



HENRIQUE GERALDO GUIMARÃES SILVA

**SISTEMA DE MEDIÇÃO VOLUMÉTRICA EM FLUXO DE
GRÃOS DE CAFÉ**

LAVRAS - MG

2024

HENRIQUE GERALDO GUIMARÃES SILVA

SISTEMA DE MEDIÇÃO VOLUMÉTRICA EM FLUXO DE GRÃOS DE CAFÉ

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Danton Diego Ferreira
Orientador

Prof. DSc. Bruno Henrique Groenner Barbosa
Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior
Coorientador

LAVRAS - MG

2024

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Henrique Geraldo Guimarães

Sistema de Medição Volumétrica em Fluxo de Grãos de
Café / Henrique Geraldo Guimarães Silva. –2024.

88 p. : il.

Orientador(a): Danton Diego Ferreira.

Coorientador(a): Bruno Henrique Groenner Barbosa, Luiz
de Gonzaga Ferreira Júnior.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal
de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Café. 2. Medição Volumétrica. 3. Visão Computacional.
I. Ferreira, Danton Diego. II. Barbosa, Bruno Henrique
Groenner III. Júnior, Luiz de Gonzaga Ferreira. IV. Título.

HENRIQUE GERALDO GUIMARÃES SILVA

**SISTEMA DE MEDIÇÃO VOLUMÉTRICA EM FLUXO DE GRÃOS DE CAFÉ
WORK II - BIBLIOGRAPHIC RESEARCH**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

=

APROVADA em 27 de Fevereiro de 2023.

Prof. DSc. Danton Diego Ferreira	UFLA
Prof. DSc. Bruno Henrique Groenner Barbosa	UFLA
Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhaes	UFLA
Prof. DSc. Wilian Soares Lacerda	UFLA
Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior	UFLA
Prof. Dsc. Augusto Santiago Cerqueira	UFJF

Prof. DSc. Danton Diego Ferreira
Orientador

Prof. DSc. Bruno Henrique Groenner Barbosa
Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior
Co-Orientador

**LAVRAS - MG
2024**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares por todo apoio, em especial a minha irmã Wânia, pelo incentivo. Aos Professores, pela significativa contribuição para o meu crescimento profissional e acadêmico.

RESUMO

O café é um dos principais *commodities* mundiais, sendo o Brasil o maior produtor desta *commoditie*. A cadeia produtiva do café é caracterizada por uma sequência de etapas, iniciando-se pela produção na lavoura, colheita, secagem, beneficiamento, armazenamento, rebeneficiamento, torra e consumo. Todas as fases do processo produtivo são importantes para determinar a qualidade do produto final. A etapa de rebeneficiamento dos grãos de café é responsável por eliminar impurezas e grãos defeituosos, também a classificação dos grãos por tamanho, densidade e cor. Nesta fase, equipamentos específicos, fazem a limpeza dos grãos de café e sua classificação, conforme as características físicas dos grãos. Normalmente, o café é transportado entre os equipamentos de rebenefício de um armazém sem um controle de medição volumétrica, impossibilitando a estimativa do volume de grãos processados por cada equipamento. A importância da medição volumétrica do fluxo dos grãos também é verificada no processo de classificação, quando o café é dividido em lotes de acordo com suas características físicas. A quantidade de entrada, relacionada à medida de cada lote resultante do processo, possibilitaria ao especialista avaliar com precisão o volume necessário para a formação do *blend* desejado. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de soluções que permitam a medição volumétrica do fluxo de grãos de café durante o transporte do produto em armazéns de rebenefício. Os sensores identificados como viáveis foram adquiridos e uma estrutura para experimentos foi construída em laboratório para viabilizar o fluxo contínuo dos grãos de café, permitindo a aplicação dos sensores para experimentação. Os experimentos iniciais, indicaram o sensor célula de carga e visão computacional como mais viáveis para aplicação em ambiente de rebeneficiamento de grãos de café. Os experimentos realizados com o protótipo desenvolvido com sensor célula de carga para Arduino, atingiram um erro relativo médio de 4%. Diante dos resultados promissores, foi proposto um estudo futuro utilizando o sensor célula de carga industrial, por garantir maior precisão nas medições. Os trabalhos para o desenvolvimento de um sistema de medição volumétrica utilizando visão computacional resultaram no desenvolvimento de uma aplicação para processamento de imagens e cálculo do volume em centímetros cúbicos dos grãos de café transportados em esteira. Para desenvolvimento do protótipo, foi construída uma estrutura de experimentos em laboratório para simular uma esteira transportadora. Um módulo foi adaptado à estrutura para captação de imagens do volume transportado sob a projeção de um feixe de laser. Um *software* foi desenvolvido, utilizando uma técnica inovadora para cálculo do volume dos grãos por meio do processamento dos pixels da imagem captada, permitindo a medição do volume de grãos transportados pela esteira. Os experimentos com o protótipo de medição por visão computacional indicaram um erro relativo médio em torno de 3% nas medições com diferentes volumes de grãos em movimento. Conclui-se com este trabalho que as tecnologias estudadas possuem aplicabilidade para automatizar o processo de medição dos grãos de café transportados internamente em ambiente operacional, indicando baixo custo para desenvolvimento e eliminando a necessidade de uma grande estrutura para sua implantação.

Palavras-chave: Rebeneficiamento de Café. Medição Volumétrica de Grãos. Agricultura de Precisão. Indústria 4.0. Processamento de Imagens.

ABSTRACT

Coffee is one of the world's main commodities, with Brazil being the largest producer of this commodity. The coffee production chain is characterized by a sequence of stages, starting with production in farming, harvesting, drying, processing, storage, reprocessing, roasting and consumption. All phases of the production process are important in determining the quality of the final product. The stage of reprocessing the coffee beans is responsible for eliminating impurities and defective beans, as well as classifying the beans by size, density and color. At this stage, specific equipment cleans the coffee beans and classifies them, according to the physical characteristics of the beans. Normally, coffee is transported between reprocessing equipment in a warehouse without volumetric measurement control, making it impossible to estimate the volume of beans processed by equipment. The importance of volumetric measurement of the grain flow is also verified in the classification process, when the coffee is divided into batches according to their physical characteristics. The input quantity, related to the measurement of each batch resulting from the process, would enable the specialist to accurately assess the volume necessary to form the desired blend. In this context, this work aims to develop solutions that allow the volumetric measurement of the flow of coffee beans during the transport of the product in reprocessing warehouses. The sensors identified as viable were acquired and a structure for experiments was built in the laboratory to enable the continuous flow of coffee beans, allowing the application of the sensors for experimentation. Initial experiments indicated the load cell sensor and computer vision as more viable for application in a coffee bean reprocessing environment. The experiments carried out with the prototype developed with a load cell sensor for Arduino, achieved an average relative error of 4%. Given the promising results, a future study using the industrial load cell sensor was proposed, as it guarantees greater precision in measurements. The work to develop a volumetric measurement system using computer vision resulted in the development of an application for image processing and calculation of the volume in cubic centimeters of coffee beans transported on a conveyor belt. To develop the prototype, a laboratory experiment structure was built to simulate a conveyor belt. A module was adapted to the structure to capture images of the transported volume under the projection of a laser beam. Software was developed, using an innovative technique for calculating the volume of grains by processing the pixels of the captured image, allowing the measurement of the volume of grains transported by the belt. Experiments with the computer vision measurement prototype indicated an average relative error of around 3% in measurements with different volumes of moving grains. It is concluded from this work that the technologies studied have applicability to automate the process of measuring coffee beans transported internally in an operational environment, indicating low cost for development and eliminating the need for a large structure for its implementation.

Keywords: Coffee Processing. Volumetric Grain Measurement. Precision Agriculture. Industry 4.0. Image Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma operacional de unidade de rebeneficiamento de café.	20
Figura 2.2 – Visão geral do sistema de pesagem de fluxo contínuo	21
Figura 2.3 – Desenvolvimento das revoluções industriais e revoluções agrícolas.	23
Figura 2.4 – Representação esquemática de uma semeadora pneumática.	25
Figura 2.5 – Matriz de sensores piezoelétricos adaptados no cabeçote de distribuição. . .	26
Figura 2.6 – Princípio de digitalização.	28
Figura 2.7 – Sensores Células de Carga.	29
Figura 3.1 – Fluxograma com a sequência das etapas desenvolvidas para este estudo. . .	33
Figura 3.2 – Estrutura para experimentos em ambiente controlado.	35
Figura 3.3 – Estrutura em calha para simular esteira de transporte.	36
Figura 3.4 – Projeção da linha de laser na estrutura vazia.	36
Figura 3.5 – Projeção da linha de laser sobre o objeto de calibração.	37
Figura 3.6 – Estrutura do sensor piezoelétrico.	38
Figura 3.7 – Sistema de sensor piezoelétrico para medição de fluxo de grãos de café. . .	39
Figura 3.8 – Fluxo dos grãos sobre o sensor piezoelétrico.	39
Figura 3.9 – Montagem do sensor Velostat.	41
Figura 3.10 – Montagem experimental do sensor Velostat.	41
Figura 3.11 – Estrutura para experimentos com fluxo de grãos de café.	42
Figura 3.12 – Montagem do sensor Velostat.	43
Figura 3.13 – Estrutura de fenolite - Velostat.	43
Figura 3.14 – Circuito divisor de tensão.	44
Figura 3.15 – Sistema do sensor a laser.	45
Figura 3.16 – Objetos confeccionados para análise da precisão.	46
Figura 3.17 – Tubulação suspensa para transporte dos grãos de café até a mesa densimétrica	47
Figura 3.18 – Adaptação da Célula de Carga do Tipo Bastão 20kg.	49
Figura 3.19 – Adaptação da estrutura para experimentos com célula de carga.	49
Figura 3.20 – Estrutura da célula de carga adaptada para medição de grãos de café em fluxo contínuo.	50
Figura 3.21 – Fluxo contínuo de grãos de café sobre a célula de carga.	51
Figura 3.22 – Estrutura para experimentos com fluxo de grãos de café.	53
Figura 3.23 – Suporte para fixação da webcam na estrutura de experimentos.	53

Figura 3.24 – Suporte para fixação do emissor de linha de laser na estrutura de experimentos.	54
Figura 3.25 – Objeto posicionado na gaveta sob a linha de laser.	55
Figura 3.26 – Fluxo do Processo Realizado pelo Sistema de Medição.	56
Figura 3.27 – Régua com quadros pretos de 4 cm ² posicionada no interior da estrutura de experimentos.	57
Figura 3.28 – Quadrados da régua submetidos ao algoritmo para contagem dos pixel. . .	58
Figura 3.29 – Imagem captada pela câmera submetida ao sistema de divisão por região. .	59
Figura 3.30 – Imagem da posição da linha de laser sobre um objeto.	59
Figura 3.31 – Imagem da linha de laser sobre a esteira apresentada na tela para alinhamento da câmera	60
Figura 3.32 – Fluxo do algoritmo de alinhamento da câmera	62
Figura 3.33 – Imagem da extração da região de interesse (ROI).	63
Figura 3.34 – Representação do ponto onde é encontrado a medida da altura da esteira . .	64
Figura 3.35 – Imagem de uma parte da linha de laser ampliada para visualização da coluna e linhas que com pixels brancos da coluna.	65
Figura 3.36 – Representação gráfica da sobreposição da linha de laser para extração da área medida em pixels.	67
Figura 3.37 – Representação da altura da imagem da esteira em pixels.	67
Figura 3.38 – Representação gráfica da divisão da imagem em regiões.	68
Figura 3.39 – Fluxo do processo de cálculo da área do volume em cm ² de cada região do frame.	69
Figura 3.40 – Representação do registro dos frames em um prisma triangular em movimento.	70
Figura 3.41 – Tabela configuracoes do banco de dados para armazenamento dos parâmetros do sistema e para cálculo das medições.	74
Figura 3.42 – Tabela configurações do banco de dados para armazenamento dos parâmetros do sistema e para cálculo das medições.	76
Figura 4.1 – Tela com dados da medição apresentada pelo sistema de processamento de imagens.	78
Figura 4.2 – Volume de 2000 cm ³ de grãos de café.	79
Figura 4.3 – Sistema de medição em esteira transportadora fornecido pela empresa alemã <i>LASE Industrielle Lasertechnik GmbH</i>	81

Figura 4.4 – Sistema de medição em esteira transportadora fornecido pela empresa brasileira Marrari 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Reprodução da tabela do banco de dados <code>medicao_item</code> , onde são armazenados os dados de cada processo de medição.	72
Tabela 4.1 – Medição realizada com volume de 2000 cm ³	80
Tabela 4.2 – Medição realizada com volume de 4000 cm ³	80
Tabela 4.3 – Medição realizada com volume de 6000 cm ³	80
Tabela 4.4 – Custo dos materiais para desenvolvimento do protótipo apresentado neste trabalho	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.2	Justificativa	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	O Café	18
2.2	Qualidade do Café	19
2.3	Armazéns de Rebeneficiamento de Café: Otimizando a Qualidade	20
2.4	Indústria 4.0 e Agricultura 4.0	22
2.5	Indústria Alimentícia 4.0	23
2.6	Metrologia 4.0	24
2.7	Sistemas de Medição do Fluxo	24
2.7.1	Sensores de Impacto	24
2.7.2	Visão Computacional	26
2.7.3	Escaneamento a Laser	27
2.7.4	Medição por Efeito Doppler	28
2.7.5	Célula de Carga	29
2.8	Processamento de Imagens Digitais	29
2.8.1	Morfologia Matemática da Imagem	30
2.8.2	Filtros Espaciais	30
2.8.3	Detecção de Bordas	30
2.8.4	Região de Interesse (ROI)	30
2.9	OpenCV em Python para Processamento de Imagens Digitais	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Visão Geral	32
3.2	Realização dos experimentos	33
3.2.1	Construção das estruturas de experimentos iniciais para validação dos sensores selecionados na primeira fase da pesquisa	34
3.2.2	Trabalhos iniciados no contexto dessa dissertação referente à primeira fase da pesquisa	37
3.2.2.1	Sensor Piezoelétrico	37
3.2.2.2	Sensor Velostat	40

3.2.2.3	Sensor Laser	44
3.2.2.4	Sensor Micro-ondas por Efeito Doppler	45
3.2.2.5	Visão Computacional	46
3.2.2.6	Célula de Carga	46
3.2.3	Conclusão da primeira fase da pesquisa	51
3.3	Realização dos experimentos de medição volumétrica por meio de visão computacional referente à segunda fase da pesquisa	51
3.3.1	Sistema de visão computacional para medição volumétrica em esteira transportadora	51
3.3.2	Estrutura de experimentos	52
3.3.3	Desenvolvimento do software para processamento de imagens e cálculo de medição	55
3.3.3.1	Calibração da distorção da imagem	56
3.3.3.2	Alinhamento da Câmera	60
3.3.3.3	Seleção da região de interesse	62
3.3.3.4	Cálculo da área em cm^2	63
3.3.3.5	Cálculo do volume em cm^3	70
3.3.3.6	Armazenamento de Dados	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1	Resultados experimentais referentes à segunda fase da pesquisa	77
4.1.1	Sistema de visão computacional para medição volumétrica em esteira transportadora	77
5	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

O café é um dos primeiros produtos cultivados no Brasil em escala comercial e tem exercido um papel importante para a economia nacional com a geração de empregos e renda desde o século XVIII. A produção brasileira de café está distribuída em nove estados, como será oportunamente analisado. De acordo com dados do acompanhamento da safra brasileira de café, a previsão é que a colheita do ano de 2023 tenha início no mês de março e sua conclusão ocorra em novembro. O pico da colheita acontece entre os meses de junho e julho do ano de 2023, quanto está previsto colher cerca de 32 milhões de sacas de café de 60 kg no bimestre (CONAB, 2023).

Segundo Ferrão *et al.* (2017), o Brasil destaca-se como maior produtor e exportador de café mundial e detém o reconhecimento internacional pela sustentabilidade no manejo de sua produção. Para atender um mercado cada vez mais exigente e gerar maior rentabilidade ao produtor, agregando valor ao produto, é imprescindível fornecer ao mercado um produto de qualidade.

