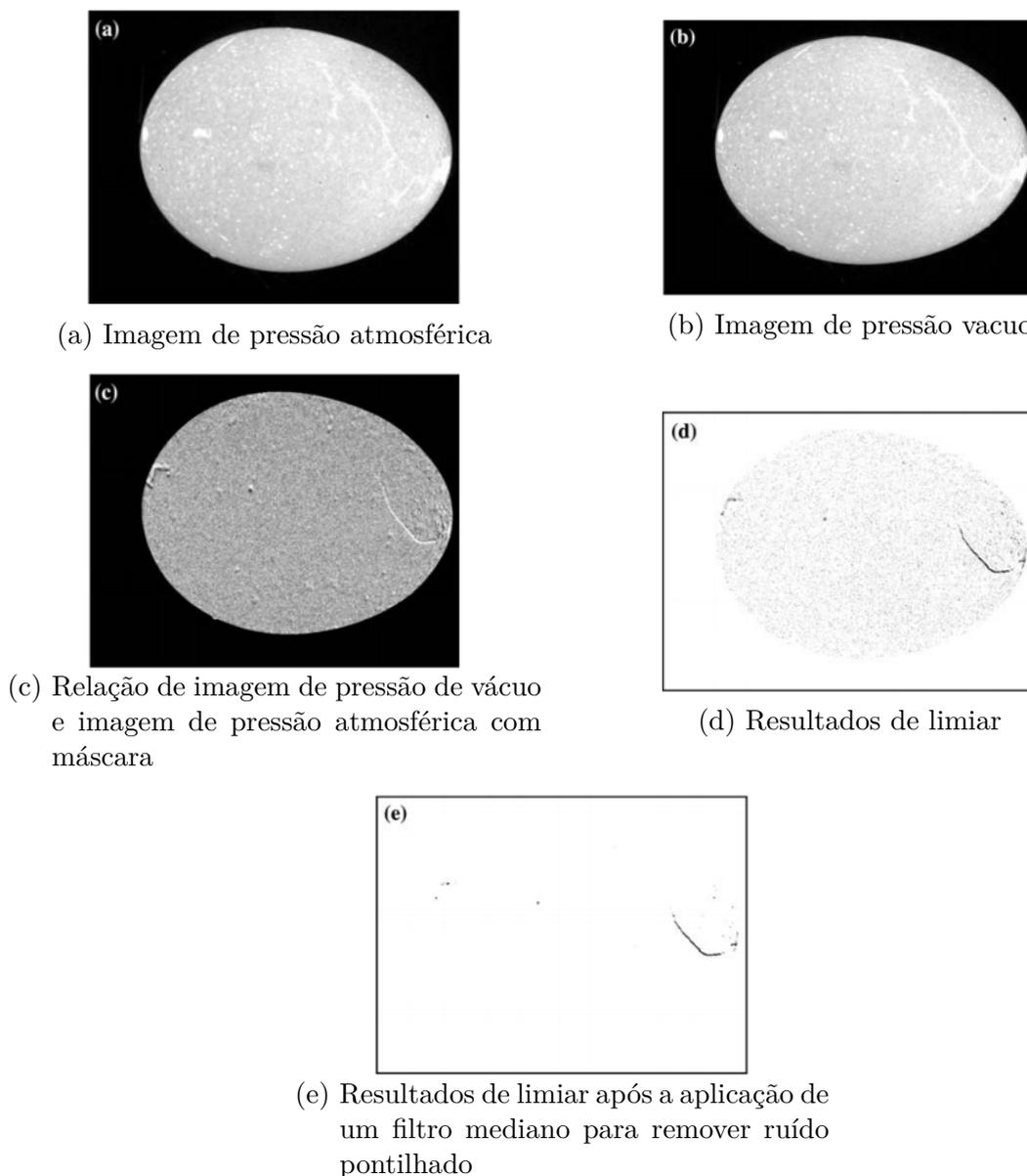
Fonte: Retirado de Lawrence et al. (2008)

Para a detecção de trinca, o ovo é colocado na câmara e uma máquina fotográfica é utilizada para captar uma imagem monocromática do mesmo, conforme apresentado na Figura 2. Para isso, uma porta de exaustão na tubulação de vácuo é fechada e a pressão aumenta rapidamente até atingir um nível ideal para abrir uma trinca, sem induzir nenhuma nova trinca no ovo. Estudos feitos dizem que o ovo intacto pode suportar pressão de vácuo de 254 mmHg, Neste instante, a câmera é usada para tirar uma nova foto do ovo na nova pressão. Em seguida, a porta de escape é aberta, o ovo é girado em 120 graus e

outro conjunto de imagem é coletado. Esse processo é repetido até que toda circunferência do ovo seja fotografada.

As duas imagens monocromáticas do ovo submetido à pressão atmosférica e a pressão de vácuo são divididas para criar a imagem razão. Em seguida um algoritmo é empregado para processar as imagens e um limiar é usado para encontrar as linhas de trincas no ovo. No fim, é utilizado um filtro nas imagens, para eliminar os pontos que não se assemelham com trincas.

Figura 2 – Processo de reconhecimento de ovos trincados dentro da câmara de vácuo



Fonte: Retirado de Lawrence et al. (2008)

Nos testes realizados, para um total de 160 ovos, sendo 80 ovos trincados e 80 intactos, somente um ovo dos trincados não foi detectado. Esta trinca não foi detectada por se encontrar no hemisfério do ovo, região em que a câmara não conseguia captar imagens.

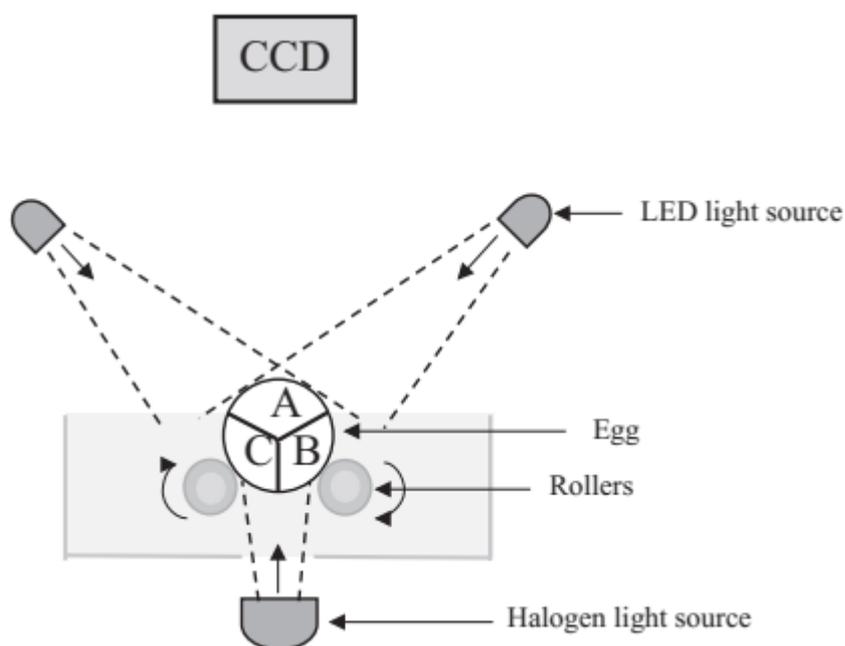
Esse método teve um resultado total de 98,75% na identificação de ovos trincados e 100% nos ovos intactos.

O trabalho apresentado por Priyadumkol, Kittichaikarn e Thainimit (2017) mostra o projeto de um sistema de detecção de trincas baseado em análise de imagem. O sistema se concentra na detecção de micro trincas em ovos não lavados.

Esse sistema consiste em dois módulos principais, sendo um para aquisição das imagens e outro para o processamento. O módulo de aquisição captura as imagens da superfície dos ovos sob pressão atmosférica (ATM) e vácuo (VAC). O sistema utiliza uma combinação de técnicas com o ovo girando continuamente com o sistema operando à pressão atmosférica e a vácuo. Ao final, no vácuo as trincas existentes são reveladas, ao passo que se o ovo estiver intacto, ele pode tolerar a mudança de pressão sem qualquer abertura de fenda.

Uma câmera CCD (*Computer Coupled Device*) foi configurada a uma altura (h) de 15cm para adquirir três imagens (A, B e C) tomadas em intervalos de 120° ao redor do equador do ovo, como indicado na Figura 3. Além disso, é importante fornecer um campo de luz uniforme na superfície do ovo, tornando as trincas mais visíveis e fáceis de detectar (KETELAERE; COUCKE; BAERDEMAEKER, 2000). Para conseguir isso, uma fonte de luz de halogênio foi montada na parte de baixo da câmara e dois diodos emissores de luz foram montados em cima dela, conforme indicado na Figura 3 .

Figura 3 – Configuração da iluminação do equipamento rotativo de ovo simples.



Fonte: Retirado de Priyadumkol, Kittichaikarn e Thainimit (2017)

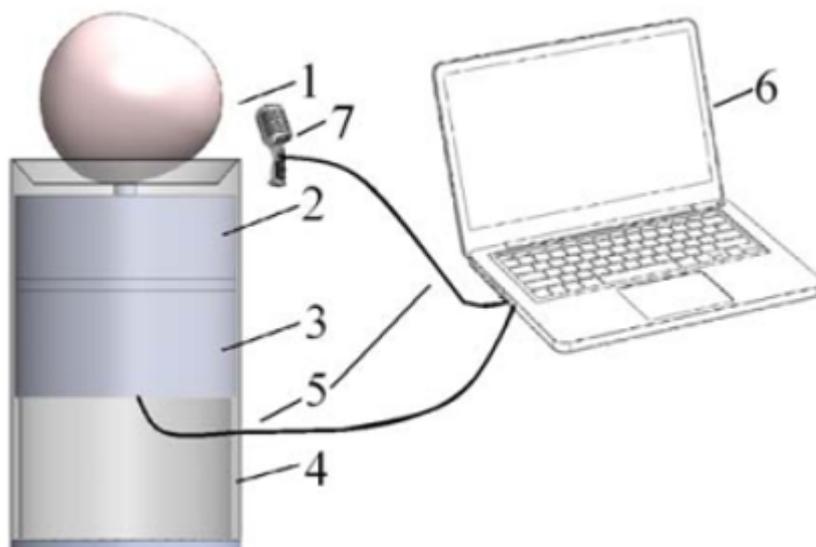
Nesta pesquisa, os experimentos foram validados usando 50 ovos brancos, não lavados. Entre todos os 50 ovos amostrados, metade estava suja devido ao contato com o

solo, fezes e penas na superfície. Todas as micro trincas foram artificialmente infligidas, tocando-se suavemente em 30 cascas de ovos. Ao final, os índices de acerto do método foram da ordem de 94%, com um índice de falsos negativos de 1,67%.