O processo de rebeneficiamento de grãos de café destaca-se como a etapa responsável por aprimorar a qualidade do café. Esta etapa consiste na utilização de um maquinário mecanizado para limpar o lote de grãos de café, eliminando impurezas e grãos defeituosos, e na sequência do processo, é utilizado maquinário classificador por tamanho, responsável por classificar os lotes de grãos de café e dividí-los em lotes com padrões aprimorados segundo as dimensões e formatos. O equipamento de classificação densimétrica separa os grãos conforme a massa específica e o classificador por imagem eletrônica separa os grãos pela cor. O processo de rebeneficiamento de grãos de café visa obter lotes homogêneos que atendam aos padrões de comercialização e/ou industrialização (SILVA; MORELI; JOAQUIM, 2015).

Segundo Silva, Moreli e Joaquim (2015), durante o processo de limpeza do lote para a retirada de impurezas acontece a diminuição do volume do café em relação à quantidade inicial, e, dependendo do volume de impurezas presentes no lote, essa diminuição poderá ser significativa. Neste ponto, observa-se a necessidade de haver um sistema que permita mensurar a quantidade de entrada e a quantidade de saída de grãos do equipamento de limpeza, possibilitando calcular o volume de impurezas retiradas do lote.

O sistema utilizado para aferição dos lotes de grãos de café normalmente requer uma balança de fluxo contínuo. Esta balança necessita de uma estrutura complexa para sua implantação, composta por elevadores de grãos, grande espaço físico para sua composição, inviabili-

zando a medição do volume de grãos junto ao maquinário. Esta balança, também requer um operador para monitorar seu funcionamento, dificultando seu acompanhamento em diversos pontos da unidade operacional de rebeneficiamento de grãos de café. Devido à complexidade para implantação, atualmente o sistema de medição por meio da balança de fluxo contínuo só é aplicada na recepção da unidade operacional de rebeneficiamento, e na sua expedição.

Outro fator importante é a etapa de classificação dos grãos de café, em que o volume de grãos café é dividido em lotes menores de acordo com suas características físicas. A medição da quantidade de entrada e da quantidade resultante do processo de classificação possibilita ao especialista avaliar com precisão o volume em cada lote necessário para a formação do *blend* desejado.

Buscando desenvolver um sistema de medição volumétrica em fluxo de grãos café, este trabalho propõe a captação de sinais através de sensores com a capacidade de aferir eletronicamente o volume de grãos de café na entrada e o volume resultante do processamento realizado por cada máquina.

A inclusão de tecnologias de sensoriamento em processos mecanizados segue uma tendência estabelecida iniciada na Terceira Revolução Industrial, e em constante evolução na Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Este paradigma tecnológico aplicado ao processo industrial propõe a aquisição de dados, coletados por sensores, com objetivo de extrair informações relevantes, que permitam estabelecer estratégias para aprimorar o funcionamento do maquinário, possibilitando maior controle e eficiência nos processos industriais (SOTT *et al.*, 2020a; FAPANNI *et al.*, 2020).

1.1 Objetivos

Este trabalho, seguindo os preceitos da Indústria 4.0, objetiva desenvolver sistemas de sensoriamento eletrônico para medição volumétrica do fluxo de grãos de café em estruturas de transporte de grãos utilizadas em armazéns de rebeneficiamento de grãos de café, assim como os sistemas de transporte utilizados para conduzir os grãos de café até os silos de armazenamento.

Os objetivos específicos são:

1. Estudar os principais sensores disponíveis para medição de fluxo de grãos;
2. Estudar o custo-benefício dos sensores encontrados;

3. Propor sistemas de medição de fluxo de grãos a partir dos sensores encontrados e classificados como viáveis;
4. Montar um experimento para realizar os testes com os sensores;
5. Comparar os resultados alcançados com cada sensor implementado em experimento.

1.2 Justificativa

Atualmente, a medição do volume de grãos de café em unidade operacional de rebeneficiamento é efetuada por meio de uma balança de fluxo contínuo ou pela balança de pesagem dos grãos de café armazenados em grandes embalagens denominadas *bags*. Estes sistemas de pesagem demandam um grande espaço para acondicionar sua estrutura. Também, é necessário estruturar meios para transportar os grãos de café até o sistema de pesagem. Além do alto custo e demanda de grande espaço para comportar sua estrutura, é necessário que um operador esteja disponível para manusear o equipamento. Por este motivo, na maioria das vezes, este sistema de pesagem está localizado apenas na recepção e na expedição da unidade operacional de beneficiamento de grãos de café, devido à inviabilidade de sua instalação em outros setores para a pesagem dos grãos de café em meio ao processo de rebeneficiamento.

Desse modo, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de medição volumétrica para fluxo de grãos a fim de ser utilizado entre os maquinários existentes nas unidades operacionais de rebenefício do café. Isso tornaria o processamento de grãos de café mais automático e eficiente em sistemas de rebeneficiamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os estudos realizados para a construção de um nivelamento conceitual sobre os principais aspectos relacionados ao café e as tecnologias emergentes que subsidiam a Indústria 4.0 e a Agricultura 4.0. Por meio deste estudo, pretende-se, formar a base de conhecimento necessária ao desenvolvimento dos artefatos tecnológicos propostos neste trabalho.

2.1 O Café

Originário do norte da África, o café tem seu primeiro registro manuscrito sobre consumo datado do ano de 575, ainda sendo apreciado de forma natural pelos etíopes, conquistando popularidade devido às suas propriedades estimulantes. Em meados do século XIV iniciou-se o processo de torrefação e o café foi se popularizando. O aprimoramento de seu cultivo e novas formas de infusão, levaram o café a se estabelecer como uma das bebidas mais consumidas do mundo (MARTINS, 2017).

O café foi introduzido no Brasil pelo Sargento-Mor Francisco de Melo Palheta, no ano de 1727, a pedido do governador do Maranhão e Grão-Pará, foi trazido da Guiana Francesa, onde já era cultivado desde 1719. Neste período, o café já era explorado comercialmente por diversos países e Portugal incumbiu Francisco de Melo Palheta de distribuir mudas e sementes de café aos membros do Senado para especulação comercial, dando início ao cultivo sistemático no Brasil (MARTINS, 2017).

No decorrer dos anos, a cultura do café se desenvolveu, dando ao Brasil o título de maior produtor e exportador de café mundial (MEDEIROS; RODRIGUES, 2017). A projeção de produção para o ano de 2023 distribuída entre os estados coloca o estado de Minas Gerais como maior produtor com um total de 27.491,9 mil sacas, seguido pelo Espírito Santo com 14.553 mil sacas, São Paulo com 4.723 mil sacas, Bahia com 3.624 mil sacas, Rondônia com 2.943,5 mil sacas. O café também vem se desenvolvendo em outros estados, como: Paraná, Rio de Janeiro, Goiás e Mato Grosso, estimando-se um volume total de produção para o ano de 2023 de 1457 mil sacas de 60 kg de café beneficiadas (CONAB, 2023).

Ao analisar o grande volume de produção e sua divisão entre os estados brasileiros é possível contrastar com o que é demonstrado por Ferrão *et al.* (2017), em que se destaca a distribuição do cultivo em cerca de 287 mil propriedades rurais em sua maioria de micro e pequenos agricultores, respondendo por 8 milhões de postos de trabalhos diretos e indiretos.

Observa-se neste contexto a importância da cafeicultura para geração de emprego e renda a uma parcela considerável da população e sua contribuição para o Brasil como um dos principais produtos de exportação.

2.2 Qualidade do Café

O café de qualidade, também chamado café diferenciado é aquele que possui qualidade superior e certificação de práticas sustentáveis de produção (CECAFE, 2020). Um dos fatores que garantem a rentabilidade ao produtor é a qualidade do café produzido.

Para atender aos parâmetros de qualidade exigidos pelo mercado, o café deverá receber a certificação de qualidade. Isso implica atender a um rigoroso critério de classificação regido pelo Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade para a Classificação do Grão de Café Beneficiado, conforme estabelecido pela Instrução Normativa nº 8, de 11/06/2003, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). O objetivo dessa normativa é definir as características de identidade e qualidade para a classificação do café beneficiado e rebeneficiado (BORÉM, 2007).

O preparo do café para se tornar um produto apropriado para o consumo inicia-se com a colheita dos frutos em grãos. Estes grãos de café são submetidos a diferentes etapas de processamento para aprimorar sua qualidade. Estas etapas são divididas em dois grupos, denominadas: beneficiamento e rebeneficiamento.

O beneficiamento dos grãos de café é o processo realizado logo após a colheita, onde onde toda a casca que envolve o grão de café é retirada (casca externa que envolve o fruto e casca interna que envolve as sementes denominadas aqui de grãos). Após este processo os grãos de café passam a ser conhecidos no comércio como café beneficiado grão cru, ou seja, é o café seco ao ponto de ser armazenado sem casca, porém não está apto ao consumo pois está cru e ainda não passou pelo processo de torra. O processo de beneficiamento geralmente é feito nas propriedades rurais, onde o produtor utiliza-se de um maquinário próprio ou contrata caminhão ambulante com o maquinário necessário para realização do benefício. Após este primeiro processo de beneficiamento, os grãos de café são enviados para unidades armazenadoras como cooperativas. Nessas unidades armazenadoras é realizado a segunda etapa do processamento dos grãos de café, denominada rebeneficiamento. No rebeneficiamento os grãos de café são submetidos a uma série de processos, com objetivo de retirar impurezas leves e pesadas, sepa-

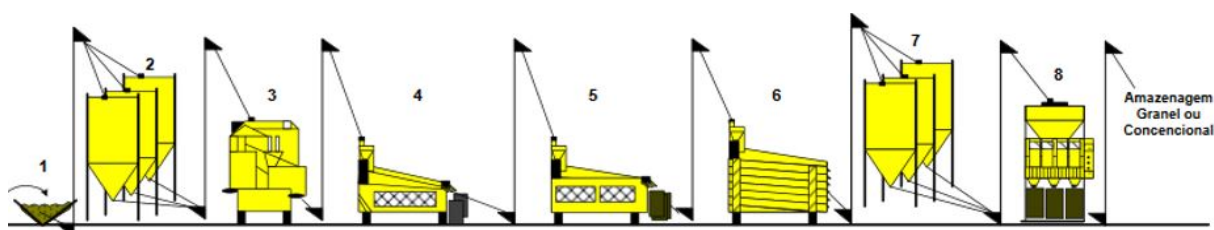
rar os grãos pela densidade, classificar por tamanho e separar os grãos íntegros dos grãos com defeitos físicos.

2.3 Armazéns de Rebeneficiamento de Café: Otimizando a Qualidade

Os armazéns de rebeneficiamento de café representam uma evolução no processo, focando na otimização da qualidade dos grãos de café. Esses centros especializados incorporam tecnologias avançadas, como sistemas de controle de umidade e temperatura para, para garantir condições ideais de armazenamento (GOMEZ; TORRES, 2021). Isso contribui significativamente para a preservação dos atributos sensoriais do café.

A operação de rebeneficiamento dos grãos de café tem a finalidade de aprimorar a qualidade do produto final. Esta etapa do processamento possibilita efetuar uma rigorosa limpeza nos lotes de grãos de café e efetuar combinações planejadas de diversos padrões de grãos de café para criar um resultado com as características exigidas por cada mercado. Segundo Silva, Moreli e Joaquim (2015), esta operação consiste em limpar e dividir os lotes de grãos de café descascados em outros lotes separados por padrões aprimorados segundo as dimensões, formatos, massa específica e cor, para obter frações homogêneas que atendam aos padrões de comercialização e/ou industrialização. Nesta operação de rebeneficiamento é utilizado um conjunto de maquinário mecanizado constituindo um processo de rebeneficiamento faseado, conforme descrito na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Fluxograma operacional de unidade de rebeneficiamento de café.



Legenda: 1 -Moega; 2 -Tulha café descascado; 3 -Máquina de limpeza; 4 -Catador de pedras; 5 -Mesa densimétrica; 6 -Classificadora por peneiras; 7-Tulhas café classificados; 8 -Classificadora por imagem

Fonte: (SILVA; MORELI; JOAQUIM, 2015)

Durante o processo de retirada de impurezas acontece a diminuição do volume dos grãos de café em relação ao volume inicial, e, dependendo da quantidade de impurezas presentes no lote de grãos de café inicial, essa redução poderá ser significativa. Neste ponto, é importante haver um sistema que permita mensurar o volume de entrada e saída de grãos do equipamento de limpeza, possibilitando o cálculo da quantidade de impurezas retiradas do lote. Posteriormente,

estes lotes serão agrupados em medidas específicas por um especialista, para a elaboração de *blends* que atendam aos padrões de comercialização e industrialização.

O funcionamento do maquinário utilizado no processo de limpeza e classificação, com indicação numérica de 3 a 6 na Figura 2.1, utiliza um sistema mecanizado de peneiras vibratórias. O transporte dos grãos de uma máquina a outra é realizado por um sistema de elevadores, esteiras transportadoras e tubulações. A medição mássica dos grãos de café é efetuada por uma balança de fluxo contínuo. A balança de fluxo contínuo e a estrutura necessária para sua implantação é apresentada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Visão geral do sistema de pesagem de fluxo contínuo



Fonte: O autor (2021)

Com a medição volumétrica em cada etapa do rebeneficiamento é possível efetuar uma análise precisa do desempenho de cada máquina envolvida no processo, permitindo a coleta de informações para elaborar estratégias de ajustes do maquinário, além de fornecer informações sobre o volume processado para os operadores e especialistas.

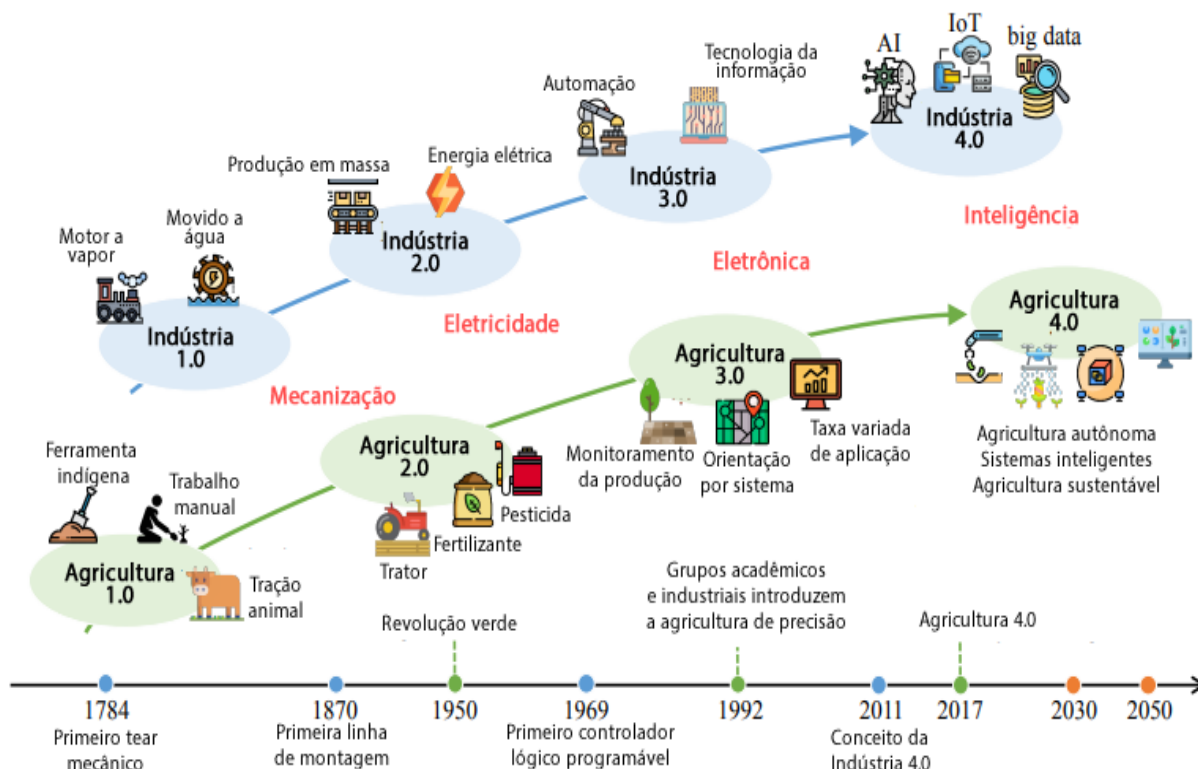
2.4 Indústria 4.0 e Agricultura 4.0

A inclusão de tecnologias de sensoriamento em processos mecanizados, iniciada na Terceira Revolução Industrial, segue uma tendência evolutiva, estabelecendo-se na Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Uma das propostas deste paradigma aplicado ao processo industrial, está relacionada a aquisição de dados, coletados por sensores, com o objetivo de extrair informações relevantes, que permitem estabelecer estratégias para aprimorar o funcionamento do maquinário, possibilitando maior controle e eficiência nos processos industriais (SOTT *et al.*, 2020a; FAPANNI *et al.*, 2020).