2.2 Técnicas Mecânicas

No trabalho apresentado por Lu et al. (2015) os autores tratam do problema de detecção de trincas em ovos a partir de um sistema de vibração usando um transdutor magnetostritivo. Um esboço do sistema utilizado é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama esquemático. 1 - Amostra de ovo experimental, 2 – Transdutor Magnetostritivo, 3 - Placa de circuito, 4 - Carcaça, 5 - Cabos, 6 - Computador, 7 - Microfone



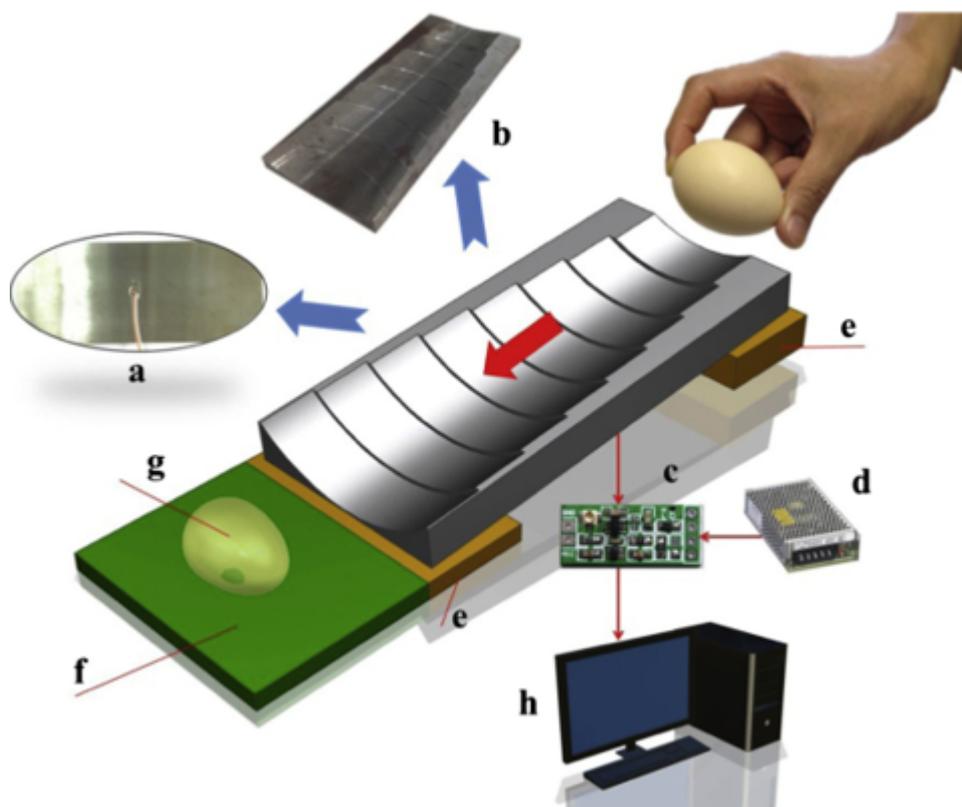
Fonte: Retirado de Lu et al. (2015)

Primeiramente foi desenvolvido um sistema vibratório usando um transdutor magnetostritivo. Assim é enviado um sinal amplificado criado no computador por software para o transdutor, com frequência de 1 a 14kHz. A colisão entre o ovo e o transdutor gera sons. Esses sinais gerados são coletados por meio de um microfone e são filtrados para remover o ruído.

Um método de estimação espectral de potência em conjunto com um classificador foi utilizado para avaliar a integridade dos ovos. O resultado do experimento mostrou que após utilizar um conjunto de treinamento de 270 ovos, sendo 150 ovos intactos e 120 ovos trincados (40 ovos trincados no topo, 40 ovos trincados no meio e 40 ovos trincados no fundo), obteve-se um índice de acerto de 100% após utilizar um conjunto de teste de 150 ovos, incluindo 60 ovos intactos e 90 ovos trincados (30 ovos trincados no topo, 30 ovos trincados perto do equador e 30 ovos trincados no fundo), atingindo um índice de acertos de 98%.

Por sua vez, Jin, Xie e Ying (2015) apresentaram um procedimento baseado em uma placa com sete degraus com um microfone instalado na parte traseira central da placa, e fizeram a coleta dos sinais sonoros gerados quando o ovo está rolando nos degraus. O sinal obtido é amplificado e levado a um computador, produzindo sete sinais acústicos diferentes utilizados para gerar um vetor característico. A Figura 5 apresenta o esquema do sistema proposto pelos autores.

Figura 5 – Dispositivo proposto por Jin, Xie e Ying (2015).

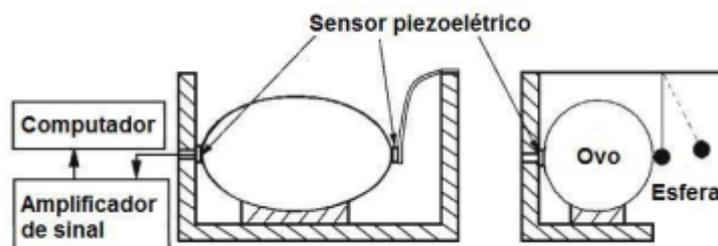


Fonte: Retirado de Jin, Xie e Ying (2015)

Nesse método houve 90% de detecção de ovos trincados e 10% de falsos positivos. Sua principal vantagem em relação aos demais equipamentos apresentados é que o dispositivo proposto é eficaz e de fácil construção.

No trabalho apresentado por Wang e Jiang (2005), um sistema mecânico composto por um pêndulo e uma bola de madeira em uma corda de nylon extremamente fina excita a superfície de um ovo com um leve impacto em diferentes locais. Um esboço do sistema é apresentado na Figura 6. Após a colisão, são geradas pequenas vibrações, em regiões intactas do ovo. Observou-se que o movimento realizado é praticamente elástico e em regiões na vizinhança de trincas, a elasticidade do ovo é seriamente comprometida.

Figura 6 – Diagrama esquemático do Sistema de Detecção de Trincas.

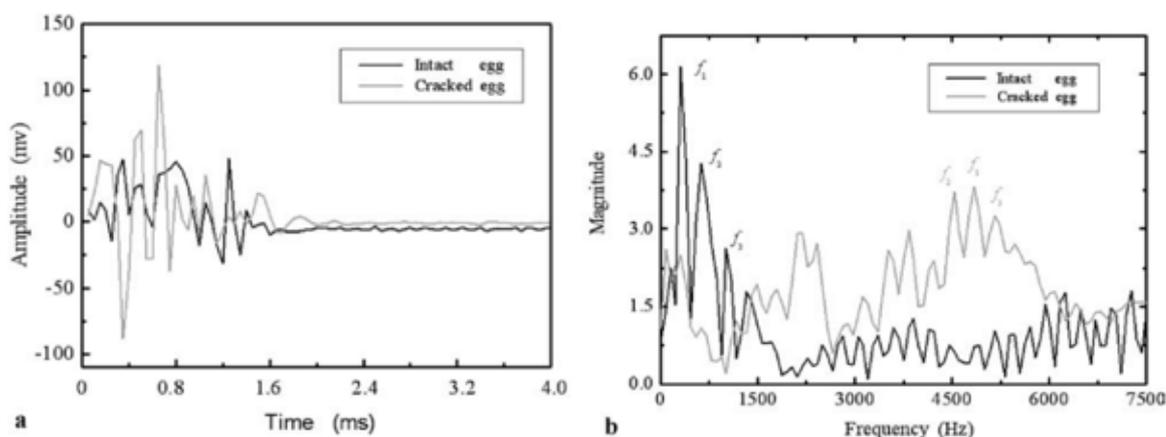


Fonte: Retirado de Wang e Jiang (2005)

A região onde ocorre o impacto é chamada de ponto de detecção. Devido ao fato da qualidade do sinal capturado depender da distância do ponto de detecção da trinca, buscou-se repetir esse teste ao longo de toda superfície do ovo de modo que a qualidade do sinal não fosse comprometida. Para detectar as vibrações geradas durante o ensaio, os autores instalaram três sensores piezoelétrico: um elemento sensor foi colocado no equador do ovo, os outros dois colocados em lados opostos nas extremidades do ovo.

Na Figura 7(a) verifica-se a diferença entre os sinais gerados pela vibração dos ovos trincados e os ovos intactos no domínio do tempo. A mesma diferença é observada na Figura 7(b) que corresponde a Transformada de Fourier dos sinais da Figura 7(a).

Figura 7 – Sinais de resposta da superfície do ovo a estímulos de vibração no domínio do tempo e sua transformação para o domínio das frequências



(a) Sinal de amplitude de vibração ao longo do tempo.

(b) Espectro de frequências de resposta.

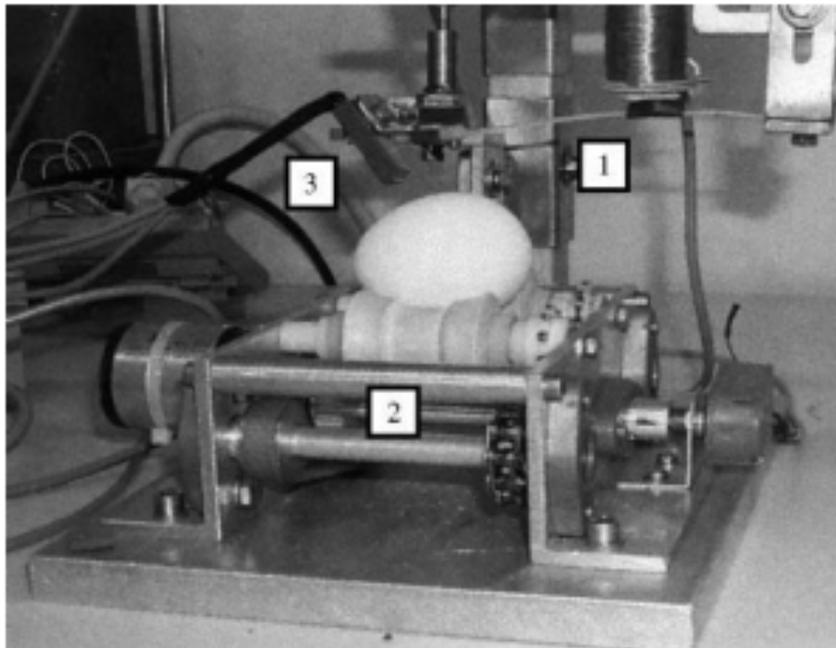
Fonte: Retirado de Wang e Jiang (2005)

A metodologia utilizada pelos autores foi empregada com uma base de teste com 300 ovos intactos e 200 com trincas, obtendo uma taxa de acerto de 92%.

Outra proposta de detecção de trinca foi apresentada por Ketelaere, Coucke e Baerdemaeker (2000). Nesse trabalho, foi realizado um estudo da análise da resposta de frequência medida acusticamente em um ovo excitado com um leve impacto mecânico

em diferentes locais no equador da casca do ovo. Uma foto do sistema é apresentada na Figura 8.

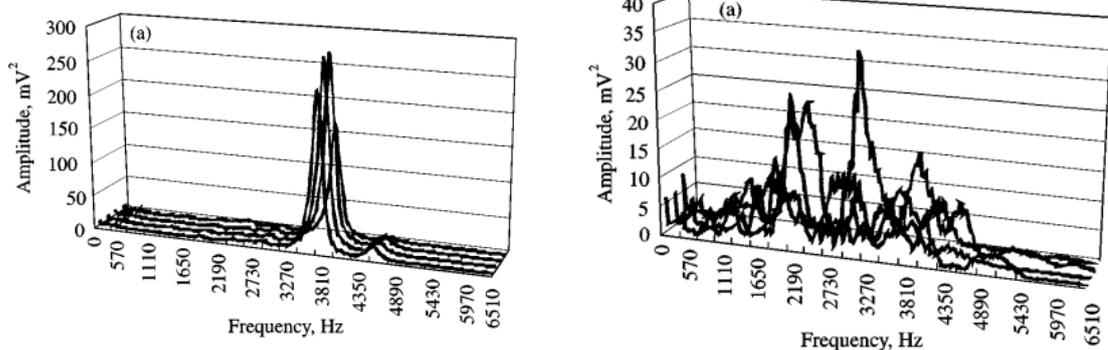
Figura 8 – Detecção de trincas em ovos: (1) Objeto para realizar impacto no ovo; (2) Roldana que gira o ovo; (3) O microfone de captura de vibração.



Fonte: Retirado de Ketelaere, Coucke e Baerdemaeker (2000)

A resposta de vibrações medidas em um ovo intacto ao longo da superfície possui um padrão de frequência característico. Devido a sua simetria, o ovo com sua casca intacta apresenta uma semelhança independente do local da excitação ao longo do equador. Já os ovos trincados apresentam um padrão de resposta heterogêneo e não repetitivo, visto na Figura 9.