Segundo Aceto, Persico e Pescapé (2019), a partir do início dos anos 70, os avanços da tecnologia da informação atingiram o setor industrial, causando grande impacto na automatização dos processos, viabilizando a qualidade e aumento na produtividade. Em novembro de 2011, o termo Indústria 4.0 surgiu pela primeira vez em um artigo do governo alemão, definindo sua estratégia para promover adequadamente um conjunto de tecnologias aplicadas ao desenvolvimento industrial. Em um conceito amplo, a Indústria 4.0 propõe a integração de processos inteligentes, capazes de interagir entre si, de forma autônoma, para atingir um objetivo.

Os avanços tecnológicos alcançados pela indústria tradicional produziram seu reflexo na agricultura. Em relação ao passo revolucionário da indústria, observou-se no setor agrícola inovações tecnológicas em toda cadeia produtiva, viabilizando maior eficiência na produtividade de forma sustentável. Tais avanços subsidiaram o surgimento da agricultura de precisão, caracterizada por processos de monitoramento da produção, controle, sistemas de variação e orientação agrícola, potencializando a eficiência dos processos produtivos. Tecnologias emergentes, como: *Internet of Things* (IoT), robótica, *Big Data*, Inteligência Artificial (AI) e tecnologia de *blockchain*, direcionam a quarta revolução agrícola, alinhada aos preceitos de sustentabilidade e produtividade (LIU *et al.*, 2021). A relação entre a revolução industrial e a revolução agrícola é apresentada na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Desenvolvimento das revoluções industriais e revoluções agrícolas.



Adaptado. Fonte: (LIU *et al.*, 2021)

2.5 Indústria Alimentícia 4.0

É possível afirmar que uma das grandes contribuições do conceito da Indústria 4.0 aplicado ao setor alimentício está relacionada ao aprimoramento dos processos de manufatura para melhoramento da qualidade dos produtos resultantes. Em um mercado consumidor cada vez mais exigente, consciente e informado, é necessário estar alinhado às inovações para se manter competitivo. Embora seja um grande desafio utilizar todas as tecnologias que englobam a Indústria 4.0, adaptações e utilização parcial já produzem bons resultados, a exemplo da visão computacional utilizada na inspeção de qualidade e sistemas de controle que minimizam desperdícios e viabilizam uma gestão sustentável da cadeia de abastecimento alimentar (HASNAN; YUSOFF, 2018; OJO *et al.*, 2018).

O estudo realizado por Sott *et al.* (2020b), analisa as tendências da Indústria 4.0 e Agricultura 4.0 aplicadas ao setor cafeeiro. A pesquisa identifica, sobretudo, a mitigação dos impactos ambientais facultados pelas tecnologias emergentes como algoritmos de Machine Learning para gerenciamento de água e automação de seleção de grãos, sistemas complexos para identi-

ficação e monitoramento de pragas e doenças e inteligência artificial para análise de solo. Estes recursos permitem a elaboração de estratégias de produção agrícola com relevante contribuição para uma produção sustentável.

2.6 Metrologia 4.0

Sistemas de medição são de grande importância para a possibilitando avaliar diferentes parâmetros ao longo do processo produtivo e validar especificações de qualidade. A Indústria 4.0 introduziu no mercado uma grande variedade de sensores que possibilitam a medição eletrônica integrada ao controle de processos fornecendo novos padrões de referência para atender aos requisitos da Metrologia 4.0 (BENITEZ *et al.*, 2019).

Segundo Kuster (2020), os avanços tecnológicos aplicados aos processos de medição geram um desafio relacionado à confiabilidade dos dados. Tecnologias IoT, estabelecem novas formas de comunicação para disseminação de dados, necessitando de maior controle para validação e rastreabilidade dos dados de medição. Para garantir o sucesso no desenvolvimento de dispositivos IoT que fazem medições é imprescindível estabelecer um rigoroso sistema de controle de qualidade dos dados e calibração dos sistemas de medição. Neste contexto, introduzir ações de validação durante todas as etapas do processo de medição podem determinar a qualidade dos dados, reduzindo incertezas nos processos de recuperação, armazenamento e processamento dos dados (D'EMILIA; GASPARI, 2018).

2.7 Sistemas de Medição do Fluxo

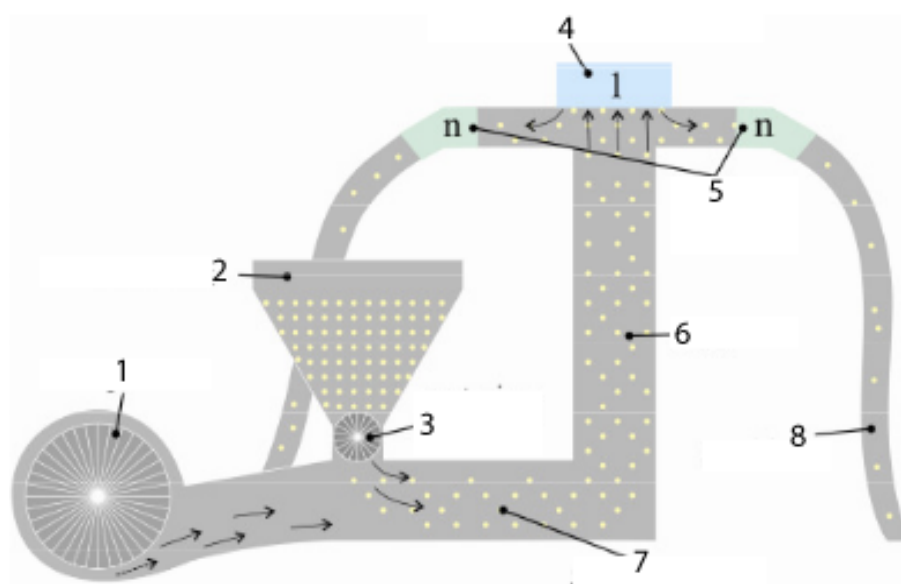
Para implantar a medição volumétrica do fluxo de grãos em unidade de rebeneficiamento de grãos de café, foi desenvolvido um estudo sobre tecnologias de sensoriamento aplicadas à medição de fluxo de materiais. As tecnologias identificadas com potencial para aplicação na medição volumétrica do fluxo de grãos de café são apresentadas nesta seção.

2.7.1 Sensores de Impacto

Um fator importante na agricultura de precisão está relacionado ao controle do plantio. A distribuição de sementes na dosagem correta resulta em plantações homogêneas com maior rendimento. No trabalho de Hoberge *et al.* (2011), uma matriz de sensores piezoelétricos foi desenvolvida para efetuar a contagem de grãos em uma semeadora. Conforme a cultura, os

grãos variam de tamanho, alterando o processo de distribuição de sementes na plantadeira. Semeadoras pneumáticas possuem um recipiente para armazenamento das sementes com uma unidade de dosagem e um soprador pneumático. As sementes são conduzidas por corrente de ar e guiadas até a cabeça de distribuição onde são conduzidas para as mangueiras de saída. Neste processo, o dosador é calibrado manualmente e a sua correta distribuição no solo, em diferentes áreas de plantio, reflete na precisão alcançada. A representação esquemática de uma semeadora pneumática é apresentada na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Representação esquemática de uma semeadora pneumática.



Legenda: 1 - Compressor; 2 - Tanque de sementes; 3 - Dosador; 4 - Cabeçote de distribuição com sensor; 5 - Sensor de mangueira; 6 - Riser; 7- Grãos de sementes; 8 - Mangueira de sementes
Adaptada. Fonte: (HOBERGE *et al.*, 2011)

Para se obter a verificação do fluxo de sementes em tempo real para ajuste do dosador, Hoberge *et al.* (2011), desenvolveram uma matriz de sensores piezoelétricos adaptada ao cabeçote de distribuição, mostrado na Figura: 2.5.

Combinado com a matriz de sensores piezoelétricos, foram implantados sensores individuais na entrada de cada mangueira de sementes. Os sinais captados são combinados eletronicamente e o resultado do processamento é disponibilizado para o operador. Os sensores adaptados nas mangueiras também atuam indicando algum problema na vazão dos grãos.

Os testes foram realizados com diversas categorias de grãos, como: milho, ervilha, trigo, cevada, aveia, entre outros, apresentando boa precisão, e, devido à sua robustez, mostrou-se eficiente, mesmo em ambientes hostis. A exemplo das sementes de trigo, a matriz de sensores piezoelétricos efetuou a contagem de 20 mil grãos por segundo com uma precisão de 98%.

Figura 2.5 – Matriz de sensores piezoelétricos adaptados no cabeçote de distribuição.



Fonte: (HOBERGE *et al.*, 2011)

Em seu estudo, Zhan e Jing (2011) utilizou uma estrutura composta por um filme piezoelétrico de fluoreto de polivinilideno (PVDF) para detectar perdas de grãos em colheitadeiras. Para estabelecer a captação do sinal desejado e eliminar a interferência da vibração da colheitadeira, foi projetado um filtro passa-banda ativo constituído por filtro passa-alta de segunda ordem conectado com filtro passa-baixa de segunda ordem em série. Com base na duração da resposta do grão impactando no filme PVDF, a frequência de corte do filtro passa-banda foi definida para 5-20 kHz. O sensor foi montado na peneira de limpeza da colheitadeira e apresentou bons resultados no tempo de resposta e na detecção do impacto dos grãos.

2.7.2 Visão Computacional

A visão computacional se faz cada vez mais presente em diversos segmentos agrícolas, nas mais variadas aplicações. Uma importante utilização da visão computacional está relacionada à sua capacidade de identificar e reconhecer objetos, plantas, frutos, entre outros. Esta capacidade permite, entre outras coisas, detectar frutos e grãos ainda na lavoura e efetuar uma estimativa da produção por meio da contagem de grãos, viabilizando a elaboração de estratégias de manejo e pós-colheita. Na cafeicultura, a previsão de produção se faz ainda mais importante, devido ao investimento financeiro e tempo de planejamento. O estudo realizado por (RODRÍGUEZ *et al.*, 2020) propõe uma abordagem de visão computacional para detectar grãos de cereja em cafeeiros com o objetivo de validar sua eficiência para efetuar uma estimativa da produção em relação a outros métodos utilizados para este fim. O estudo concluiu que o método proposto possibilitou a redução do tempo para efetuar o cálculo da estimativa de produção, po-

rém, a precisão foi comprometida por fatores ambientais e técnicos, como: intensidade de luz, angulação da câmera e distância do cafeeiro.

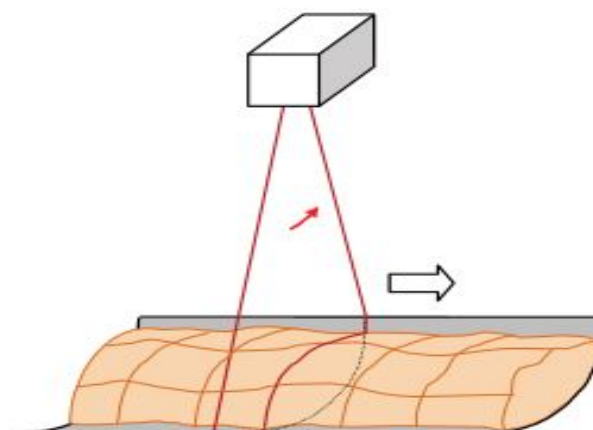
Elevadores de transporte são amplamente utilizados em unidades de beneficiamento para conduzir os grãos de um equipamento ao outro. O estudo realizado por (HAMDAN *et al.*, 2019), apresenta a visão computacional combinada a rede neural profunda com aprendizado semi-supervisionado para estimar o volume transportado pelo elevador de cana-de-açúcar. Esses autores informam que o modelo pode ser aplicado para inferir o fluxo de massa de outros materiais, como grãos. O estudo conclui que o método proposto resultou em maior eficiência na medição volumétrica do fluxo nos elevadores, além da redução do custo em relação a outros métodos para o mesmo fim.

O processamento de imagens aliado a tecnologias de visão computacional e inteligência artificial vem ganhando destaque como solução de identificação e contagem de grãos e outros materiais. Syal, Garg e Sharma (2014) utilizaram a visão computacional para efetuar a contagem de maçãs maduras ainda nas macieiras, permitindo uma programação de colheita eficiente. Zhao e Li (2009) desenvolveram um estudo para melhorar a eficiência e precisão de contagem de grãos através do processamento de imagens em ambientes controlados. O estudo concluiu que a precisão pode chegar a 100% especialmente para grãos maiores, como soja, arroz, entre outros.

2.7.3 Escaneamento a Laser

Tecnologias de escaneamento a laser vem sendo utilizadas para medição volumétrica do fluxo de materiais em esteiras de transporte com grande eficiência. Em seu trabalho, Fojtík (2014) utiliza o escâner a laser LMS 400 para criar um modelo 3D digitalizado do volume do material presente na esteira transportadora. Os experimentos foram realizados com cavacos de madeira para desenvolver a base matemática e extrair o volume transportado por meio da representação 3D. Este método apresenta uma solução eficiente para a medição volumétrica do fluxo de grãos, visto que, a representação 3D alcançada com o escaneamento a laser pode ser aplicada em qualquer material. A representação do método é apresentada na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Princípio de digitalização.



Fonte: (FOJTÍK, 2014)

Os dados obtidos com a digitalização do volume em esteira de transporte por meio do escaneamento efetuado com o laser LMS291-S05 reproduzem uma linha 2D do contorno do material, que, combinado à velocidade de movimentação da esteira, formam a terceira coordenada, possibilitando a reprodução 3D. O resultado da reprodução 3D é aplicado ao cálculo de triangulação de Delaunay, possibilitando a medição volumétrica do fluxo do material transportado. Este contexto foi utilizado por (LI *et al.*, 2015) em seu estudo, no qual a velocidade constante da esteira combinada com o contorno do volume do material, aplicando o método de malha de triangulação de Delaunay, possibilitou a reconstrução 3D do material, viabilizando o cálculo do volume transportado.

2.7.4 Medição por Efeito Doppler

O estudo realizado por Isa e Wu (2006) utilizou o sensor micro-ondas por efeito Doppler para estabelecer a relação entre a frequência refletida e o peso total dos sólidos fluindo para determinar o volume do fluxo. Os autores afirmam que, além da frequência, outras informações relacionadas ao fluxo podem ser determinadas analisando o nível de amplitude do sinal Doppler. A posição, tamanho, peso, forma e umidade do fluxo são os parâmetros que podem afetar o perfil do sinal refletido. O sensor de radar de micro-ondas de 10,58 GHz foi utilizado para os experimentos desse estudo e diferentes categorias de sólidos e pesos foram testados. Para os experimentos realizados foram utilizados grãos de feijão de diferentes variedades. O estudo concluiu que o peso do grão tem um forte impacto na resposta de amplitude do sinal Doppler, resultando na possibilidade de estimar o peso dos grãos fluindo pela tubulação em relação ao tempo, por meio da frequência refletida no sensor.

2.7.5 Célula de Carga

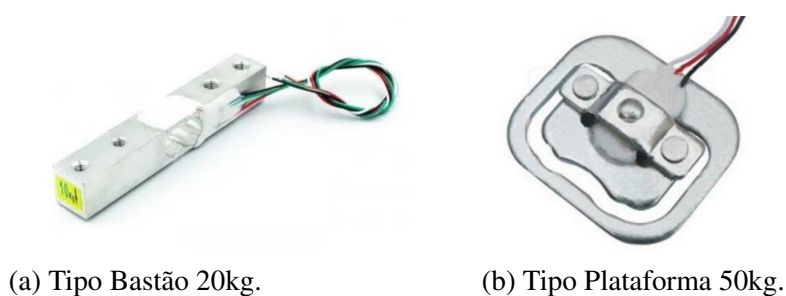
Os sensores de célula de carga para medição de fluxo de grãos possuem grande empregabilidade em sistemas de monitoramento de colheita para agricultura de precisão. Também denominados sensores de impacto, destacam-se com grande utilização em colheitadeiras devido à sua robustez e confiabilidade (WANG; HU; GAO, 2015).

Segundo (ZHOU; CONG; LIU, 2014), as células de carga consistem em uma placa de impacto apoiada sobre um transdutor de força que converte a força de impacto em um sinal de tensão, permitindo calcular a massa representada pela força aplicada ao sensor.

O princípio do funcionamento das células de carga consiste na variação da resistência elétrica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gauge*, quando submetido a uma deformação, possibilitando a conversão do esforço mecânico em sinais elétricos. Quando a ocorrência de deformação em materiais é causada pelo aumento da massa empregada sobre o mesmo, é possível calcular a força aplicada e aferir o volume mássico em questão (SURYANA; MUNTINI, 2017; CAMARGO, 2010).

A Figura 2.7 apresenta dois modelos de células de carga para utilização com o microcontrolador Arduino. Os sensores possuem formatos diferentes de acordo com sua capacidade de carga, sendo o sensor do tipo bastão (Figura 2.7 (a)) com capacidade de 20kg e o sensor do tipo plataforma (Figura 2.7 (b)) com capacidade de 50kg.

Figura 2.7 – Sensores Células de Carga.



Fonte: O autor (2021)

2.8 Processamento de Imagens Digitais

O processamento de imagens digitais é multidisciplinar e envolve a manipulação e análise de imagens por meio de técnicas e algoritmos computacionais. Nesta seção, exploraremos quatro tópicos fundamentais aplicados neste trabalho: Morfologia Matemática da Imagem, Filtros Espaciais, Detecção de Bordas e Região de Interesse (ROI).

2.8.1 Morfologia Matemática da Imagem

A Morfologia Matemática é uma abordagem poderosa no processamento de imagens, sendo especialmente útil na análise de formas e estruturas em imagens digitais. Ela se baseia em conceitos matemáticos, como dilatação, erosão, abertura e fechamento, para extrair informações relevantes da imagem. Segundo [Gonzalez e Woods \(2010\)](#), a morfologia matemática permite a análise de objetos e formas através da transformação da imagem original.

2.8.2 Filtros Espaciais

Os filtros espaciais desempenham um papel crucial no realce e suavização de imagens. Conforme abordado por [Pratt \(2007\)](#), esses filtros atuam diretamente nos pixels da imagem, modificando sua intensidade com base nas intensidades dos pixels vizinhos. Dentre os filtros mais comuns estão o filtro de média, utilizado para suavização, e o filtro de realce, como o filtro Laplaciano.

2.8.3 Detecção de Bordas

A detecção de bordas é essencial para identificar transições abruptas de intensidade na imagem, destacando contornos e estruturas. Segundo [Gonzalez e Woods \(2010\)](#), operadores como Sobel, Prewitt e Canny são amplamente utilizados para esse fim. A detecção de bordas é crucial em aplicações como reconhecimento de objetos e segmentação de imagem.

2.8.4 Região de Interesse (ROI)

A seleção de Região de Interesse (ROI) permite concentrar o processamento em áreas específicas da imagem, economizando recursos computacionais. De acordo com [Sonka, Hlavac e Boyle \(2014\)](#), identificar e isolar regiões relevantes é essencial em aplicações médicas, por exemplo, onde áreas específicas de uma imagem podem conter informações diagnósticas vitais.

2.9 OpenCV em Python para Processamento de Imagens Digitais

O OpenCV (Open Source Computer Vision Library) em Python é uma poderosa ferramenta utilizada no processamento de imagens digitais, oferecendo um conjunto abrangente de bibliotecas e módulos para análise, manipulação e interpretação de dados visuais. A combinação da versatilidade do Python com as capacidades específicas do OpenCV tornou-se um

padrão na comunidade científica e industrial para aplicações relacionadas a visão computacional e processamento de imagens. Originalmente desenvolvido pela Intel em 1999, desde então, tem evoluído constantemente, incorporando contribuições significativas da comunidade de código aberto. Sua popularidade cresceu exponencialmente devido à sua natureza modular e à habilidade de lidar com uma ampla gama de tarefas relacionadas a imagens (BRADSKI, 2000).

A ferramenta OpenCV em Python é estruturado em módulos que abordam diferentes aspectos do processamento de imagens. O módulo `'cv2'` é a principal interface para o usuário, proporcionando acesso a funcionalidades essenciais. A biblioteca oferece uma gama de técnicas de filtragem, incluindo suavização, realce e detecção de bordas, através de funções como `'cv2.GaussianBlur()'`, `'cv2.filter2D()'`, e `'cv2.Sobel()'`. Além disso, transformações geométricas como rotação, escala, translação e extração de regiões de interesse são facilmente aplicadas, contribuindo para a flexibilidade do OpenCV em diversas aplicações (KAEHLER, 2016).

OpenCV em Python é uma ferramenta essencial no campo do processamento de imagens digitais, fornecendo uma infraestrutura sólida e eficiente para uma variedade de aplicações. Sua combinação única de flexibilidade e desempenho torna-o uma escolha ideal para pesquisadores, desenvolvedores e engenheiros que buscam soluções robustas em visão computacional. Com uma comunidade ativa e em constante evolução.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Visão Geral

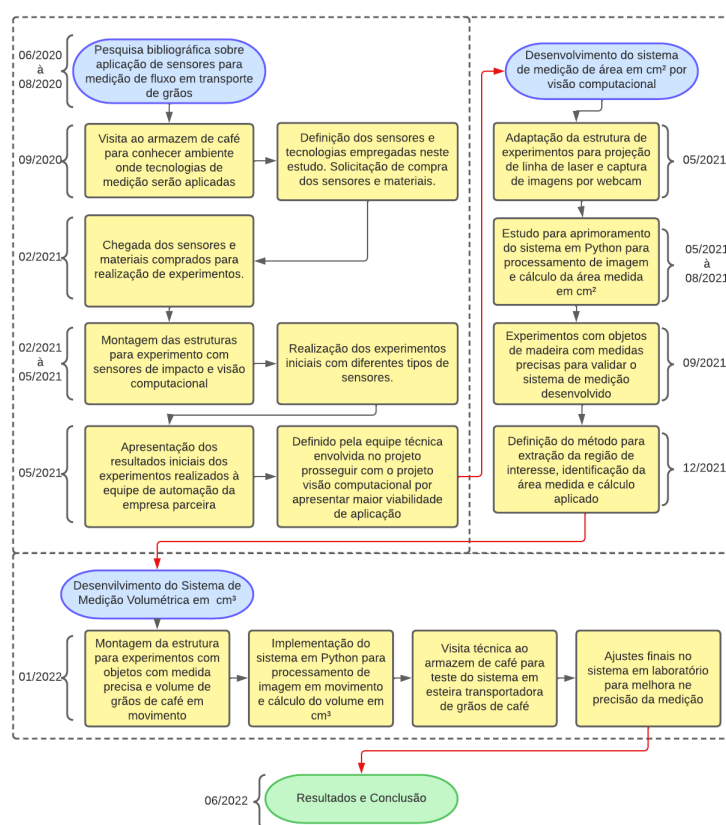
A metodologia aplicada a este projeto de pesquisa pretende validar as tecnologias identificadas com potencial para aplicação na medição volumétrica do fluxo de grãos. O estudo e validação das tecnologias foram divididas em três etapas, a saber:

- 1) **Identificação de tecnologias com potencial para medição de fluxo de grãos:** Inicialmente, foram efetuadas pesquisas para identificação de tecnologias com potencial para medição do fluxo de grãos. As pesquisas identificaram possíveis soluções em publicações científicas e tecnologias já existentes no mercado. Após a identificação das possíveis tecnologias, foi efetuada uma visita técnica a um armazém de beneficiamento de café para conhecer o ambiente onde as tecnologias foram aplicadas. Com isso, foram definidos os sensores e tecnologias para realização de experimentos em laboratório e solicitado à empresa parceira a compra dos materiais necessários.
- 2) **Prova de conceito por meio de experimentos em laboratório:** Para a prova de conceito em laboratório, foi desenvolvida uma estrutura para experimentos. A estrutura viabilizou a adaptação do dispositivo emissor de linha de laser e webcam para captura de imagens. A descrição detalhada desta estrutura está apresentada na sessão 3.2.1. Após a construção da estrutura de experimentos, foi desenvolvido um sistema para processamento de imagens e cálculo da área medida em centímetros quadrados. Com estrutura e sistema concluídos, foi dado início aos experimentos de medição. Nesta primeira fase, foram utilizados objetos de madeira (triângulos e quadrados), com medidas precisas, para viabilizar o ajuste do sistema de medição dos objetos em centímetros quadrados, este processo está detalhado na sessão 3.2.2.5.
- 3) **Desenvolvimento do sistema de medição volumétrica:** Para realizar a medição volumétrica do fluxo de grãos de café em movimento, foi efetuada uma adaptação na estrutura de medição para possibilitar a realização de experimentos com o volume de grãos de café. Para validação do sistema de medição do volume em centímetros cúbicos, foram confeccionados objetos em formato de prismas triangulares com medidas precisas. A adaptação realizada na estrutura de experimentos possibilitou gerar um movimento para que os prismas triangulares e os volumes de grãos de café em medidas

conhecidas se movimentassem pela estrutura sob a linha emitida pelo laser, imitando a esteira transportadora e possibilitando a captura da imagem do volume. Após a adaptação da estrutura de experimentos, foi realizada a implementação do sistema em Python para realização do cálculo da medição do volume em centímetros cúbico do material em movimento.

Um panorama geral da metodologia desenvolvida e da sequência das etapas para a realização desse estudo, encontra-se no fluxograma da Figura 3.1

Figura 3.1 – Fluxograma com a sequência das etapas desenvolvidas para este estudo.



Fonte: O autor (2022)

3.2 Realização dos experimentos

Por meio das pesquisas realizadas, foram identificadas tecnologias com potencial para medição volumétrica de grãos de café em movimento. Nesta fase, foram adquiridos os seguintes sensores para realização dos experimentos, a saber:

Módulo Sensor de Vibração Toque Piezoelétrico para Arduino: Utilizado como sensor de toque e vibração para captação do fluxo de grãos em queda livre por meio do impacto dos grãos sobre o sensor.

Sensor Folha Resistiva Velostat: Utilizado para captar a pressão exercida pelo impacto do fluxo de grãos em queda livre sobre o sensor.

Sensor de Distância Laser VL5311x Lidar Tof I2c 400 cm: Utilizado para medir o volume de grãos de café em fluxo contínuo.

Sensor Micro-ondas Efeito Doppler - 24 GHz CDM324: Utilizado para medir o volume do fluxo de grãos de café em queda livre dentro da tubulação de transporte de grãos.

Webcam Logitech C270 Hd 720 p Widescreen e Emissor de Linha de Laser 650 nm 100 mw 3 v: Utilizados para implementação de sistema de visão computacional para medição volumétrica do fluxo de grãos de café em esteira transportadora.

Célula de Carga 20 kg Diante da inviabilidade de utilização do sensor piezoelétrico, novos estudos foram realizados e foi identificado o sensor Célula de Carga como viável para realização de experimentos como sensor de impacto. Este sensor tem a capacidade de registrar a variação da resistência elétrica, quando submetido a uma deformação, possibilitando a conversão do esforço mecânico em sinais elétricos e a conversão dos sinais elétricos em medida mássica.

Para viabilizar a montagem das estruturas de experimentos, foram adquiridos materiais, como: tubos de PVC, prancha de MDF, pontaletes de madeira, pregos, arames para amarração, entre outros.

3.2.1 Construção das estruturas de experimentos iniciais para validação dos sensores selecionados na primeira fase da pesquisa

Para testar cada um dos sensores, foi construída uma estrutura de experimentos para simular o fluxo dos grãos de café em sistemas de transporte. Na maioria dos equipamentos de rebeneficiamento de grãos de café, os grãos são inseridos pela parte superior, seguem internamente pelo maquinário, onde é realizado o processo de rebeneficiamento, e são dispensados na

parte inferior do maquinário, seguindo para o próximo processo. Esta estrutura viabilizará testes experimentais em laboratório antes que as soluções propostas sejam de fato implementadas em unidades operacionais de rebeneficiamento de grãos de café para validação final.

A estrutura conta com um recipiente para armazenamento dos grãos de café que serão liberados por uma tubulação em queda livre para medição volumétrica e/ou mássica do fluxo. Após a passagem dos grãos de café pela tubulação, os grãos seguirão em fluxo contínuo por uma bandeja de passagem, até caírem em outro recipiente de armazenamento localizado na base inferior da estrutura. A imagem da estrutura é apresentada na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Estrutura para experimentos em ambiente controlado.



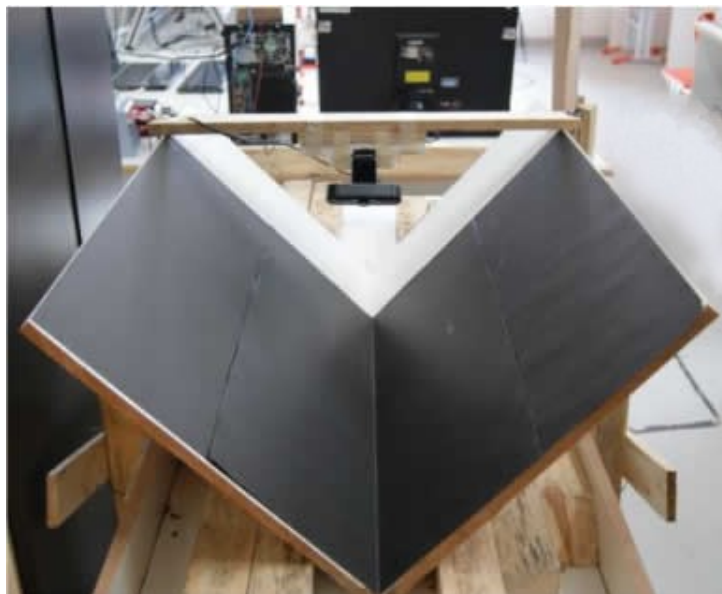
Fonte: O autor (2021)

O sensor micro-ondas por efeito Doppler adaptado na tubulação, tem por objetivo de registrar o volume de grãos em queda livre. Os sensores piezoelétricos adaptados na base inferior da tubulação para captação de sinais da vibração formados pelo impacto do fluxo dos grãos de café ao saírem da tubulação. O sensor a laser fixado sobre a bandeja de passagem será utilizado para registrar o volume formado pelo fluxo de grãos.

Com os testes em ambiente controlado foi possível avaliar a eficiência e precisão de cada sensor para medir o volume dos grãos de café em fluxo contínuo.

Para reproduzir o fluxo dos grãos de café em esteira de transportadora, foi desenvolvida uma estrutura em forma de calha, onde objetos elaborados para simular o movimento dos grãos de café são puxados por um motor, reproduzindo o movimento constante da esteira. A estrutura é apresentada na Figura 3.3

Figura 3.3 – Estrutura em calha para simular esteira de transporte.



Fonte: O autor (2021)

Para projetar a linha de laser na base da estrutura, foi adaptado um emissor de linha de laser 650 nm 100 mw 3 v. A imagem da linha é captada por uma webcam Logitech C270 Hd 720p. Uma base de papelão foi adaptada na parte superior para diminuir a intensidade da luz e possibilitar maior nitidez da linha de laser. A estrutura montada para a projeção é apresentada na Figura 3.4

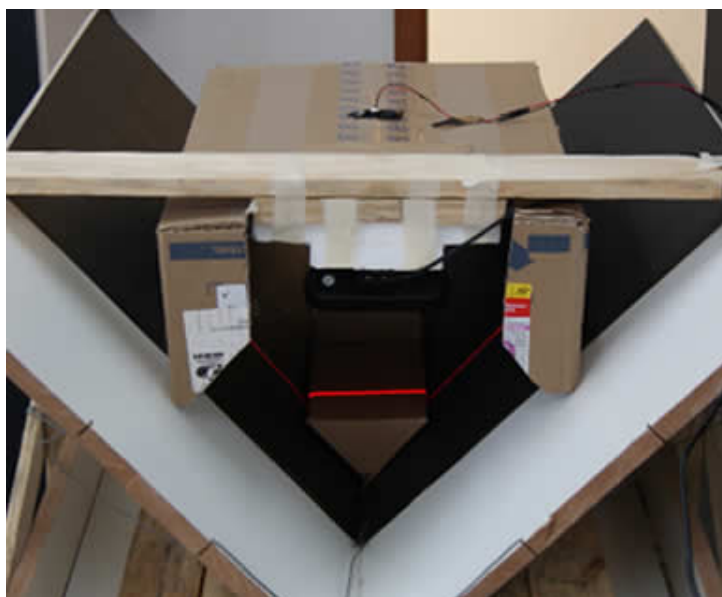
Figura 3.4 – Projeção da linha de laser na estrutura vazia.