Figura 9 – Detecção por meio da análise da resposta de frequência acústica



(a) Domínio da Frequência: Ovo Intacto

(b) Domínio da Frequência: Ovo trincado

Fonte: Retirado de Ketelaere, Coucke e Baerdemaeker (2000)

Para a realização do experimento, os autores excitaram o ovo quatro vezes com um martelo de impacto controlado por um dispositivo eletromagnético, sincronizando cada impacto com a velocidade de rotação do ovo, permitindo que fossem realizadas medições equidistantes.

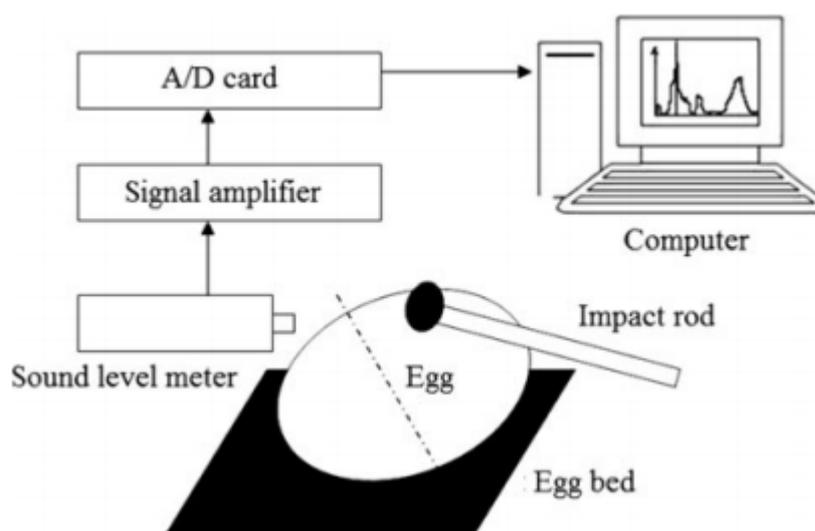
Em seguida, um microfone condensador miniatura realiza a captação sonora e envia para a placa do computador realizar a conversão do sinal analógico em um sinal digital. Um software foi utilizado para calcular a Transformada de Fourier do sinal adquirido.

Os autores observaram que a frequência de ressonância de ovos com casca intacta pode variar entre 3000 e 6000 Hz. Essa variação na frequência depende da massa do ovo e das características de estabilidade da casca. Ovos com trincas têm sinais heterogêneos que são difíceis de classificar em categorias, sendo os padrões dependentes da posição relativa do ponto de excitação em direção à localização da trinca na casca. Além disso, a energia do sinal acústico proveniente de ovos trincados é geralmente menor do que para os ovos intactos.

Com essa metodologia os autores conseguiram atingir um índice de acertos de 90% e um índice de falsos positivos de aproximadamente 0.5%.

Em Pan et al. (2011) um sistema híbrido baseado em técnicas acústicas e de visão computacional foi proposto para a detecção de trincas. Primeiramente, os sinais de resposta acústica foram capturados e analisados, utilizando o sistema apresentado na Figura 10.

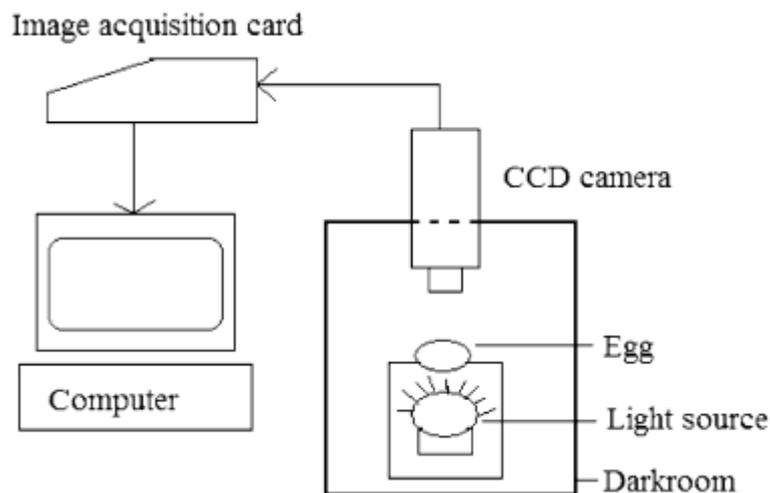
Figura 10 – Sistema de Resposta acústica.



Fonte: Retirado de Pan et al. (2011)

Em seguida, as imagens da casca do ovo foram capturadas e processadas pelo sistema de visão utilizando o sistema apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Sistema de detecção baseado em visão computacional.



Fonte: Retirado de Pan et al. (2011)

Finalmente, a qualidade dos ovos, com ou sem trincas, foi avaliada com base nos resultados obtidos a partir dos dois sistemas. Os resultados mostraram o índice de acertos igual a 98% pela fusão de informações das duas técnicas.

2.3 Comentários

Os trabalhos apresentados neste capítulo realizam a detecção automática de trincas nos ovos de diversos modos, cada qual com seu custo e benefício. Notou-se que os sistemas de processamento de imagem apresentaram resultados bastante encorajadores (acima de 94% de índice de acerto), com baixa taxa de falso positivo. Ficou claro que a trinca deve ser visível pela câmera, portanto, alguns meios de girar o ovo após a coleta de um par de imagens serão necessários para identificar trincas em qualquer parte do ovo e, além disso, imagens das extremidades do ovo podem ser usadas para garantir que todas as trincas possam ser vistas pela câmera, aumentando assim a precisão do sistema. Para ser comercialmente viável, o sistema deve ser ampliado para inspecionar vários ovos de cada vez, mas considera-se que o processo de análise de todos os ovos utilizando uma câmara à vácuo seria lento, e ainda haveria a possibilidade do ovo trincar ao ser colocado na câmara de vácuo.

Por sua vez, os dispositivos que realizaram suas análises através de sinais de vibração ocasionados por uma excitação mecânica, obtiveram índices de acertos maiores que 90% e baixa taxa de falso positivo. Os dispositivos apresentados são de fácil construção, porém essa técnica é sensível à distância da trinca ao ponto de aplicação da excitação. Além disso, é necessário realizar um número suficiente de testes ao longo da superfície do ovo, de forma que a área total do ovo seja coberta de forma satisfatória.

3 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. São descritos os conceitos necessários para se realizar a análise espectral de um sinal, bem como as técnicas de projeto de filtros digitais que serão utilizados para caracterizar os sinais acústicos gerados ao longo da análise de ovos.

3.1 Processamento de sinais

O processamento de sinais consiste na análise e transformação de sinais de forma a extrair informações desejadas e utilizá-las para algum fim específico. Por exemplo, no reconhecimento automático de fala, um sinal de voz é processado, extraem-se as palavras contidas no sinal e conforme programado uma ação é executada. Esse método trabalha com a representação matemática do sinal e com o processo de cálculo para extrair informação com fidelidade sem qualquer perda ou distorção (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011, Capítulo 1, pg. 1-10).

Antes o processamento de sinais era feito apenas por meio de sinais analógicos, mediante o emprego de componentes como resistores, capacitores, indutores, entre outros. Com a evolução da era digital, houve um barateamento dos processadores, memórias e outros componentes digitais. Isso fez com que o processamento que antes era feito através de circuitos eletrônicos complexos, pudesse ser feito digitalmente, com filtragem, compactação, codificação, modulação, etc (PROAKIS; MANOLAKIS, 2013, Capítulo 1, pg. 1-3).

De acordo com (LATHI, 2006, Capítulo 3, pg. 244) as vantagens e desvantagens do Processamento Digital de Sinais são:

1. Operações em sistemas digitais podem tolerar uma variação considerável no valor do sinal e, portanto, são menos sensíveis a mudanças nos parâmetros dos componentes causadas pela variação de temperatura, idade e outros fatores, resultando em um alto grau de precisão e estabilidade.
2. Sistemas digitais muitas vezes são facilmente duplicados em volume sem preocupar-se com valores precisos de componentes.
3. Sistemas digitais podem ser integrados totalmente e mesmo existindo um sistema altamente complexo, podem ser implementados em um único chip.
4. Filtros digitais são mais flexíveis. Suas características podem ser facilmente alteradas simplesmente mudando o programa (*software*).

5. A execução em *hardware* digital permite o uso de microprocessadores, mini processadores, chaves digitais, etc.
6. Os sinais digitais podem ser simplesmente armazenados sem deterioração da qualidade do sinal.
7. A codificação do sinal é realizada com alta fidelidade, considerando taxas de erros baixas.
8. Facilidade em multiplexar diversos sinais digitais em um mesmo canal, com uma maior eficiência.
9. Desvantagens: aumento da complexidade devido à adaptação entre os sistemas (interfaces) dos conversores analógico-digital e digital-analógico, faixas de frequência limitada na prática e uso de maior potência do que é necessário para circuitos analógicos passivos.

As análises no domínio do tempo e no domínio da frequência são complementares e levam a uma compreensão completa e clara do comportamento de um sistema dinâmico. A análise no domínio do tempo tem a vantagem de permitir a identificação de fenômenos transitórios e impactos. Além disso, permite a boa localização do evento no instante de tempo em que ocorreu, embora tenha a desvantagem de não conseguir determinar a natureza desse evento. Já a análise no domínio da frequência permite que o conteúdo em frequência de um sinal seja identificado.

Neste trabalho, os sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência foram utilizados para desenvolver um sistema de detecção de trinca em ovos.

3.2 A Transformada Discreta de Fourier

A Transformada de Fourier permite a análise no domínio da frequência. A definição desta transformada demonstra que uma forma de onda no domínio do tempo pode ser representado como somas de senos e cossenos, de modo que a forma de onda possa ser representada então no domínio da frequência através de valores de magnitude e fase.

A Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT) converte uma sequência finita discreta no tempo em sua correspondente versão espectral na frequência, isto é, a DFT é a representação no domínio da frequência da sequência original de entrada. Essa transformada tem papel importante na implementação de diversos algoritmos para processamento de sinais digitais. Isso porque existem diversos algoritmos bastante eficientes que podem ser utilizados para implementar esta técnica utilizando processadores.

A Transformada de Fourier Discreta de uma sequência $x[n]$ é definida por (MITRA; KUO, 2006)

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.1)$$

onde $X[k]$ é uma sequência finita no domínio da frequência e possui N amostras.

A senoide complexas que aparece na Transformada de Fourier compõe-se de amostras em N frequências discretas ω_k uniformemente espaçadas entre 0 e a taxa de amostragem $\omega_T = 2\pi f_T$.

A transformada pode ser interpretada como uma operação de produto interno que realiza o cálculo do coeficiente de projeção da sequência $X[n]$ sobre uma senoide complexa $\cos(\omega_k n) + i \sin(\omega_k n)$

A Transformada Discreta de Fourier Inversa de uma sequência de amostra de frequência é definida por (MITRA; KUO, 2006)

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.2)$$

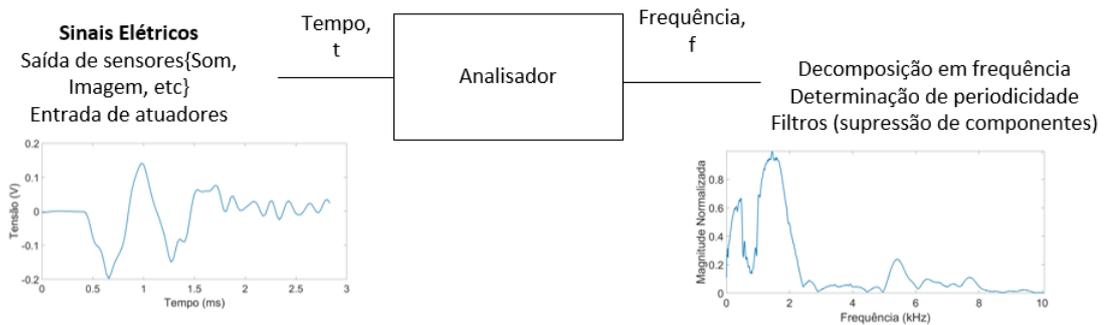
onde $X[n]$ é uma sequência finita no domínio do tempo e possui N amostras.

Quando se trabalha com as sequências $X[k]$ e $X[n]$, é importante salientar que sempre existem sequências periódicas envolvidas.

3.3 Análise Espectral

A análise espectral constitui uma forma alternativa de identificar, analisar e descrever os sinais. Esse tipo de análise é complementar à análise no tempo, sendo uma forma eficiente e rápida de identificar o conteúdo de frequências que compõem um sinal. Como pode ser visto na Figura 12, um analisador de espectro normalmente é utilizado para realizar a conversão de um sinal no domínio do tempo para um sinal no domínio da frequência. Esse analisador pode ser implementado de forma digital, utilizando um *software* para calcular a Transformada Rápida de Fourier (do inglês, *Fast Fourier Transform* do sinal de entrada. Há vários algoritmos que implementam numericamente esse conceito de forma eficiente (OLIVEIRA; RAMOS, 1995).

Figura 12 – Princípio de Análise de Espectro



Fonte: Do Autor

Essa técnica possui grandes aplicações em sínteses e análises de sinais de voz, medição do desvio de frequência (Doppler), é muito utilizada nos estudos de harmônicos em redes elétricas.

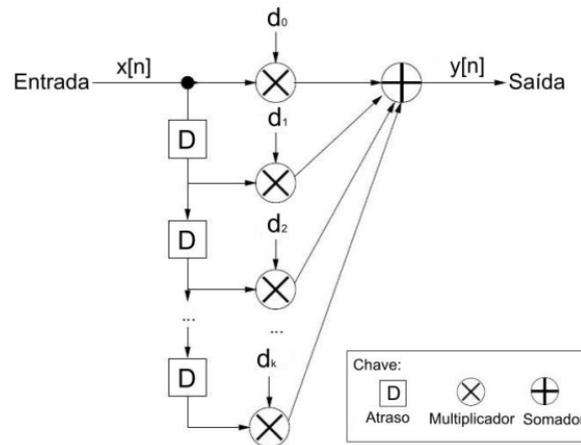
3.4 Filtros Digitais

Um filtro digital é um sistema que permite a passagem de certas frequências em detrimento de outras. Sua implementação pode ser feita a partir de operações matemáticas, que podem ser realizadas por um processador digital de sinais (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011, Capítulo 7, pg. 294-295).

O projeto de filtros digitais envolve a determinação das características de filtragem desejadas (conforme a aplicação do filtro). A partir das especificações, deve-se determinar os coeficientes da função transferência do filtro, selecionar a estrutura adequada e implementar o algoritmo utilizado para realizar a operação. A implementação de um filtro digital pode ser feita utilizando dois tipos de estrutura: a estrutura FIR (resposta ao impulso finita, do inglês *Finite Impulse Response*) e a estrutura IIR (resposta ao impulso infinita, do inglês, *Infinite Impulse Response*).

Os filtros FIR tem uma resposta ao impulso com duração finita sendo implementados por meio de equações de diferenças que não contenham termos recursivos, ou seja, a saída depende apenas da entrada atual e anteriores (WEEKS, 2007, Capítulo 3, pg. 91-98). A Figura 13 apresenta uma forma geral do filtro FIR para $k+1$ coeficientes.

Figura 13 – Forma geral de um filtro FIR.



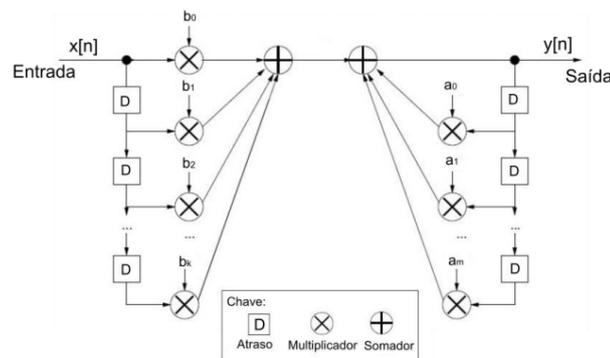
Fonte: Retirado de Weeks (2007, Capítulo 3, pg. 94)

As principais características de um filtro FIR são: qualquer entrada limitada em amplitude resulta em uma saída limitada em amplitude (BIBO) independente do estado interno do sistema, tem a memória finita, apresentam fase linear e são estáveis. Esse tipo de filtro é muito utilizado em aplicações de áudio.

Os filtros IIR apresentam uma resposta ao impulso com duração infinita, podendo ser relacionados a filtros analógicos. Esses filtros possuem uma malha de realimentação entre saída e entrada, ou seja, são filtros recursivos (a saída atual depende de versões atrasadas dela mesma). A Figura 14 apresenta a forma geral de um filtro IIR.

Pela estrutura do filtro, se a saída cresce ou oscila ao infinito, o filtro se torna instável. Quando a saída oscila a um valor constante, o filtro é definido como condicionalmente estável, e quando a saída se aproxima do valor zero é denominado estável (WEEKS, 2007, Capítulo 3, pg. 111-116).

Figura 14 – Forma geral de um filtro IIR.



Fonte: Retirado de Weeks (2007, Capítulo 3, pg. 114)

As principais características do filtro IIR são: possuem polos e zeros, a resposta de fase costuma ser não linear, possuem custo computacional comumente menor que o FIR, utilizam menos coeficientes e costumam apresentar menor ordem e tempo de execução.

3.5 Sinais de Energia

Analisando pelo domínio do tempo, os sinais podem ser classificados em dois tipos: contínuos e discretos. Os sinais contínuos podem ser representados em qualquer instante de tempo, enquanto os sinais discretos são definidos apenas em um intervalo específico (HAYKIN; VEEN, 2001).

A Energia de um sinal discreto no tempo pode ser definida como:

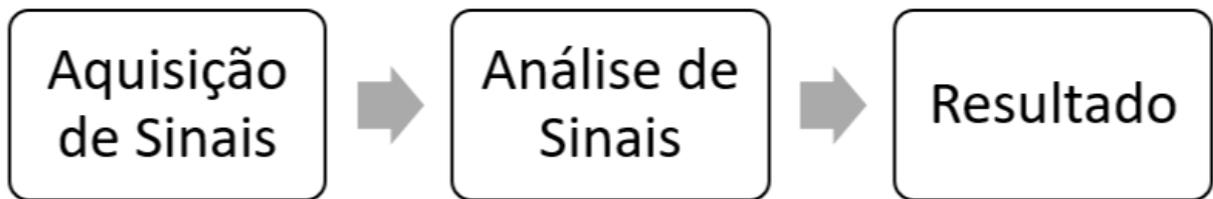
$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2, \quad (3.3)$$

onde $x[n]$ é um sinal discreto sendo assim, esta definição válida para todo $x[n]$ real ou complexo. A amplitude desse sinal tende a zero somente quando n tende a infinito. Assim, pode-se afirmar que se um sinal for limitado e de duração finita ele será um sinal de energia. Neste trabalho, o valor da energia do sinal foi utilizada na construção de um limiar utilizado para caracterizar os ovos analisados como trincados ou inteiros.

4 Metodologia

O presente capítulo apresenta a metodologia proposta para o desenvolvimento do sistema para detecção de trincas em ovos. Foram utilizadas técnicas de processamento de áudio como ferramentas para resolução do problema proposto. Uma visão geral de todas as etapas propostas e desenvolvidas em diagrama de blocos é ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de bloco das etapas do projeto.



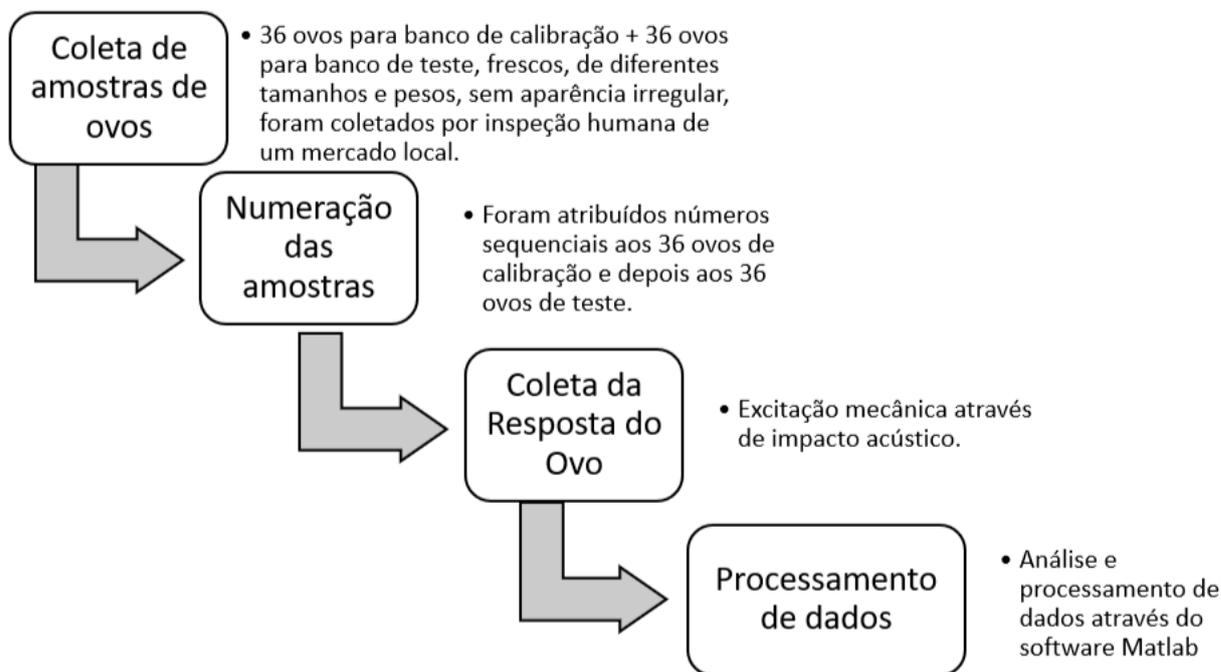
Fonte: Do Autor

Na primeira etapa, dois tipos diferentes de protótipos mecânicos foram utilizados para excitar os ovos, gerando sinais acústicos que foram adquiridos utilizando uma placa de som. Em seguida, realizou-se a análise espectral dos sinais adquiridos, para determinar os parâmetros do filtro como faixa de frequências de interesse, rejeição e atenuação. Por fim, realizou-se a análise dos dados a fim de se determinar os índices de acertos de cada sistema.

4.1 Sistema Experimental

O primeiro protótipo utilizado neste trabalho realiza a detecção de trincas em ovos a partir de uma análise no domínio da frequência. Um fluxograma descrevendo as etapas do projeto é apresentado na Figura 16;

Figura 16 – Processo que descreve as etapas do primeiro protótipo.

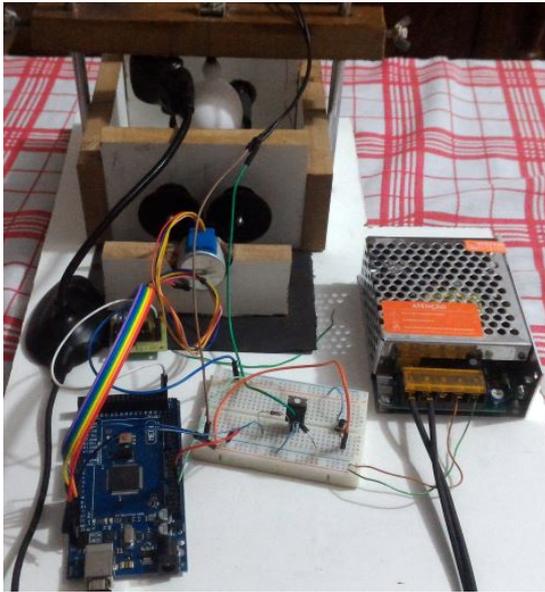


Fonte: Do Autor

Neste protótipo a máquina utiliza uma solenoide como fonte de excitação mecânica com uma força aproximada de 5 newtons. Além disso, foram utilizados rolos de borracha para apoiar os ovos, um circuito de acionamento para o solenoide e um circuito para controlar o motor responsável por girar os ovos durante a análise. O sistema experimental é apresentado na Figura 17. Neste trabalho, a proposta é realizar o processamento dos sinais de maneira offline. Desta forma, o controle dos dois dispositivos foi feito através de um microcontrolador.