Fonte: O autor (2021)

Foram criados objetos em forma triangular para simular o volume do café. Estes objetos possuem medidas conhecidas para calibração do sistema. Após calibrar o sistema com o primeiro objeto, foram executados testes com objetos do mesmo formato com medidas diferentes. Com este processo foi possível validar a eficiência da medida indicada pelo sistema. O objeto integrado à estrutura sob a linha de laser é apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Projeção da linha de laser sobre o objeto de calibração.



Fonte: O autor (2021)

3.2.2 Trabalhos iniciados no contexto dessa dissertação referente à primeira fase da pesquisa

Esta subseção apresenta a implementação dos sensores identificados com potencial para medição volumétrica de grãos de café em fluxo contínuo. O objetivo dos experimentos realizados nesta fase da pesquisa foi compreender a eficiência dos sensores para atender as necessidades de medição volumétrica do fluxo de grãos em unidade de rebeneficiamento de grãos de café.

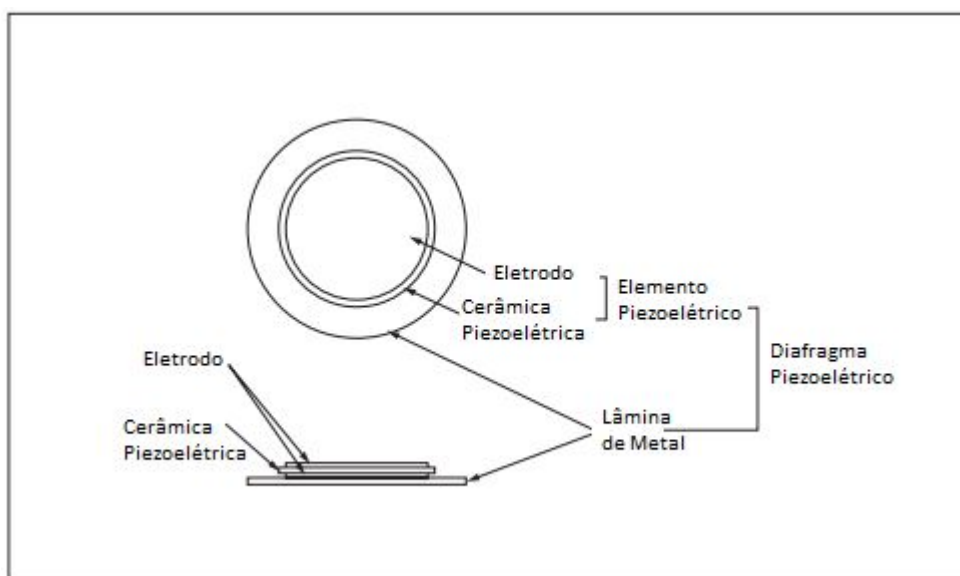
3.2.2.1 Sensor Piezoelétrico

A palavra piezoelectricidade vem da palavra grega piezein – pressionar firmemente ou apertar. Piezoelectricidade é a propriedade, presente em alguns materiais cerâmicos, assim como alguns polímeros, isto é, um campo elétrico ou voltagem é induzida no cristal piezoelétrico

como resultado de uma deformação mecânica produzida pela aplicação de uma força externa (WILLIAM, 2000; WILLIAM, 2016)

O sensor piezolétrico, também conhecido como diafragma piezoelétrico, é um componente eletrônico com formato de um disco fino e com diâmetro que geralmente varia entre 15 e 35 mm. Este possui uma estrutura fina em forma de disco com três elementos fundamentais: a membrana de piezocerâmica, a folha de metal elástico de liga de níquel e a última parte recoberta uma membrana de solução em gel usada como um eletrodo. O componente utilizado neste trabalho é composto por um disco, corresponde a uma estrutura fina que possui uma membrana piezoelétrica de diâmetro de 24 mm aplicada a uma folha de metal de 35 mm de diâmetro. A espessura da folha de metal é de 0,15 mm sendo a espessura total de 0,35 mm (MURATA, 2023). A estrutura do sensor piezoelétrico pode ser observada na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Estrutura do sensor piezoelétrico.

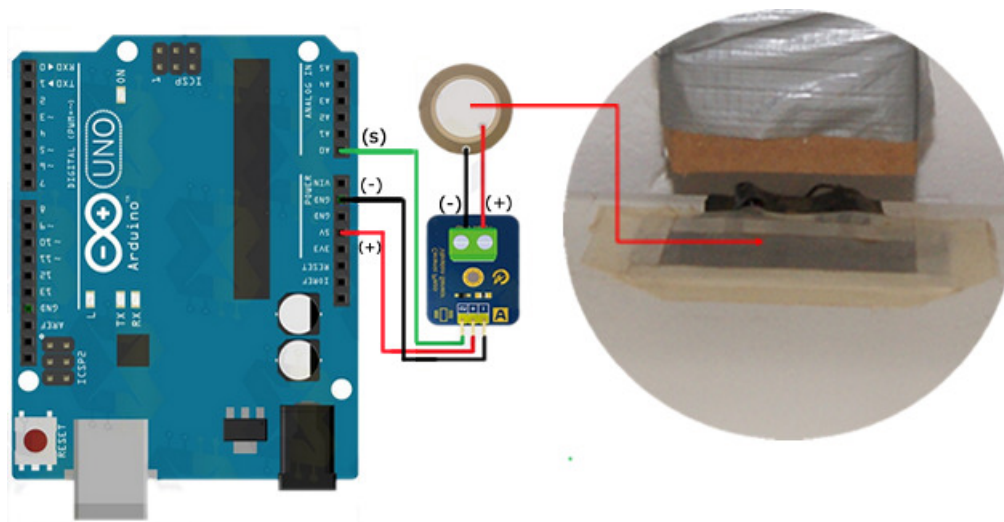


Fonte: Adaptado. (MURATA, 2023)

Para a realização dos experimentos com sensores piezoelétricos, foram utilizados módulos piezoelétricos. Cada módulo é composto por um disco piezoelétrico e um adaptador para conectar o sensor ao Arduino. Os módulos foram fixados sob uma superfície de alumínio que receberá o impacto dos grãos. Foram confeccionadas três bases com superfície de alumínio para testes, uma com uma pastilha piezoelétrica, uma com duas pastilhas piezoelétricas e outra com três pastilhas piezoelétricas. O objetivo do uso de uma superfície de alumínio é tornar o contato do fluxo de grãos de café mais abrangente no conjunto de sensores usado e não apenas local. Os sinais gerados pela base piezoelétrica ao receber o impacto dos grãos são captados

por um microcontrolador Arduino Atmega328 e armazenados em arquivo CSV. Os estudos realizados tem por objetivo relacionar o volume em fluxo de grãos de café e os sinais emitidos pelos sensores para estabelecer a medida. A base piezoelétrica com uma pastilha é ilustrada na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Sistema de sensor piezoelétrico para medição de fluxo de grãos de café.



Legenda: (-) conexão ao polo negativo (GND); (+) - conexão ao polo positivo (5V); (s) conexão com a porta analógica (A0) do Arduino para captação do sinal.

Fonte: O autor (2021)

Para realização dos experimentos, os módulos piezoelétricos fixados sob a lâmina de alumínio, foram adaptados na estrutura de experimentos, possibilitando o contato do fluxo dos grãos de café sobre o artefato com os sensores. O fluxo dos grãos sobre o artefato de sensoria-mento é apresentado na Figura 3.8

Figura 3.8 – Fluxo dos grãos sobre o sensor piezoelétrico.



Fonte: O autor (2021)

3.2.2.2 Sensor Velostat

O sensor Velostat apresenta características similares ao sensor piezoelétrico, uma vez que emite sinais elétricos quando submetido a pressão causada pelo impacto do fluxo de grãos de café. O Velostat é composto quimicamente por um filme de polieteno de baixa densidade, dopado com *carbon black*, formando um polímero de baixa densidade. Tem como característica a diminuição da resistência com o aumento da pressão, ou seja, quanto mais o Velostat for pressionado, menor será a resistência que ele oferecerá. Quando não pressionado, esse material não permite a passagem de corrente elétrica, porém quando é pressionado, sua resistência diminui ao ponto do circuito fechar, possibilitando a passagem de corrente elétrica (VEHEC; LIVOVSKY, 2020).

Os experimentos foram caracterizados pela montagem do sensor para avaliar sua viabilidade como sensor de medição mássica em fluxo contínuo de grãos. Os estudos com sensor Velostat foram caracterizados por experimentos que tinham como intuito analisar o comportamento da lâmina Velostat em diferentes materiais para posteriormente poder aplicá-la na medição do fluxo contínuo de grãos de café. Para um melhor entendimento sobre o comportamento do sensor quando submetido a pressão exercida pelo fluxo de grãos de café, foram desenvolvidos três protótipos com a adaptação do sensor em diferentes materiais, conforme apresentado a seguir.

1) Protótipo com fitas de cobre fixadas em lâmina plástica

A primeira versão do protótipo foi construída utilizando-se uma matriz de fitas de cobre, coladas em uma lâmina plástica, para passagem dos sinais elétricos. Cada fita de cobre possui um fio soldado, responsável por enviar os sinais elétricos até o micro controlador. Na Figura 3.9 são apresentadas as três fases de montagem do sensor Velostat. A imagem (1) demonstra as fitas de cobre coladas na superfície plástica. A imagem (2) apresenta a lâmina Velostat inserida entre as fitas de cobre horizontais e verticais. Na imagem (3), a lâmina Velostat está devidamente posicionada entre as fitas de cobre, possibilitando a leitura dos sinais elétricos presentes quando exercida uma força sobre o sensor.

O processamento dos sinais ocorreu por meio do micro controlador Arduino Mega, viabilizando a captura dos valores gerados por cada interseção das fitas de cobre (horizontais/verticais), quando exercida uma força sobre determinado ponto do sensor.

Figura 3.9 – Montagem do sensor Velostat.



Imagem (1)

Imagem (2)

Imagem (3)

Fonte: O autor (2021)

A realização dos testes iniciais se deu por meio de pesos conhecidos, com o objetivo de avaliar a variação dos sinais emitidos pelo sensor e realizar a calibração. A montagem experimental utilizada para realização dos experimentos é apresentada na Figura 3.10. Observa-se um peso apoiado sob um quadrado de madeira, utilizado para distribuir a força exercida pelo peso ao longo do Velostat.

Figura 3.10 – Montagem experimental do sensor Velostat.



Fonte: O autor (2021)

Cada interseção entre uma fita de cobre horizontal e vertical gera um valor quando pressionada pela força exercida pelo peso sobre o sensor. Uma média dos valores foi calculada para representação da resposta do sensor.

Para a realização dos experimentos com fluxo de café, foi construída uma estrutura para acomodar o sensor e permitir o contato do fluxo dos grãos com o sensor. Um primeiro ensaio foi realizado para validar a eficiência da estrutura e o resultado alcançado valida a estrutura

como hábil para a realização dos experimentos de medição de fluxo de grão de café. A estrutura montada é apresentada na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Estrutura para experimentos com fluxo de grãos de café.



Fonte: O autor (2021)

2) Protótipo com fita de cobre fixadas em uma base de madeira

No segundo protótipo as fitas de cobre foram fixadas em uma base de madeira (MDF). Para a parte superior, onde a pressão exercida, foi utilizada uma base em MDF de 6 mm, na parte inferior, as fitas de cobre foram fixadas em uma base de MDF com 15 mm. O objetivo desse protótipo foi uniformizar a superfície do sensor, para que o valor da massa fosse distribuído igualmente ao longo de todos os pontos de contato entre as fitas de cobre e o sensor Velostat (vide Figura 3.12). Similar ao experimento anterior, massas diferentes foram colocadas sobre a superfície do sensor.

Figura 3.12 – Montagem do sensor Velostat.

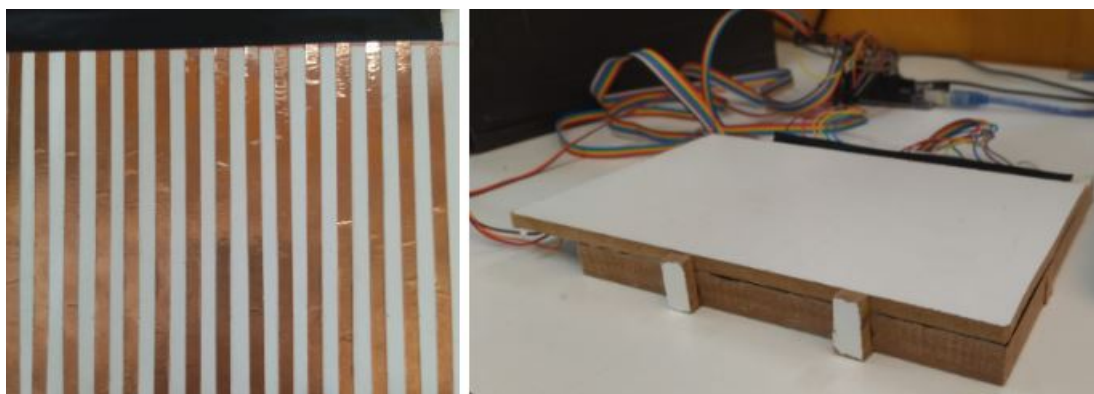


Imagem (1)

Imagem (2)

Fonte: O autor (2021)

3) Protótipo com a utilização de placas de fenolite

No terceiro experimento foi utilizada uma nova estrutura para fazer as leituras dos valores obtidos pelo Velostat. Essa modificação foi feita na tentativa de obter melhores resultados, em que uma alteração foi feita no circuito eletrônico. Foram utilizadas duas placas de fenolite e o Velostat foi posto entre elas. A Figura 3.13 ilustra a estrutura com placa de fonolite. Após isso, as placas de fenolite foram conectadas a um resistor formando um circuito divisor de tensão, como mostra a Figura 3.14.

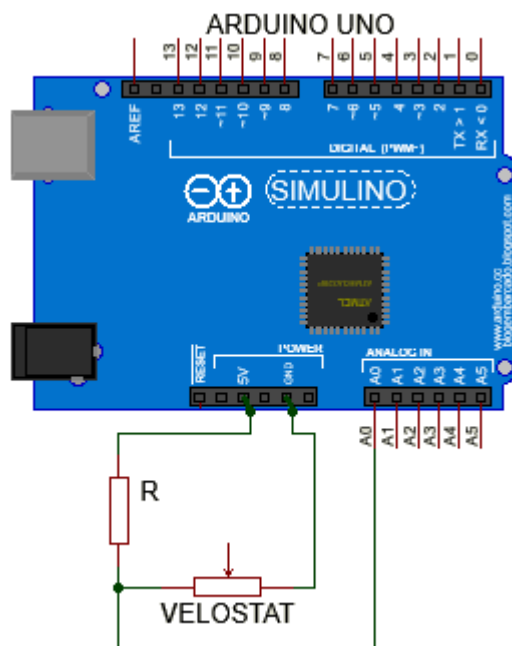
Figura 3.13 – Estrutura de fenolite - Velostat.



Fonte: O autor (2022)

Na segunda etapa deste terceiro experimento foi aplicada uma massa fixa sobre a superfície do sensor e foram registrados os valores. Após isso, ainda com a mesma massa sobre sua estrutura, ele foi colocado em um ambiente com algumas trepidações, com o objetivo de avaliar o seu comportamento nesse cenário. Todo esse experimento foi repetido três vezes.

Figura 3.14 – Circuito divisor de tensão.



Fonte: O autor (2022)

3.2.2.3 Sensor Laser

Um dos sistemas utilizados para transportar o café em uma planta de beneficiamento é a esteira transportadora. O estudo realizado na primeira fase da pesquisa para identificar possíveis soluções para medir o fluxo transportado em esteira identificou o escaneamento a laser como uma das tecnologias empregadas no mercado para medições de fluxo de materiais em esteira. Os trabalhos de Li *et al.* (2015) e Fojtík (2014) são exemplos de aplicações com sensor laser para mensurar o fluxo dos materiais em esteiras de transporte por meio do escaneamento e reprodução 3D do volume.