Uma pequena bola de plástico foi colada no solenoide e a excitação foi sincronizada com a velocidade do motor. Quatro excitações foram feitas em torno do equador em distâncias igualmente espaçadas. Esse número de medições para cada ovo é baseado no trabalho apresentado por Ketelaere, Coucke e Baerdemaeker (2000). O sinal acústico gerado após o impacto mecânico foi adquirido utilizando um microfone de eletreto com uma resposta em frequência definida no intervalo entre 20 Hz e 20 kHz. Após o ajuste da distância entre microfone e casca do ovo, realizou-se a aquisição dos sinais acústicos através do microfone. Para isso, utilizou-se a placa de som da marca Realtek modelo ALC255 *High Definition Audio* instalada em um computador pessoal da marca ACER, modelo Aspire F15 com taxa de amostragem de 44 kHz. Tanto a aquisição quanto o processamento do sinal adquirido foram feitos utilizando o software Matlab. Como o microfone tem uma resposta entre 20 Hz e 20 kHz e a placa de som possui uma taxa de amostragem de 44 kHz, o problema de sobreposição do espectro (*aliasing*) não ocorrerá, já que o sinal amostrado pelo microfone contém frequências menores do que 10 kHz.

Figura 17 – Imagem do Primeiro Protótipo



(a) Primeiro Protótipo.

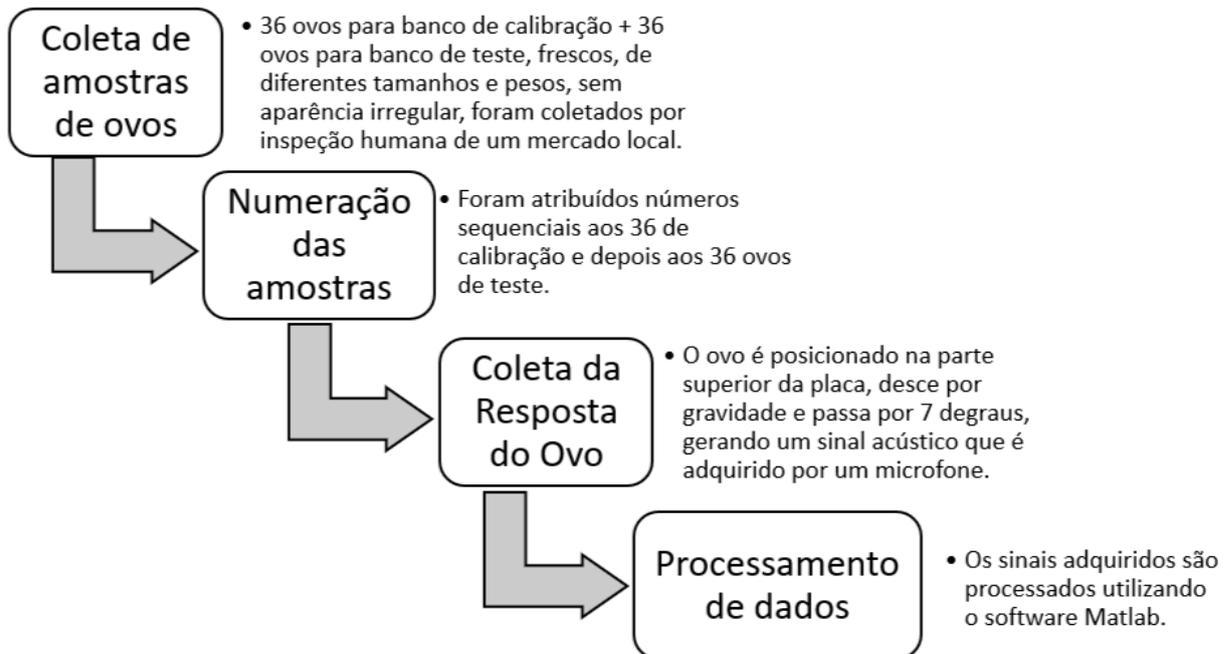


(b) Sistema de excitação

Fonte: Do Autor

O segundo protótipo utilizado foi baseado no trabalho apresentado por Jin, Xie e Ying (2015). A metodologia utilizada durante esta parte da análise pode ser verificada a partir da Figura 18, e a versão do protótipo construído pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 18 – Diagrama de Bloco da abordagem 2.



Fonte: Do Autor

Um sistema composto por uma estrutura mecânica em forma de degraus foi utilizado conforme apresentado na Figura 19a, seguindo o projeto proposto por Jin, Xie e

Ying (2015). A placa foi colocada em dois suportes macios e fixada com uma inclinação de 5° graus de modo a permitir que os ovos pudessem rolar de cima para baixo quando posicionados na parte superior. A placa possui largura de 100 mm e comprimento de 240 mm. Os degraus possuem 33 mm de largura e 2 mm de altura. Durante a descida, os degraus provocam pequenos impactos acústicos na casca do ovo, gerando sons que serão processados na sequência. Um microfone de eletreto com uma resposta em frequência definida no intervalo entre 20 Hz e 20 kHz foi instalado no centro da parte traseira da placa para coletar os sinais sonoros gerados durante a descida do ovo. A mesma plataforma de aquisição e processamento de sinais utilizada com o protótipo anterior foi reaproveitada para o processamento dos sinais adquiridos utilizando este protótipo.

Figura 19 – Imagem do Segundo Protótipo



(a) Segundo Protótipo.



(b) Vista de lado

Fonte: Do Autor

4.2 Amostra de Ovos

Um total de 72 ovos frescos de diferentes tamanhos e pesos, sem aparência irregular, foram coletados por inspeção humana em um mercado local, sendo, desses ovos, 12 de cor marrom. Os ovos foram levados ao laboratório para coleta de dados e submetidos a um controle visual individual, sendo que uma luz brilhante foi direcionada aos ovos, colocando a trinca em uma visibilidade melhor. Esse processo é chamado de ovoscopia e costuma

ser utilizado por pequenos produtores de ovos. Um exemplo desse tipo de sistema pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Setor de triagem



Fonte: Retirado de ASA (2018)

Trincas foram artificialmente provocadas com leves impactos mecânicos sendo 30 na região equatorial dos ovos, 3 no topo dos ovos e 3 no fundo dos ovos. A trinca provocada era normalmente invisível aos olhos humanos, todos os ovos trincados preservaram suas formas e nenhum conteúdo de ovo vazou. Todas as amostras de ovos brancos e marroms intactos ou trincados foram separados em um conjunto, denominado de conjunto de calibração, utilizado para construir um modelo para detecção.

Outros 36 ovos, sendo todos de cor branca, passaram pela mesma inspeção e procedimento do conjunto de calibração. Estes ovos foram separados em um conjunto, denominado de conjunto de teste.

Esses conjuntos foram utilizados para os dois protótipos do trabalho, assim podendo comparar as eficiências de cada um deles utilizando as mesmas amostras.

4.3 Análise de Sinais

A análise dos sinais adquiridos foi feita utilizando o software Matlab. Foram usadas informações de representação no tempo e na frequência para produzir modelos bem definidos, a fim de caracterizar as respostas obtidas ao analisar ovos bons e ovos trincados.

No primeiro protótipo utilizou-se a Transformada Discreta de Fourier para realizar a análise espectral dos sinais adquiridos.

A análise e interpretação são dadas através da função de resposta em frequência do sistema e energia do sinal adquirido. Um conjunto de ovos foi utilizado como referência para definir um limiar, que foi utilizado durante a análise das outras amostras.

No segundo protótipo os dados foram analisados no domínio do tempo para se avaliar a resposta do sistema na detecção de trincas. De acordo com Li et al. (2010), como a rigidez da casca diminuiu devido à existência de trinca, a energia de vibração do impacto da parte trincada do ovo passa a ser menor do que a da parte intacta. Isso fez

com que o sinal de impacto da parte trincada fosse mais rápido e com menor energia. Além disso, as áreas de sinal de impacto das peças intactas aumentaram gradualmente porque a força de impacto aumenta com o incremento da velocidade de rolagem.

Os métodos de detecção no domínio do tempo estão baseados no fato de que o sinal da parte trincada produz uma energia diferente da intacta. Dessa forma, o processo de análise é feito através do cálculo da energia do sinal em cada batida e da comparação com o limiar estabelecido no conjunto de calibração.

5 Resultados

Nesta etapa do trabalho são apresentados os resultados dos experimentos realizados em cenários reais de aplicação do sistema de detecção de trincas em ovos. Por meio destes experimentos buscou-se avaliar a eficácia dos sistemas propostos.

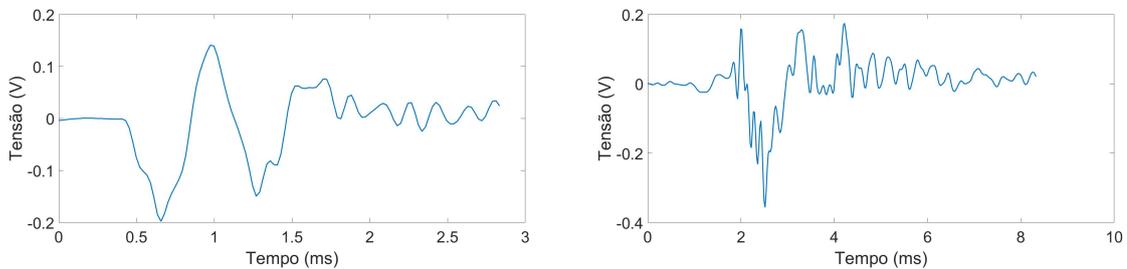
5.1 Análise dos espectros de frequência – Primeiro Protótipo

Esta parte do trabalho apresenta o desenvolvimento do sistema de detecção de trincas por ressonância acústica, com análise no domínio da frequência.

5.1.1 Banco de Calibração

Para o banco de calibração, os ovos intactos e os ovos com trincas foram excitados na região do equador, e os sinais acústicos gerados após a excitação mecânica foram adquiridos utilizando-se um microfone. A Figura 21 mostra as formas de ondas típica obtidas após a excitação de ovos brancos no domínio do tempo.

Figura 21 – Forma de onda do sinal adquirido pelo microfone.

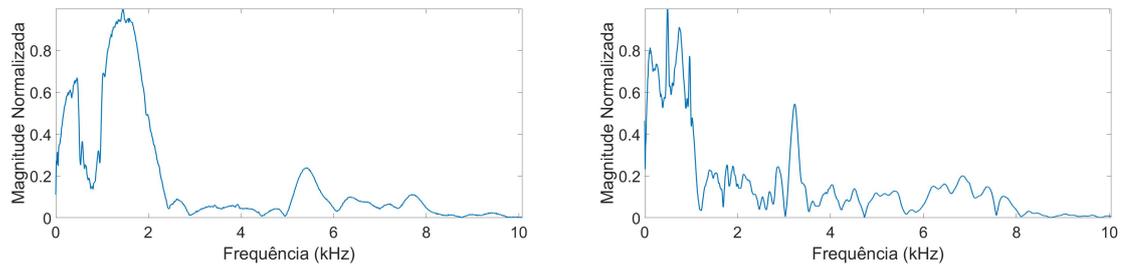


(a) Representação do ovo Branco intacto. (b) Representação do ovo Branco trincado.