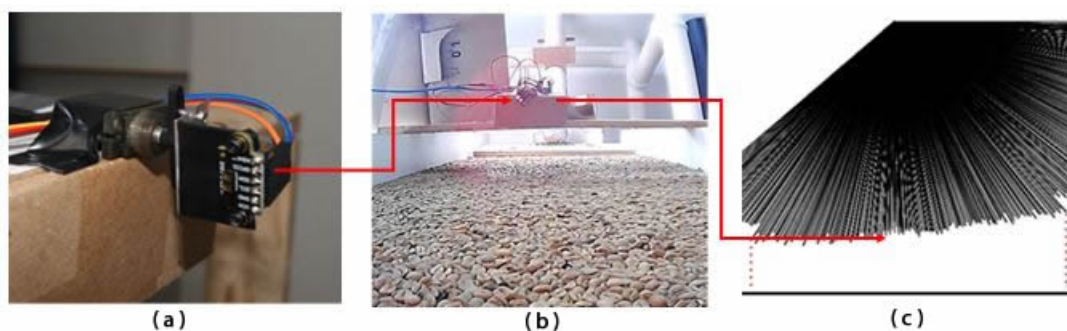
No primeiro modelo desenvolvido para realização de experimentos, foi utilizado o sensor de distância Laser VL5311x Lidar ToF I2c 400 cm acoplado em um motor de passo. O motor produz um movimento de ida e volta em um ângulo de 180°. Ao acompanhar o movimento do motor, é captado o sinal da distância entre o sensor e a base de passagem dos grãos de café. Para registrar a distância máxima entre o sensor e a base da prancha de passagem é efetuado o primeiro movimento com a prancha e passagem vazia. Os valores registrados neste primeiro processo foram armazenados para compor o cálculo do volume, formando uma matriz com valores constantes.

Ao liberar a passagem dos grãos de café o sensor opera em um movimento contínuo de 180°. A cada movimento de ida e volta, os sinais de distância do volume dos grãos de café

em fluxo contínuo são armazenados e é gerado um gráfico invertido. Os valores registrados em cada movimento de ida são armazenados em uma matriz, o mesmo acontece para o movimento de volta. Para efetuar o cálculo do volume, os valores registrados em cada movimento do sensor são subtraídos dos valores registrados inicialmente com a prancha de passagem vazia, resultando na altura formada pelo volume os grãos de café.

O gráfico invertido é representado pela imagem (c), indicada na Figura 3.15, apresenta a área em branco entre o gráfico e a base da prancha de passagem dos grãos de café, indicando o volume preenchido pelos grãos de café. O protótipo desenvolvido é apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Sistema do sensor a laser.



Legenda: (a) Laser V15311x Lidar ToF I2c 400cm; (b) - Sensor laser adaptado na estrutura para medição do volume dos grãos em fluxo; (c) Gráfico gerado pelo sistema representando a distância entre o sensor e os grãos.

Fonte: O autor (2021)

3.2.2.4 Sensor Micro-ondas por Efeito Doppler

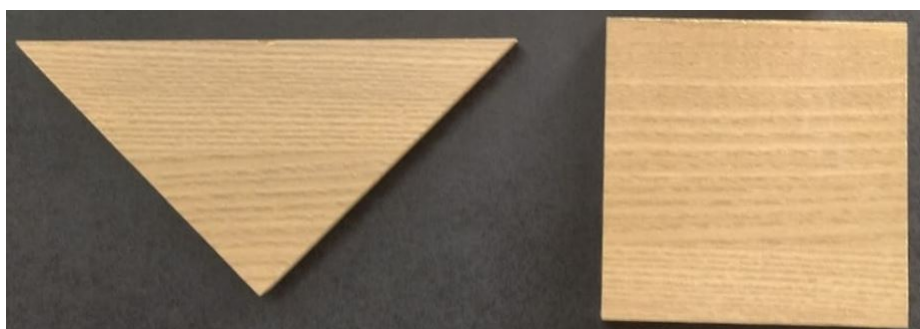
O efeito Doppler é um fenômeno físico onde um agente emite uma onda que é refletida por um corpo em movimento. O sensor micro-ondas atua como o agente emissor e receptor de ondas em uma frequência de 24 GHz. Ao encontrar um obstáculo em movimento a onda é refletida, sendo possível captar a distância e velocidade do obstáculo (WANG; YANG; WU, 2018; ISA; WU, 2006).

Para realização dos experimentos nesta fase inicial, foi adquirido o sensor Doppler Módulo Radar Cdm324 Microondas 24 GHz para Arduino. Estudos foram efetuados com objetivo de desenvolver um protótipo com capacidade de representar o fluxo dos grãos de café por meio dos sinais captados pelo sensor.

3.2.2.5 Visão Computacional

Os primeiros experimentos realizados com o sensor de visão computacional proposto evidenciaram a necessidade de efetuar a medição em objetos com medidas precisas, para avaliar a precisão e verificar a necessidade de ajustes. Foram confeccionados objetos quadrados e triângulares, em *Medium Density Fiberboard* (MDF), com espessura de 12 mm, conforme ilustrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Objetos confeccionados para análise da precisão.



Fonte: O autor (2021)

Para a realização dos experimentos foram utilizados oito objetos de cada formato com medidas crescentes em escala. Uma série de medições foram executadas, permitindo efetuar testes de captura de imagens e ajustes no sistema de processamento de imagens para aprimorar a precisão das medições. Os experimentos iniciais, realizados com a Webcam Logitech c270, com resolução de vídeo de 720p, não apresentaram bons resultados nas medições. Neste momento, observou-se a necessidade da realização de testes utilizando câmeras com maior qualidade. Uma câmera Panasonic, modelo Lumix Z100 com resolução de vídeo de 1080p, foi empregada para captura das imagens dos objetos, possibilitando alcançar uma resposta adequada para o processo de calibração do sistema de processamento de imagens, evidenciando a necessidade de aquisição de uma webcam com melhor desempenho.

Os experimentos realizados na nova estrutura estão detalhados na sessão 3.3.

3.2.2.6 Célula de Carga

Após a constatação da inviabilidade da utilização do sensor piezoelétrico para medição volumétrica dos grãos de café em fluxo contínuo, novos estudos foram realizados para identificação de sensores que apresentassem viabilidade para medição dos grãos de café em fluxo

contínuo. A capacidade de aferição mássica do sensor célula de carga indicou possível aplicabilidade para medição dos grãos de café em queda livre.

Diversos sistemas para transportar dos grãos de café até o maquinário de beneficiamento, são estruturas suspensas, onde o fluxo dos grãos até o maquinário acontece por queda livre de forma contínua. A Figura 3.17, apresenta a estrutura suspensa para envio dos grãos de café para a mesa densimétrica, responsável por separar os grãos de café de acordo com sua densidade. Uma das soluções para aferir a quantidade de grãos que cada maquinário está processando, seria implantar um sistema de sensoriamento para medição do fluxo de grãos de café por queda livre.

Figura 3.17 – Tubulação suspensa para transporte dos grãos de café até a mesa densimétrica



Fonte: O autor (2021)

Os estudos para o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento para medição volumétrica do fluxo de grãos de café em queda livre, indicaram a célula de carga com viabilidade para esta aplicação. Nesse contexto, iniciou-se o processo de prova de conceito com o desenvolvimento de um protótipo para validar a viabilidade de utilização da célula de carga para medição do fluxo dos grãos de café no sistema de transporte em tubulação por queda livre.

Para estruturação do sistema de medição, foi utilizado um sensor de célula de carga para Arduino com capacidade de carga nominal de 20 kg do tipo bastão, conforme especificações a seguir:

Especificações técnicas do sensor de célula de carga tipo bastão:

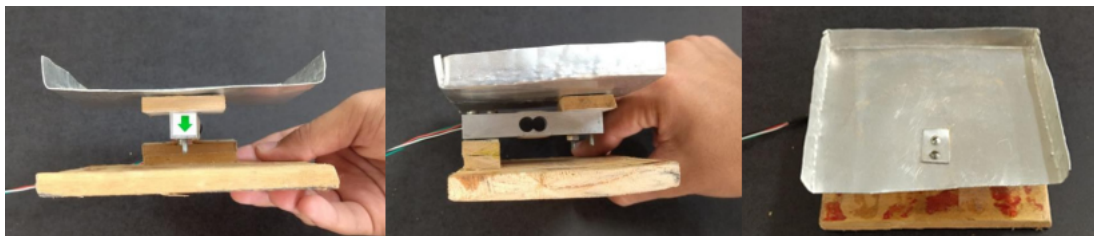
- **Carga nominal:** 0 a 20 kg
- **Potência nominal de saída:** $1.0\text{mv/v} \pm 0.1\text{mv/v}$
- **Tensão de funcionamento recomendada:** 5 - 12 VDC
- **Tensão máxima de operação:** 12VDC
- **Impedância de entrada:** $1066 \pm 10\% \Omega$
- **Impedância de saída:** $1000 \pm 10\% \Omega$
- **Faixa de temperatura de operação:** -20 - 65°C
- **Classe de proteção:** IP65
- **Material:** liga de alumínio
- **Dimensões:** 11 x 11 x 80 MM

Para a utilização das células de carga em um Arduino, é necessário um módulo amplificador do sinal das células, pois as células de carga geram uma diferença de potencial muito baixa para o Arduino. Esse sinal deve ser amplificado para que haja um bom funcionamento no controlador, para isso, o módulo HX711 de 24 bits é o mais utilizado. O módulo possui terminais de entrada que podem conectar mais de uma célula, sendo possível então a utilização de duas células em conjunto, além de ser barato e de fácil acesso. O módulo foi projetado para trabalhar diretamente com sensores em ponte de Wheatstone para aplicações de medição de forças diversas, seja por pesos colocados estaticamente ou por forças constantes sob a célula de carga. O multiplexador de entrada seleciona entre dois canais diferenciais A e B. Cada canal diferencial pode ser ligado em até duas células de carga (A+, A-, B+, B-) (ELETROGATE, 2023).

O sensor de célula de carga foi fixado em uma base de madeira para apoiá-lo na estrutura de experimentos. Para que seja possível estabelecer o contato com o fluxo de café em queda

livre, uma bandeja de alumínio foi adaptada em sua face superior. A montagem do sensor de célula de carga é apresentada na Figura 3.18.

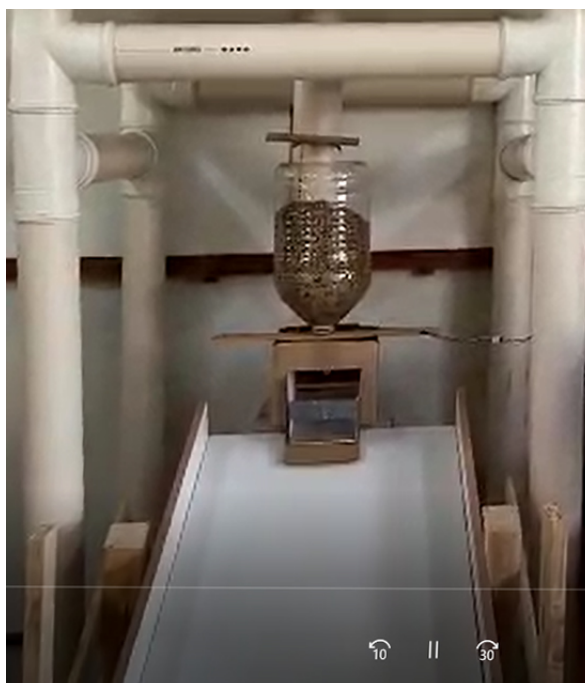
Figura 3.18 – Adaptação da Célula de Carga do Tipo Bastão 20kg.



Fonte: O autor (2021)

A estrutura de experimentos foi adaptada para permitir que o sensor receba o impacto dos grãos de café em um fluxo contínuo, viabilizando a captação dos sinais emitidos pelo sensor. Um microcontrolador Arduino Atmega328 foi utilizado para o processamento e armazenamento em arquivo CSV dos sinais emitidos pelo sensor. Os estudos objetivam relacionar o volume dos grãos de café em fluxo contínuo e os sinais emitidos pelo sensor para estabelecer a medida final. O sensor adaptado na estrutura de experimentos é apresentado na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Adaptação da estrutura para experimentos com célula de carga.



Fonte: O autor (2021)

A base em alumínio fixada na célula de carga para receber o impacto do fluxo dos grãos de café foi adaptada em uma caixa com uma base inclinada para viabilizar a passagem dos grãos

de café em fluxo contínuo. A Figura 3.20 apresenta a célula de carga adaptada na caixa com a base inclinada e um recipiente para receber os grãos de café.

Figura 3.20 – Estrutura da célula de carga adaptada para medição de grãos de café em fluxo contínuo.



Fonte: O autor (2022)

Com a célula de carga devidamente adaptada na estrutura de experimentos, foram realizados testes para ajustes e validação do sistema de medição em fluxo contínuo. O processo realizado para passagem dos grãos de café pela célula de carga é demonstrado na Figura 3.21.

Após a validação da adaptação da célula de carga na estrutura, foram realizados experimentos para medição mássica dos grãos de café em fluxo contínuo. Para determinar a precisão do sistema, foi utilizada uma escala iniciada em 1 kg de café, aumentando de 1 kg em 1 kg até 12 kg. Os valores apurados em cada experimento foram relacionados em uma planilha e calculado o erro relativo dos valores obtidos em unidade de medida submetido ao processo de fluxo contínuo.

Para ajustar os valores apurados pelo sistema e os valores reais submetidos em cada medição, foi aplicado o modelo estatístico de regressão linear simples. Os resultados alcançados são apresentados em três repetições realizadas com os mesmos padrões de medidas para avaliação da estabilidade do sistema.

Figura 3.21 – Fluxo contínuo de grãos de café sobre a célula de carga.



Fonte: O autor (2022)

3.2.3 Conclusão da primeira fase da pesquisa

Dentre os experimentos realizados no contexto desta dissertação, referente à primeira fase da pesquisa, a medição volumétrica por meio da visão computacional indica maior viabilidade para aplicação em ambiente de rebeneficiamento de grãos de café. Os estudos realizados com os demais sensores serão retomados em trabalhos futuros.

3.3 Realização dos experimentos de medição volumétrica por meio de visão computacional referente à segunda fase da pesquisa

3.3.1 Sistema de visão computacional para medição volumétrica em esteira transportadora

Após a constatação da viabilidade para desenvolvimento do protótipo em laboratório do sistema de medição volumétrica de grãos de café em correia transportadora por visão computacional, e por esta solução atender às necessidades da unidade de rebeneficiamento de grãos de café, foi iniciada uma nova fase do projeto para o desenvolvimento do software para medição do volume transportado pelas esteiras em movimento.