Fonte: Do Autor

Uma pré-análise foi realizada e verificou-se que no domínio do tempo, não existiam informações determinantes para a classificação de ovos. Dessa forma, houve a necessidade de utilizar uma abordagem no domínio da frequência. Para isso, utilizou-se o software Matlab para calcular a Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal. A Figura 22 mostra a resposta em frequência de sinais típicos obtidos a partir da excitação de ovos brancos intactos e trincados. A magnitude dos sinais foi normalizada para facilitar a comparação.

Figura 22 – Sinais de resposta no domínio da Frequência de ovos brancos

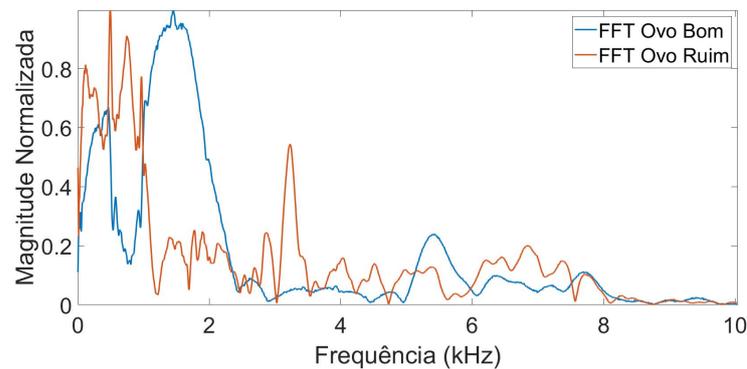


(a) Representação do ovo branco intacto. (b) Representação do ovo branco trincado.

Fonte: Do Autor

A Figura 23 mostra a sobreposição dos gráficos gerados na Figura 22. Verifica-se que no intervalo de frequência entre 2,5 kHz e 5,2 kHz, a magnitude do sinal referente ao ovo bom não ultrapassou o valor 0,1. Nessa mesma faixa, o ovo trincado apresentou um valor de magnitude mais elevado.

Figura 23 – Sobreposição dos gráficos dos ovos brancos gerados na Figura 22 no domínio da frequência

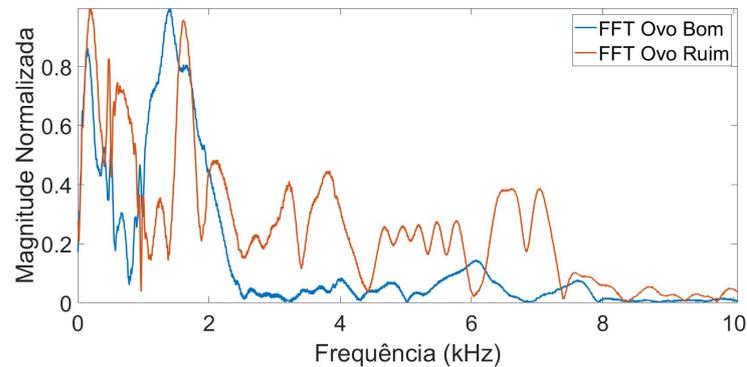


Fonte: Do Autor

A Figura 24 mostra a sobreposição dos gráficos, com os sinais no domínio da frequência de ovo marrom trincado e intacto. Observa-se que no ovo marrom bom, nas frequências entre 2,5 kHz e 5,2 kHz, a magnitude normalizada não passou de 0,1, enquanto no ovo trincado os valores de magnitude apresentados foram bem maiores. Para as amostras utilizadas durante a calibração, não houve diferença significativa entre os sinais gerados a partir de ovos com cores diferentes.

Os dados adquiridos durante o processo de calibração foram utilizados para definir um limiar de classificação.

Figura 24 – Sobreposição de gráficos ovos marrons no domínio da frequência



Fonte: Do Autor

Observou-se que ovos com uma casca intacta respondem por um padrão de frequência característico que é altamente repetitivo quando se provoca um impacto em diferentes locais da região equatorial, ao passo que ovos com trincas têm sinais heterogêneos que são difíceis de classificar. Os padrões desses espectros são dependentes da posição do ponto de excitação em relação à localização da trinca na casca.

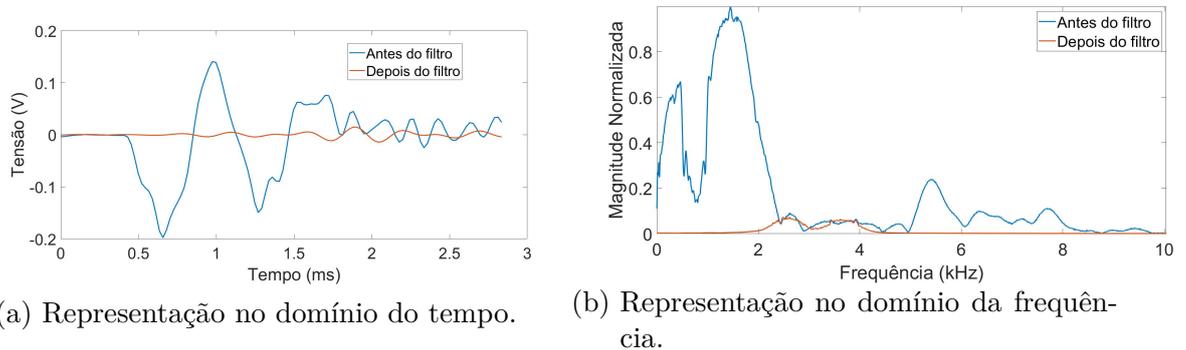
A partir da análise dos dados do banco de calibração foi utilizado uma faixa de frequência 2300 Hz até 4100 Hz.

5.1.2 Projeto Filtro

Após analisar os dados no banco de calibração, iniciou-se a etapa do projeto do filtro digital. Primeiramente, foi feita uma análise na fase dos sinais adquiridos, para verificar se seria possível obter alguma informação que pudesse ser utilizada na detecção de trincas. A análise mostrou a existência de sobreposição de fases, inviabilizando a classificação dos ovos. Como a fase não se mostrou relevante para a classificação dos ovos, optou-se por utilizar um filtro digital IIR elíptico.

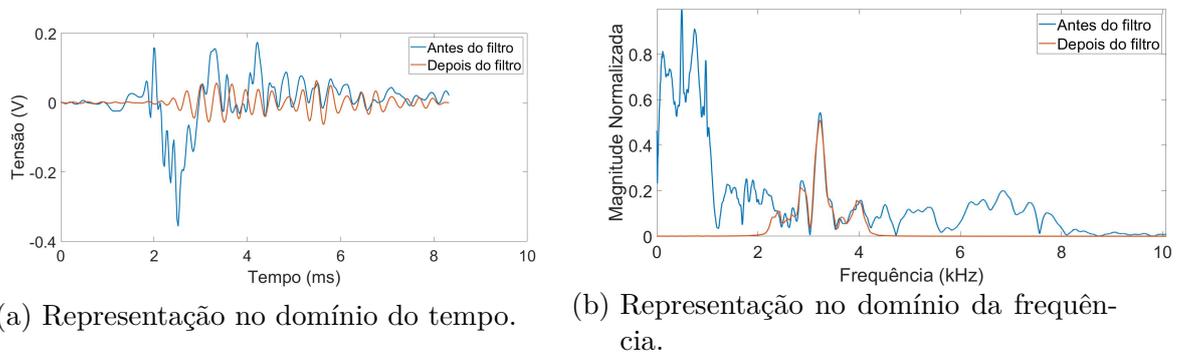
O filtro projetado é do tipo passa-faixas, com banda de passagem entre 2300 Hz até 4100 Hz, ganho unitário, ripple na faixa de passagem de 0,1dB e atenuação de -40dB na faixa de rejeição. Nas Figuras 25 e 26 apresenta-se os sinais no domínio do tempo e da frequência, mostrando uma comparação entre os sinais antes e após o processamento executado pelo filtro.

Figura 25 – Sobreposição dos gráficos antes e depois do filtro, ovo bom



Fonte: Do Autor

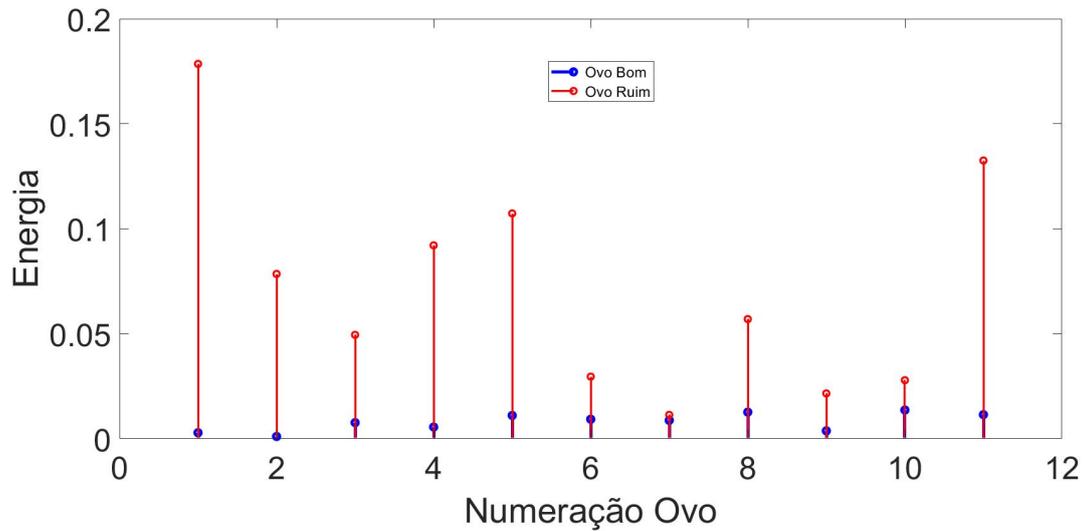
Figura 26 – Sobreposição dos gráficos antes e depois do filtro, ovo ruim



Fonte: Do Autor

Observa-se nos gráficos 25b e 26b a eficácia do filtro, deixando a passagem somente da faixa estabelecida entre 2300 Hz até 4100 Hz, e pelo gráfico 25a e 26a a redução da amplitude do sinal após a filtragem. Após isso foi realizado um cálculo de energia do sinal, buscando encontrar um limiar que pudesse ser utilizado para comparação. Na Figura 27 é mostrado um gráfico comparativo dos valores de energia de cada ovo.

Figura 27 – Comparação valores de energia

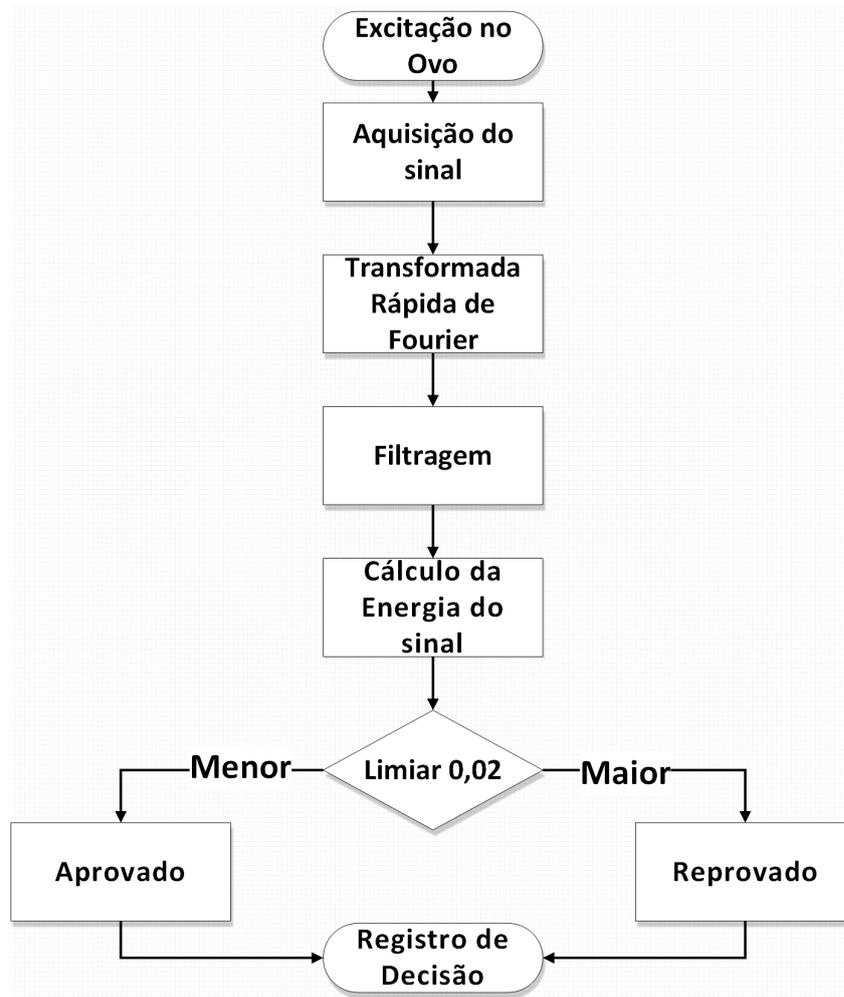


Fonte: Do Autor

Percebe-se que em alguns casos, os valores de energia de ovos ruins apresentaram valores próximos aos dos ovos bons. Isso ocorre pois a posição da trinca se encontrar em um local afastado do ponto de excitação mecânica, provavelmente na extremidade do ovo.

Feita a análise dos valores de energia de todos os sinais de ovos, foi estabelecido um limiar de energia com o valor de 0,02. Dessa forma, caso a energia calculada esteja acima do limiar, o ovo é classificado como trincado. Após essa definição, iniciou-se a análise dos ovos que compõe o banco de dados experimental. A Figura 28 apresenta um fluxograma com as etapas do processo.

Figura 28 – Fluxograma protótipo 1



Fonte: Do Autor

5.1.3 Banco de Teste

Foram realizados testes em ovos com trincas no equador, extremidade larga e extremidade ponta. Esses ovos foram impactados no equador, com 4 batidas equidistantes, como realizado nos estudos de Ketelaere, Coucke e Baerdemaeker (2000). Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Teste protótipo 1 em Ovos Bons

Teste em Ovos Bons				
Numeração Ovo	Batida (limite energia 0,0200)			
	1	2	3	4
1	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
2	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
3	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
4	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
5	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
6	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
7	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
8	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
9	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
10	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
11	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
12	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
13	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
14	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
15	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 2 – Teste protótipo 1 em Ovos Ruins

Teste em Ovos Ruins				
Numeração Ovo	Batida (limite energia 0,0200)			
Trinca Equador	1	2	3	4
1	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado
2	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
3	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
4	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
5	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
6	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado
7	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
8	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
9	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
10	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
11	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado
12	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
13	Aprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
14	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
15	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
Trinca Extremidade Ponta				
1	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado
2	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
3	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado
Trinca Extremidade Larga				
1	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado
2	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado
3	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Tabela 1 mostra que todos os ovos bons foram detectados, indicando que, conforme esperado, ovos intactos apresentam padrões de resposta ao impacto acústico semelhantes.

Já a Tabela 2 mostra que em todos os casos, pelo menos um indicativo de trinca foi detectado. Entretanto, fica claro que quando mais afastada a trinca estiver em relação ao ponto de excitação, mais difícil se torna a tarefa de detecção das trincas.

Verifica-se também que os resultados obtidos estão de acordo com o apresentado por Wang e Jiang (2005) e Ketelaere, Coucke e Baerdemaeker (2000).

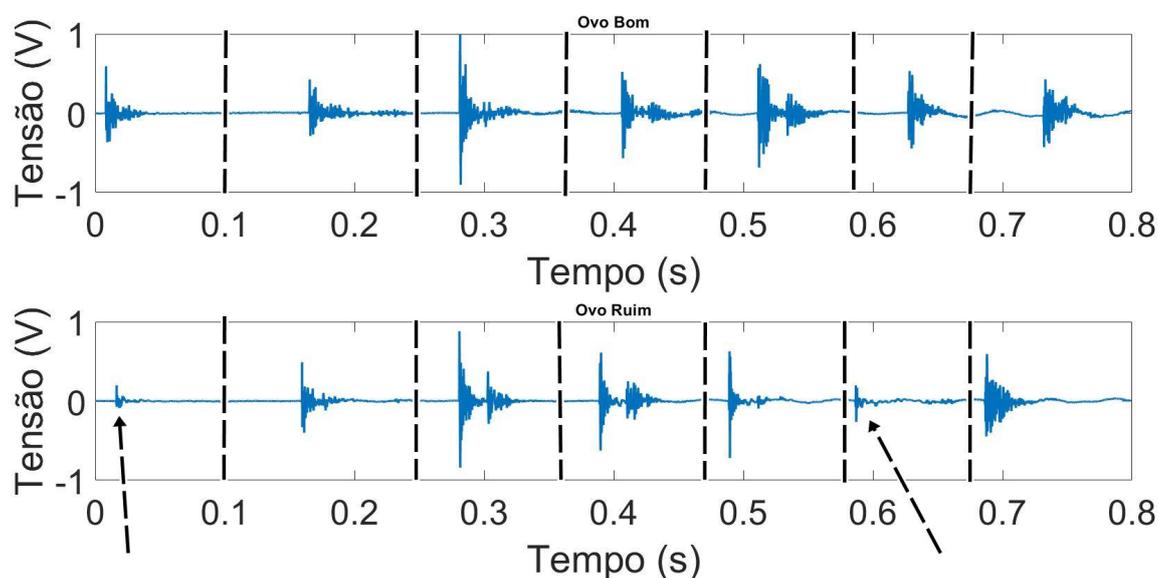
5.2 Análise no Domínio do Tempo – Segundo Protótipo

Nesta parte do trabalho apresenta-se o desenvolvimento do sistema de detecção de trincas por ressonância acústica, com análise no domínio do tempo. Valores de energia foram utilizados para classificar os ovos.

5.2.1 Banco de Calibração

Inicialmente o ovo foi mantido imóvel no topo da placa, sendo liberado manualmente antes do início da aquisição dos sinais. Assim que o ovo passava de um degrau para outro, um sinal sonoro de impacto era gerado e captado por um microfone. Depois de completar a descida, o ovo chegava a uma parede de espuma que o protegia de danos e evitava a geração de um novo som após o último degrau. A Figura 29 mostra sinais adquiridos após analisar um ovo intacto e um ovo trincado.

Figura 29 – Análise no domínio do tempo



Fonte: Do Autor

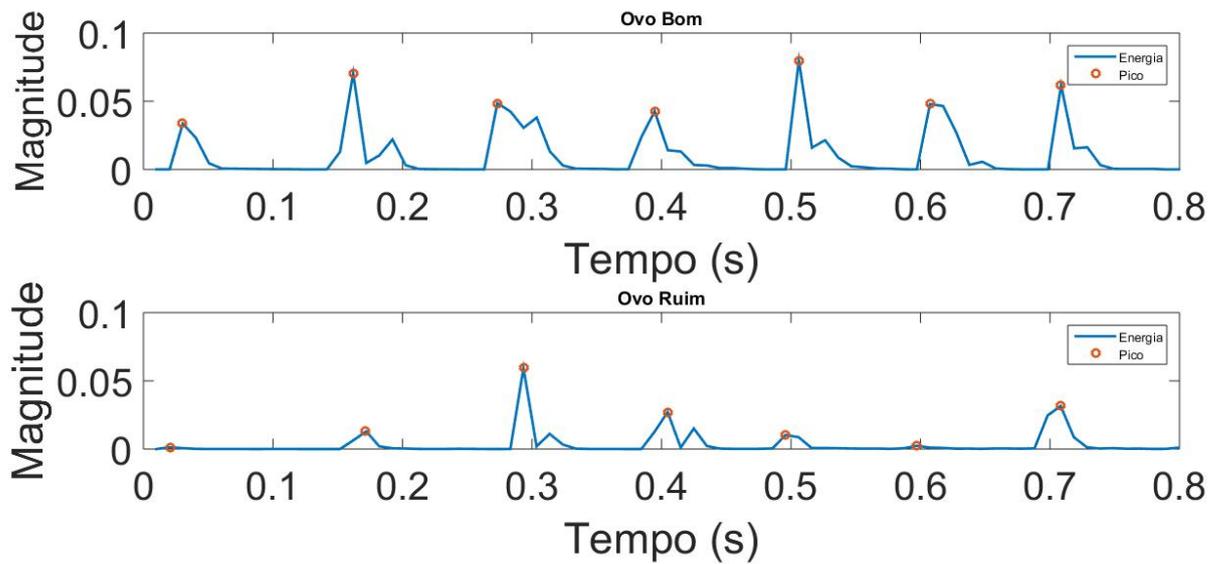
Observa-se na Figura 29 que para o sinal do ovo ruim, após o ovo passar pelos degraus 1 e 6, a energia gerada foi menor em comparação com um ovo bom passando pelos mesmos pontos.

Considerando que neste protótipo o ovo com a casca trincada obteve uma energia menor do que a energia gerada por um ovo intacto no domínio do tempo, foi verificado que uma análise temporal dos sinais seria suficiente para classificar os ovos, simplificando o processo de cálculo apresentado para o protótipo anterior.

5.2.2 Método de Detecção

Depois da verificação e detecção de um método para classificação dos ovos nesse protótipo, usando o software Matlab, foi executado uma função que realiza a soma de um grupo de pontos com o tamanho definido a partir do sinal de entrada, gerando um intervalo menor. Assim é calculado a energia desse agrupamento de pontos, elevando-os ao quadrado e realizando a somatória. O resultado desses cálculos é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Gráfico da energia do Sinal



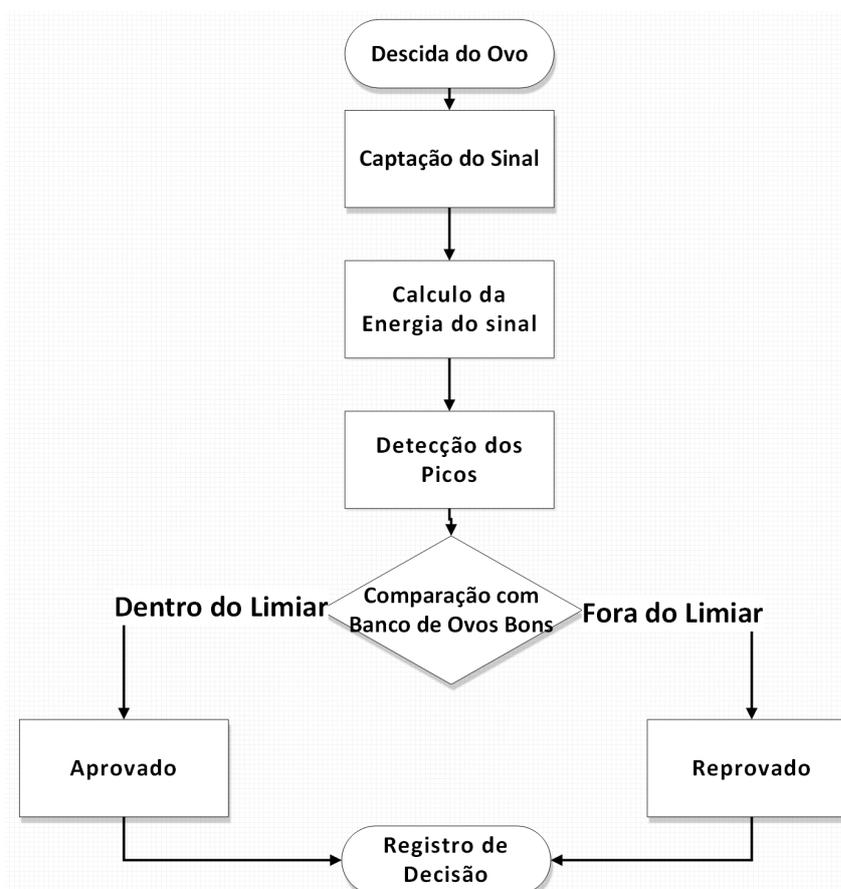
Fonte: Do Autor

A Figura 30 mostra que, após realizado o cálculo de energia, o ovo trincado apresenta uma energia menor. Para encontrar o valor máximo local da energia referente a excitação provocada por cada degrau, utilizou-se a função *findpeaks* do software Matlab que retorna como resultado o valor máximo local (pico) do sinal. Assim como no caso anterior, um conjunto de ovos foi utilizado para definir dois limiares: um inferior e um superior. Esses limiares foram obtidos através da análise de ovos bons e foram utilizados como referência para as análises posteriores.