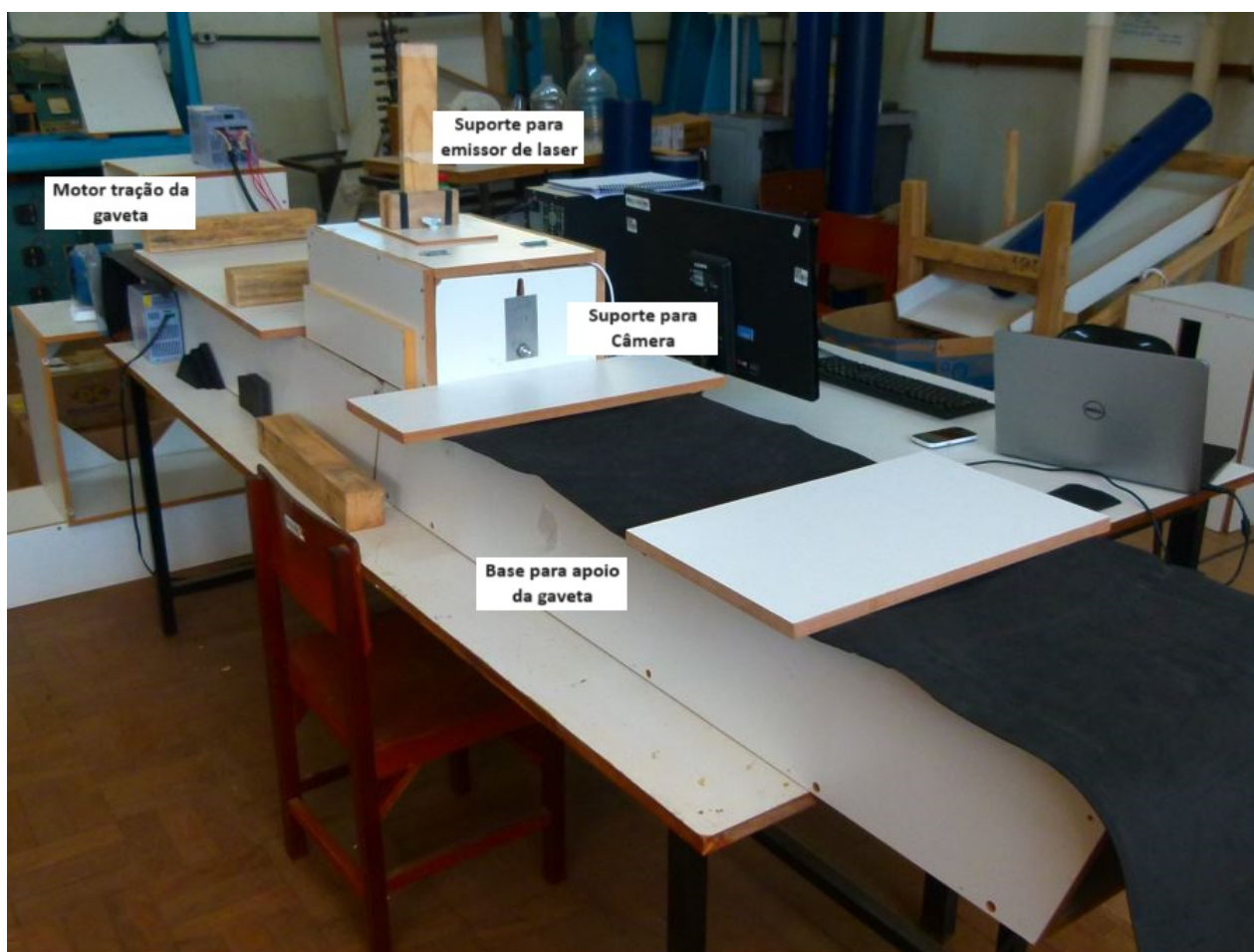
As esteiras transportadoras são aplicadas em diversos processos no ambiente de beneficiamento de grãos de café. Em grande parte das vezes, os grãos de café chegam na unidade de beneficiamento em grandes carretas, são despejados no setor de recepção de carga e transportados em esteiras até os elevadores que transportam os grãos de café para os silos de armazenagem. Durante o processo de beneficiamento, as esteiras são utilizadas para transportar o café de um equipamento ao outro e para os silos de armazenagem dos grãos de café processados. Por fim, as esteiras são utilizadas para transportar os grãos de café armazenados nos silos para as balanças de ensacamento e expedição. O sistema de medição proposto neste projeto tem por objetivo ser adaptável a qualquer ponto da unidade de beneficiamento em esteiras, viabilizado a medição volumétrica dos grãos de café em diversas fases do processo.

3.3.2 Estrutura de experimentos

Para viabilizar os experimentos com grãos de café e objetos em formato de prismas triangulares com medidas conhecidas e determinar seu volume em centímetros cúbicos (cm^3), quando em movimento e em velocidade contínua, foi construída uma nova estrutura para experimentos em laboratório, conforme apresentado na Figura 3.22. A estrutura é composta por uma canaleta que recebe em seu interior uma gaveta deslizante, onde é acondicionado o material a ser medido. A gaveta é presa a um cabo, conectado à polia de um motor. Ao ser acionado, o motor traciona o cabo, puxando a gaveta em sua direção, formando um movimento contínuo em direção ao motor. Este processo possibilita o fluxo do material sob a linha de laser. A imagem da linha de laser é captada pela câmera, permitindo a representação gráfica do volume formado pelo objeto ou grãos de café. Essa estrutura objetiva simular o funcionamento de uma esteira transportadora.

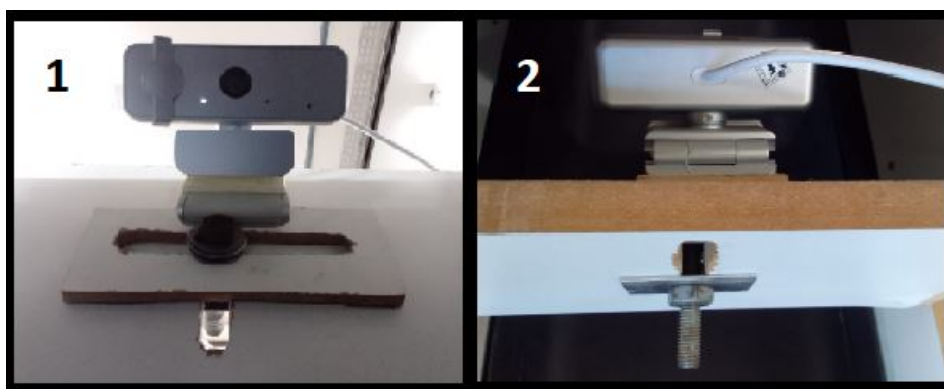
Uma estrutura de madeira em formato de caixa retangular, é encaixada sobre a canaleta. Nesta estrutura foram fixados o emissor de linha de laser e a câmera. Seu formato foi projetado para minimizar a passagem da luz, viabilizando a captura da imagem da linha de laser com maior nitidez. A câmera é fixada no centro da parte posterior da caixa e posicionada em um ângulo de 45° em relação ao ponto onde a luz de laser é projetada na base da esteira. A adaptação da câmera na estrutura foi planejada para permitir o ajuste de sua altura em relação a base da esteira, viabilizando a regulação da câmera para capturar toda a linha do laser horizontalmente, em diferentes modelos de esteiras. A Figura 3.23, apresenta a estrutura para fixação da câmera.

Figura 3.22 – Estrutura para experimentos com fluxo de grãos de café.



Fonte: O autor (2022)

Figura 3.23 – Suporte para fixação da webcam na estrutura de experimentos.

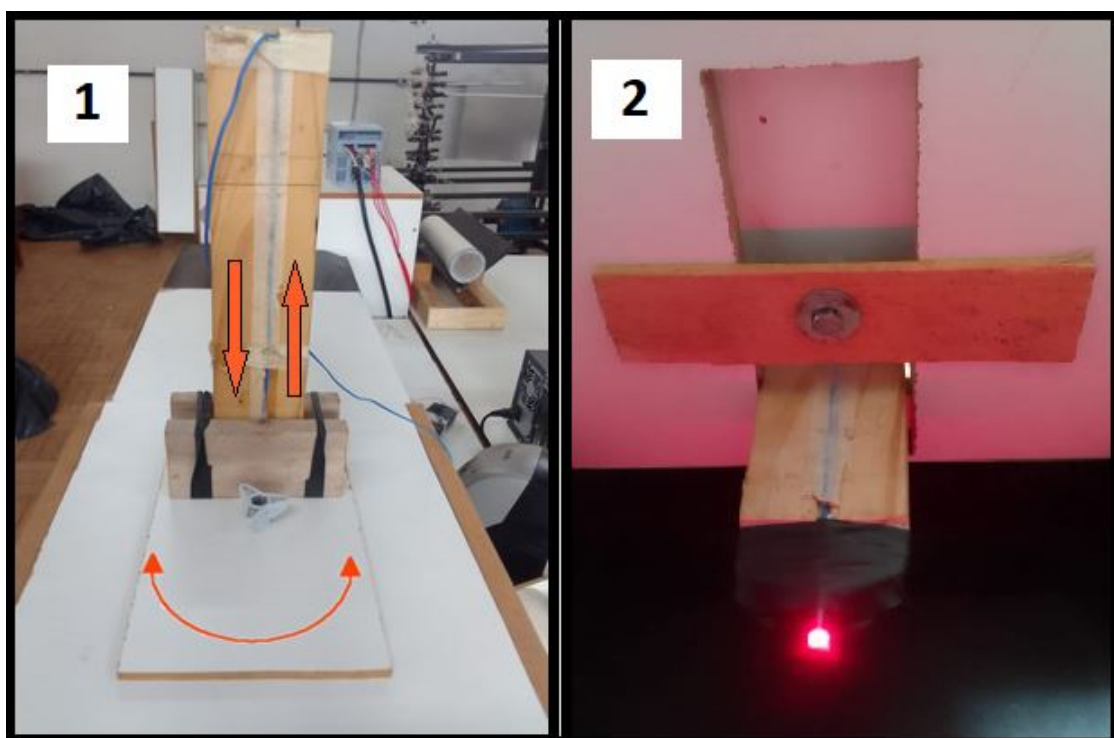


Legenda: 1 - Visão interna da fixação da câmera. 2 - Visão externa da fixação da câmera.

Fonte: O autor (2022)

O emissor de linha de laser, posicionado na parte superior da estrutura, foi planejado para possibilitar a regulagem de sua altura em relação a base da esteira, viabilizando o ajuste para que a linha de laser cubra toda extensão lateral da esteira, abrangendo a largura da esteira. Também é possível regular sua posição horizontal para que o laser forme uma linha reta precisa entre das bordas da esteira. A estrutura para fixação do emissor de linha de laser é apresentada na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Suporte para fixação do emissor de linha de laser na estrutura de experimentos.

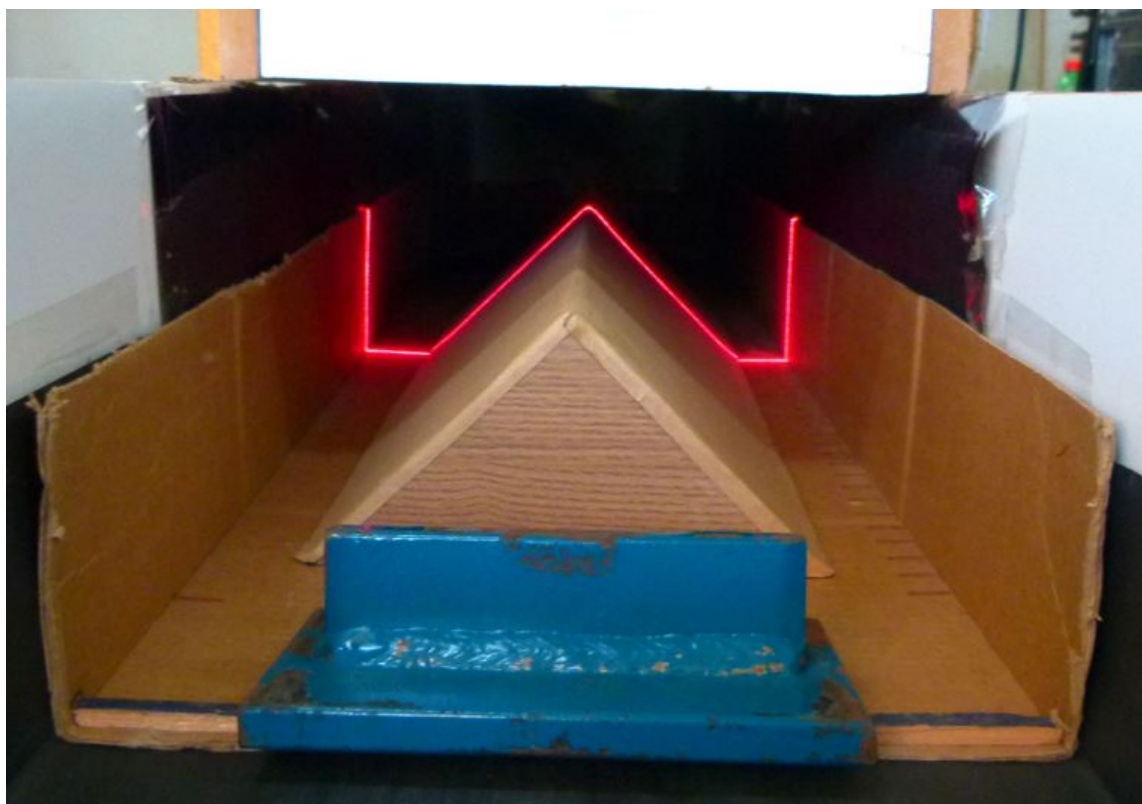


Legenda: 1 - Visão externa da fixação do emissor de linha de laser com as setas indicando a articulação.
2 - Visão interna da fixação do emissor de linha de laser.

Fonte: O autor (2022)

O objeto posicionado na gaveta, sob a linha de laser, é apresentado na Figura 3.25. Ao acionar o motor, a gaveta se movimentará em velocidade contínua, possibilitando capturar a imagem da linha de laser percorrendo toda extensão do objeto. Por meio do sistema de processamento de imagens, é extraído a posição dos pixels representados pela linha de laser sobre o objeto e efetuado o cálculo do volume em centímetros cúbicos. A captura, processamento de imagens e os cálculos realizados, são apresentados na seção 3.3.2.

Figura 3.25 – Objeto posicionado na gaveta sob a linha de laser.

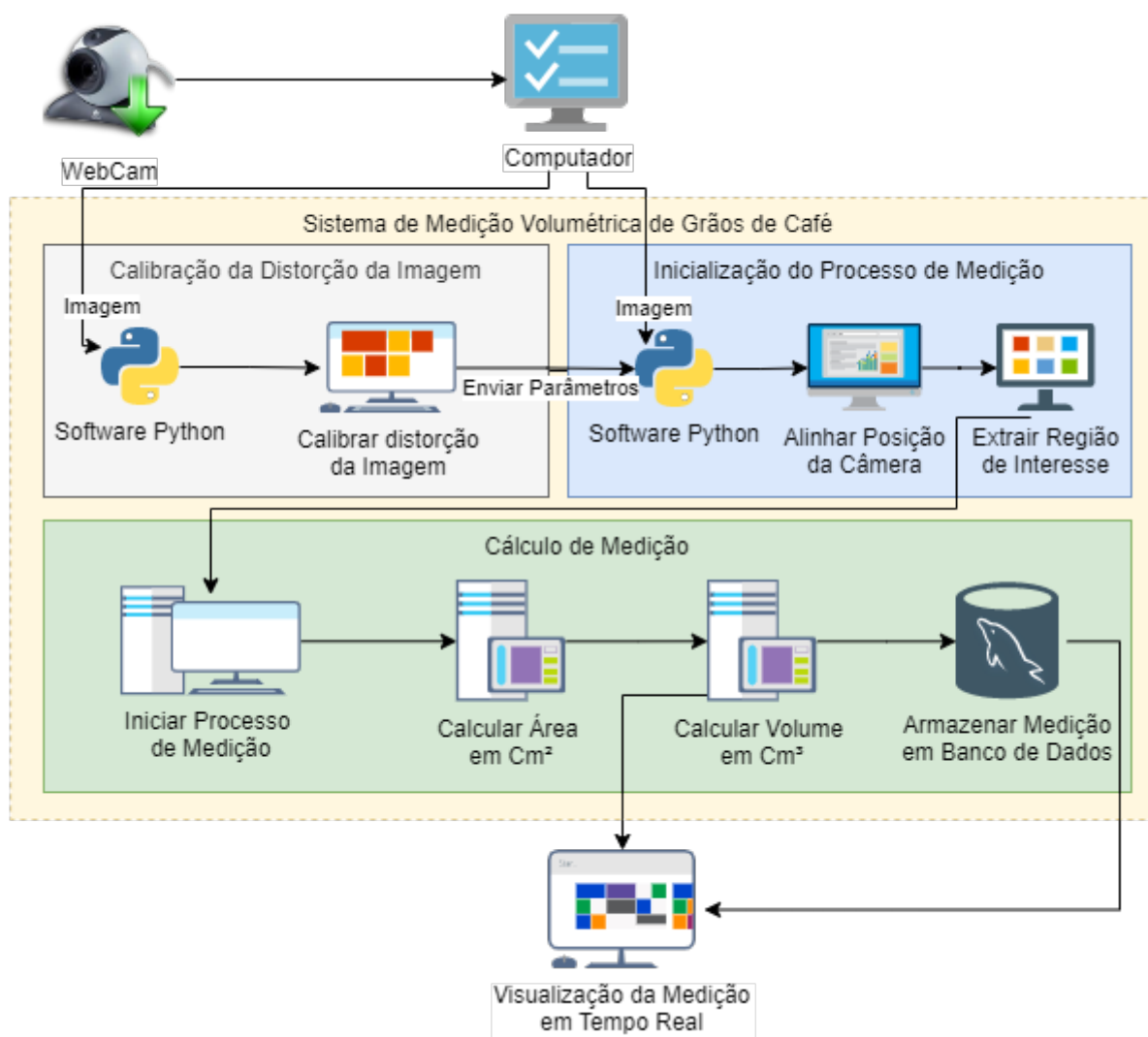


Fonte: O autor (2022)

3.3.3 Desenvolvimento do software para processamento de imagens e cálculo de medição

O sistema de processamento de imagens e cálculo de medição foi desenvolvido em linguagem de programação Python, em sua versão 3.7, juntamente com a biblioteca OpenCV versão 4.5.3 para processamento de imagens, a biblioteca Numpy versão 1.21.6 para cálculo de matrizes e a biblioteca PyMySQL versão 1.0.2 para conexão com banco de dados MySQL. A arquitetura do sistema foi dividida em módulos. Em cada módulo é atribuída uma funcionalidade que oferece subsídio de dados para o módulo seguinte, ao final do processo é estabelecido o resultado do cálculo da medição. A Figura 3.26 representa o fluxo do processo executado pelo sistema e um resumo de cada módulo é apresentado em sequência.