5.2.3 Fluxograma

A Imagem 31 apresenta as etapas do processo em fluxograma.

Figura 31 – Fluxograma Protótipo 2



Fonte: Do Autor

5.2.4 Banco de Teste

A análise e classificação dos ovos foi realizada em ovos com trincas no equador, extremidade larga e extremidade ponta. Durante a análise, optou-se por analisar cada ovo por duas vezes, a fim de verificar se as respostas seriam diferentes. Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados dos testes realizados.

Tabela 3 – Teste protótipo 2 em Ovos Bons

Teste em Ovos Bons		
Numeração Ovo	Ensaio	
	1	2
1	Aprovado	Aprovado
2	Aprovado	Aprovado
3	Aprovado	Aprovado
4	Aprovado	Aprovado
5	Aprovado	Aprovado
6	Aprovado	Aprovado
7	Aprovado	Aprovado
8	Aprovado	Aprovado
9	Aprovado	Aprovado
10	Aprovado	Aprovado
11	Aprovado	Aprovado
12	Aprovado	Aprovado
13	Aprovado	Aprovado
14	Aprovado	Aprovado
15	Aprovado	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 4 – Teste protótipo 2 em Ovos Ruins

Teste em Ovos Ruim			
Numeração Ovo	Ensaio		
Trinca Equador	1	2	Resultado
1	Reprovado	Reprovado	Reprovado
2	Reprovado	Reprovado	Reprovado
3	Aprovado	Reprovado	Reprovado
4	Reprovado	Reprovado	Reprovado
5	Reprovado	Reprovado	Reprovado
6	Aprovado	Reprovado	Reprovado
7	Reprovado	Reprovado	Reprovado
8	Aprovado	Aprovado	Aprovado
9	Aprovado	Reprovado	Reprovado
10	Reprovado	Aprovado	Reprovado
11	Reprovado	Reprovado	Reprovado
12	Aprovado	Reprovado	Reprovado
13	Aprovado	Reprovado	Reprovado
14	Aprovado	Aprovado	Aprovado
15	Aprovado	Reprovado	Reprovado
Trinca Extremidade Ponta			
1	Reprovado	Reprovado	Reprovado
2	Reprovado	Aprovado	Reprovado
3	Reprovado	Reprovado	Reprovado
Trinca Extremidade Larga			
1	Reprovado	Reprovado	Reprovado
2	Reprovado	Reprovado	Reprovado
3	Reprovado	Aprovado	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os sinais acústicos dos ovos intactos e trincados foram produzidos pela rolagem dos ovos na placa e captados pelo microfone de eletreto. Com base nesses sinais acústicos e reprovando os ovos que apresentaram pelo menos uma análise negativa em duas execuções, o protótipo obteve 90% de detecção de trincas e 10% de falso negativo (quando o ovo está trincado e passa como bom), usando a base de dados de ovos bons coletados. Isso demonstra que este método de detecção de trinca é viável.

Com uma maior velocidade na detecção de trincas, notou-se também que os sinais de ovos intactos permanecem homogêneos, não apresentando grandes variações de intensidade, ao contrário dos ovos trincados, onde houve alteração tanto em baixa como em alta intensidade.

Observa-se também que os falsos negativos se encontraram em ovos com trincas no equador, o que indica que a posição da trinca não interferiu na precisão de detecção para essa abordagem.

6 Considerações Finais

O sistema desenvolvido neste trabalho baseou-se em técnicas de análise acústica, buscando substituir o serviço humano na tarefa de inspeção da casca de ovo, proporcionando um maior controle de qualidade.

Embora existam diversas metodologias para inspeção automática da casca, técnicas de análise acústica se destacam por serem de fácil construção mecânica, por apresentarem boa velocidade de análise, bom custo benefício e por constituírem um método de análise não destrutivo.

Com o sistema desenvolvido no primeiro protótipo, foram avaliadas diversas condições tais como controle da força de excitação da solenoide, distância entre ponteira da solenoide e ovo, energia para cada faixa de excitação, entre outras.

Assim após a excitação, os ovos intactos emitiram sinais sonoros com energia baixa nos espectros de frequência 2300 Hz a 4100 Hz, enquanto o ovo trincado obteve os valores de frequência com energias maiores nesses espectros.

A qualidade da detecção de trinca pode ser melhorada aumentando o número de medições, ou seja, reduzindo a distância entre o ponto de excitação e a trinca, enquanto os ovos intactos não revelam nenhuma mudança significativa ao aumentar o número de medições.

Com resultado total de 100% na identificação de ovos trincados e 100% nos ovos intactos, demonstra-se que existe potencial no desenvolvimento de um sistema de detecção de trincas em casca de ovo com análise pelo domínio da frequência. A principal vantagem desse método é a natureza não destrutiva da técnica.

Mais questões também podem ser estudadas, como o teste de outros materiais para o impacto, incorporação do microfone na ponta de impacto, para que a influência de ruídos externos seja reduzida, estudo e implementação de uma melhor circuito para a aquisição do sinal obtendo assim um melhor sincronismo no período do impacto com captação do sinal, a criação de um dispositivo de detecção contínua de trincas online, com os ovos transportados por rolos e girando-os, possuindo 12 ou mais excitações, posicionadas em todas as extremidades do ovo a fim de cobrir toda a superfície.

Na abordagem do protótipo 2, o estudo produziu um método de detecção de trincas em casca de ovo no domínio do tempo. O protótipo é mais simples de construir, menos custoso do que o método anterior e mais rápido. Os sinais acústicos produzidos pela descida dos ovos na placa-degrau geraram sinais diferentes com menos energia em ovos trincados. Já os sinais de ovos intactos apresentaram níveis equivalentes de energia em todos os dados coletados do banco de calibração, não contendo grandes variações de intensidade. Com base nos sinais acústicos, o protótipo obteve 90% de detecção de trincas e 10% de falsos negativos, utilizando como limiar um banco com as características dos

sinais de ovos bons. Outras pesquisas seriam necessárias para estabelecer o controle da velocidade ideal para o ovo à medida que ele desce na placa de degrau, além de outros métodos para o processamento dos dados.

Referências

- ABPA, A. R. *Associação Brasileira de Proteína Animal. 2017. 2017. 2017 Relatório Anual*. Disponível em: <http://abpabr.com.br/storage/files/3678c_final_abpa_relatorio_anual_2016_portugues_web_reduzido.pdf>. 1
- ASA. *Aviário Santo Antônio*. 2018. Disponível em: <<http://www.asaeggs.com.br>>. Acesso em: 03 abril 2018. 22
- GUTIÉRREZ, M. de los A. *México comemora Dia Mundial do Ovo como maior consumidor do mundo*. 2018. Disponível em: <<https://avicultura.info/pt-br/mexico-dia-mundial-do-ovo/>>. Acesso em: 03 julho 2018. 1
- HAYKIN, S. S.; VEEN, B. V. *Sinais e sistemas*. [S.l.]: Bookman, 2001. 17
- JIN, C.; XIE, L.; YING, Y. Eggshell crack detection based on the time-domain acoustic signal of rolling eggs on a step-plate. *Journal of Food Engineering*, v. 153, p. 53 – 62, 2015. ISSN 0260-8774. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877414005329>>. 7, 20, 21
- KETELAERE, B. D.; COUCKE, P.; BAERDEMAEKER, J. D. Eggshell crack detection based on acoustic resonance frequency analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 76, n. 2, p. 157 – 163, 2000. ISSN 0021-8634. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021863400905420>>. 5, 8, 9, 19, 29, 31
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares-2*. [S.l.]: Bookman, 2006. 12
- LAWRENCE, K. C. et al. Imaging system with modified-pressure chamber for crack detection in shell eggs. v. 2, p. 116–122, 06 2008. 3, 4
- LI, C.-w. et al. A novel non-destructive technology for inspecting eggshell cracks using impulsive response time. *Food science and technology research*, Japanese Society for Food Science and Technology, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2010. 22
- LU, W. et al. Micro-cracks detection of eggshells based on a magnetostrictive transducer. 2015. 6
- MITRA, S. K.; KUO, Y. *Digital signal processing: a computer-based approach*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2006. v. 2. 14
- OLIVEIRA, H. M. de; RAMOS, P. F. de S. C. Análise espectral de sinais: Uma visão de ensino voltada à engenharia. In: *XXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, COBENGE, 1995, Recife*, v. 1, p. 199 – 208, 1995. Disponível em: <http://www2.ee.ufpe.br/codec/cobenge_paulo.PDF>. 14
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. *Discrete-Time Signal Processing*. Pearson Education, 2011. ISBN 9780133002287. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=EaMuAAAAQBAJ>>. 12, 15

- PAN, L.-q. et al. Eggshell crack detection based on computer vision and acoustic response by means of back-propagation artificial neural network. v. 233, p. 457 – 463, 09 2011. 10, 11
- PASCOAL, L. A. F. et al. Qualidade de ovos comercializados em diferentes estabelecimentos na cidade de imperatriz-ma. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v. 9, n. 1, p. 150–157, 2008. 1
- PIRES, M. F. et al. Fatores que afetam a qualidade dos ovos de poedeiras comerciais. *Revista Eletrônica Nutri-Time*, v. 12, p. 4379–4385, 2015. 1
- PRIYADUMKOL, J.; KITTICHAIKARN, C.; THAINIMIT, S. Crack detection on unwashed eggs using image processing. *Journal of Food Engineering*, v. 209, p. 76 – 82, 2017. ISSN 0260-8774. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417301620>>. 5
- PROAKIS, J.; MANOLAKIS, D. *Digital Signal Processing: Pearson New International Edition*. Pearson Education Limited, 2013. ISBN 9781292038162. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=mDKpBwAAQBAJ>>. 12
- RODRIGUES, K. R. M.; ELISABETE, S. A. L. A. Atitudes de granjeiros, atacadistas, varejistas e consumidores em relação à qualidade sanitária do ovo de galinha in natura. *Revista de nutrição*, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2001. 1
- WANG, J.; JIANG, R. Eggshell crack detection by dynamic frequency analysis. *European Food Research and Technology*, Springer, v. 221, n. 1-2, p. 214–220, 2005. 7, 8, 31
- WEEKS, M. *Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets*. Infinity Science Press, 2007. (Electrical engineering series). ISBN 9780977858200. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=rLqQYPqa82YC>>. 15, 16



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Desenvolvimento de um sistema acústico para detecção de trincas em ovos**” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 17 de dezembro de 2018.

Assinatura manuscrita em azul da Alean dos Santos Lima.

Alean dos Santos Lima



ANEXO XI - DECLARAÇÃO DE CONFERÊNCIA DA VERSÃO FINAL

Declaro que conferi a versão final a ser entregue pelo aluno **Alean dos Santos Lima**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado **Desenvolvimento de um sistema acústico para detecção de trincas em ovos** quanto à conformidade nos seguintes itens:

1. A monografia corresponde a versão final, estando de acordo com as sugestões e correções sugeridas pela banca e seguindo as normas ABNT;
2. A versão final da monografia inclui a ata de defesa (ANEXO IV - apenas verso), a ficha catalográfica e o termo de responsabilidade (ANEXO X -) devidamente assinados.

João Monlevade, 17 de dezembro de 2018.

Marcelo Moreira Tiago
Professor Orientador