Figura 3.26 – Fluxo do Processo Realizado pelo Sistema de Medição.



Fonte: O autor (2022)

As seções seguintes apresentarão cada módulo detalhadamente, evidenciando as funcionalidades de cada etapa, onde o processo executado gera o subsídio para a execução do processo seguinte, até que a base para formação do cálculo se complete e possibilite a medição do volume de grãos de café transportados pela esteira.

3.3.3.1 Calibração da distorção da imagem

Durante a realização dos experimentos foi observado que o erro relativo aumentava quando eram utilizados objetos e grãos de café em volumes maiores, mantendo-se o mesmo padrão de valor para a altura da imagem em pixels.

Aspectos relacionado à distorção da câmera foram estudados para determinar a causa do aumento do erro em medições com volumes maiores. Em um teste realizado com uma régua

branca adaptada contendo quadrados pretos de 4 cm², foi possível identificar que os quadrados pretos aumentavam de tamanho quando observados da base da régua para a parte superior, conforme demonstrado na Figura 3.27.

Figura 3.27 – Régua com quadros pretos de 4 cm² posicionada no interior da estrutura de experimentos.



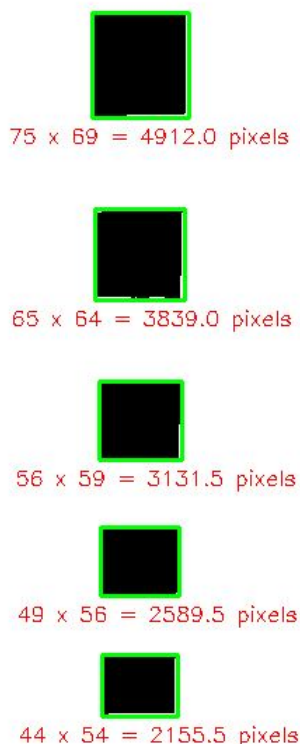
Fonte: O autor (2022)

Para determinar se o aumento no tamanho dos quadrados está relacionado ao aumento no tamanho dos pixels ou no aumento da quantidade dos pixels, foi desenvolvido um algoritmo para efetuar a contagem dos pixels de cada quadrado. A Figura 3.28, apresenta o resultado da contagem de pixels em cada quadrado, onde a descrição dos valores representam a altura vezes a largura e o resultado total da área quadrada em pixels.

Diante dos resultados apresentados pelo algoritmo de contagem de pixels foi possível certificar que existe um aumento dos pixels relacionado à posição superior da imagem captada. Esta característica determina o motivo pelo qual o erro no processo de medição aumenta quando são utilizados objetos e grãos de café em volumes maiores.

Uma solução proposta para este problema foi dividir a imagem captada no processo de medição em três regiões, indicando um fator de altura da imagem em pixels para cada região.

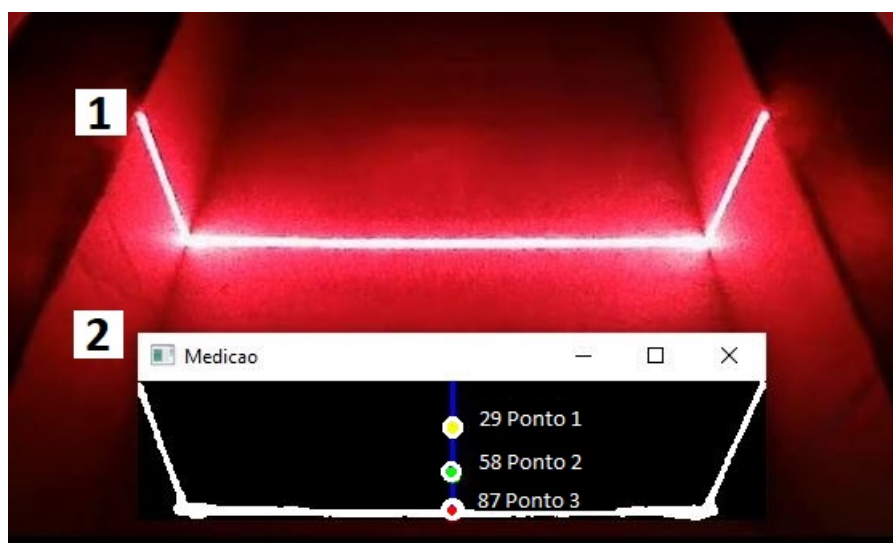
Figura 3.28 – Quadrados da régua submetidos ao algoritmo para contagem dos pixel.



Fonte: O autor (2022)

A primeira implementação desenvolvida consiste em dividir a imagem captada no processo de medição em três partes, delimitadas por marcações de altura de pixel, conforme ilustrado na Figura 3.29. Com esta ação, é possível determinar o valor do pixel que indica sua altura na coluna central da imagem. A Figura 3.29 apresenta em sua face superior a indicação (1), que é a imagem original captada pela câmera, e na face inferior a indicação (2), que é a imagem processada pelo sistema de divisão de regiões. É possível verificar na imagem (2), que existem três pontos diferentes na coluna central da imagem, com os respectivos valores representando as posições em pixels de sua altura. O primeiro ponto, localizado na parte superior identificado como ponto 1, representa o limite da primeira região, estabelecida entre o pixel 0 e o pixel 29. A segunda região compreende os pixels localizados entre o ponto 1 (valor 29) e o ponto 2 (valor 58). A terceira região é delimitada pelos pixels abaixo do ponto 2 (valor 58) e os pixels acima do ponto 3 (valor 87).

Figura 3.29 – Imagem captada pela câmera submetida ao sistema de divisão por região.



Legenda: 1 - Imagem original captada pela câmera. 2 - Imagem processada indicando a divisão por região.

Fonte: O autor (2022)

Ao posicionar um volume sob a linha de laser, será indicada sua posição em uma das regiões estabelecidas, tornando possível calibrar o sistema com um fator de cálculo personalizado para cada região. A Figura 3.30 demonstra um objeto posicionado sob a linha de laser e sua representação em uma das regiões após o processamento da imagem. Por meio da divisão da imagem em regiões foi possível estabelecer um fator de calibração para cada região.

Figura 3.30 – Imagem da posição da linha de laser sobre um objeto.



Legenda: 1 - Imagem original captada pela câmera. 2 - Imagem processada indicando a divisão por região.

Fonte: O autor (2022)

A implementação do cálculo realizado quando o volume transportado atinge cada uma das regiões é apresentado na seção 3.3.2.4.

3.3.3.2 Alinhamento da Câmera

Antes de iniciar o processo de medição, é necessário captar uma imagem estática com a esteira vazia. Essa imagem será utilizada para calcular o somatório dos pixels representados pela linha de laser projetada na base da esteira vazia. Outro fator importante relacionado a imagem estática, que representa a altura da esteira em pixels, as extremidades da linha de laser devem estar alinhadas para representar o alinhamento da esteira.

Para que a altura da linha de laser em pixels represente a altura da esteira com precisão, é necessário que as extremidades da esteira esteja alinhada na imagem captada pela câmera, formando uma linha reta entre uma extremidade e outra. Para possibilitar o correto alinhamento da câmera, foi desenvolvido um módulo no sistema para que o operador possa regular a câmera manualmente e, por meio da visualização dos pontos de regulagem das extremidades apresentados na tela do computador, é possível atingir o melhor alinhamento possível. A Figura 3.31 apresenta a tela visualizada pelo operador para alinhar a câmera manualmente.

Figura 3.31 – Imagem da linha de laser sobre a esteira apresentada na tela para alinhamento da câmera



Fonte: O autor (2022)

Para detectar as extremidades da linha de laser sobre a esteira, foi desenvolvido um algoritmo para interceptar o primeiro pixel branco em cada lateral da linha de laser. O fluxo do algoritmo inicia registrando o frame da imagem captada pela câmera, em seguida converte a imagem do frame para escala cinza. Quando a imagem é convertida para escala cinza, todos os pixels da imagem recebem um valor entre 0 e 1, quanto mais próximo de 0 mais escura a

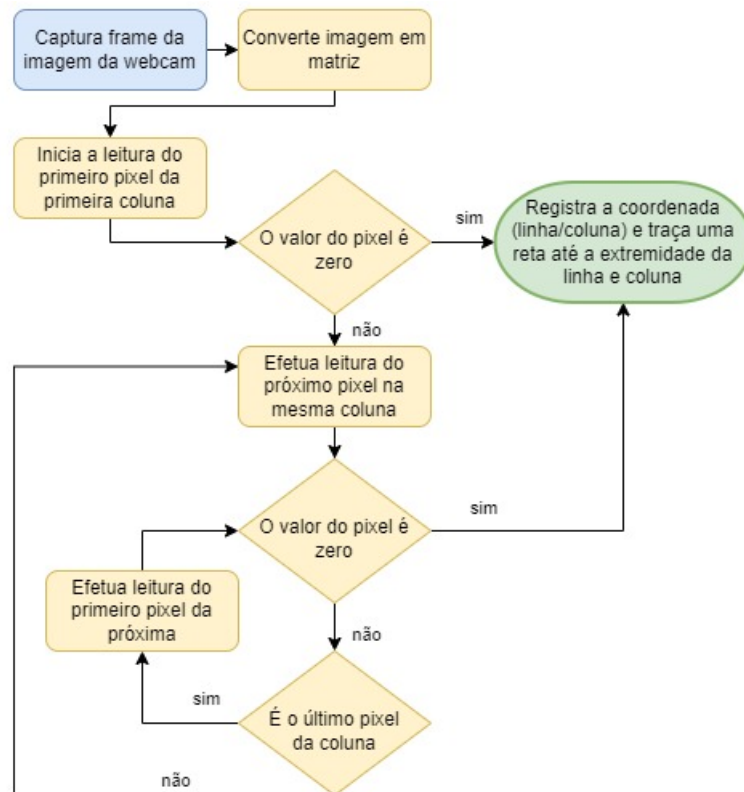
intensidade da cor em escala cinza, quanto mais próximo de 255, mais clara a intensidade da cor em escala cinza. Na sequência, é aplicado o processo de limiarização na imagem, por meio função *threshold* da biblioteca Opencv, configurada para que todos os pixels da imagem com valores menores que 200 recebam o valor 0 e os pixels com valores entre 200 e 255 recebem o valor 255. Após a execução desse processo, é obtida uma imagem em preto e branco, onde o pixel com valor 0 representa a cor preta e o pixel com valor 255 representa a cor branca.

Com a imagem convertida em preto e branco, o sistema identifica a coluna central da imagem e nela é traçada uma reta. Este processo divide a imagem em duas, formando lateral direita e lateral esquerda. O processo de varredura dos pixels inicia-se pela lateral esquerda, com a leitura do primeiro pixel localizado no canto superior esquerdo, em seguida, verifica se o valor do pixel é 0 ou 255. Se o valor do pixel for 0, o sistema efetua a leitura do próximo pixel da mesma coluna, se o valor do pixel for 255, o sistema registra a coordenada do pixel (linha/coluna), e interrompe a execução. Em um processo de repetição, o sistema efetua a varredura pixel a pixel, coluna a coluna, até localizar o primeiro pixel branco (255). Ao localizar o pixel branco, o sistema registra a coordenada do pixel na imagem. A Figura 3.31, apresenta as coordenadas registradas para lateral esquerda, identificando o primeiro pixel branco na linha 269 e na coluna 351.

Após a identificação do primeiro pixel branco da lateral esquerda, o sistema inicia o mesmo processo para a lateral direita, desta vez, iniciando a varredura pelo primeiro pixel localizado no canto superior direito. É possível identificar na lateral direita da Figura 3.31, que o primeiro pixel branco foi encontrado na linha 269 e na coluna 349.

Ao movimentar a câmera, o operador visualiza as coordenadas na tela. Quando os valores da lateral esquerda e lateral direita se igualam, ou, estão o mais próximos possível, significa que a câmera está alinhada e então é travada naquela posição. Por estar tratando de uma grande quantidade de pixels, dificilmente o alinhamento alcançará os quatro valores iguais. Os ajustes efetuados pelo sistema visualmente permitiram um alinhamento com uma diferença média de 2 pixels entre as posições superior e lateral. Experimentalmente foi possível constatar que uma diferença de até 5 pixels de diferença não impactaram na precisão do ajuste para o recorte o recorte da área da linha do laser. A Figura 3.32 apresenta o diagrama do fluxo realizado pelo algoritmo de alinhamento da câmera. O mesmo algoritmo é aplicado para a lateral direita e lateral esquerda da imagem.

Figura 3.32 – Fluxo do algoritmo de alinhamento da câmera



Fonte: O autor (2022)

3.3.3.3 Seleção da região de interesse

Ao concluir o alinhamento da câmera e pressionar a tecla "Enter", o sistema fechará o módulo de alinhamento da câmera e abrirá o módulo de seleção da região de interesse automaticamente. Será apresentado no monitor do computador a imagem captada pela câmera e a imagem onde a região de interesse é extraída.

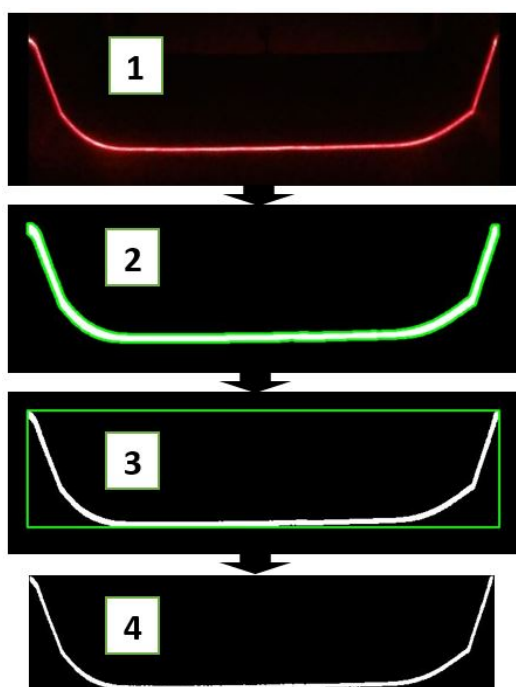
O processo de extração da região de interesse inicia-se com a captura da imagem pela câmera e seleção do frame, na sequência, é realizado o processo de conversão para escala cinza e limiarização da imagem. Este, é o mesmo processo descrito na seção 3.3.2.2, para converter a imagem em uma escala preto e branco.

A imagem convertida em matriz de pixels e, em escala preto e branco, apresentará a linha de laser na cor branca e o restante da imagem na cor preta. Neste momento, é aplicada a função *findContours* da biblioteca OpenCV na imagem. Esta função efetua uma varredura nos pixels da imagem e estabelece um contorno ao redor de toda área onde os pixels mudam de intensidade. Quando aplicado na imagem com pixels pretos e com os pixels da linha de laser brancos, a função criará um contorno ao redor de todos os pixels brancos. Após estabelecer o contorno

ao redor de toda área correspondente aos pixels brancos, a função complementar *boundingRect* realiza o processo de identificação das quatro extremidades da imagem, formando um retângulo ao redor da imagem da linha de laser.

Para efetuar o recorte da imagem, as coordenadas referentes aos quatro vértices do retângulo formado ao redor da linha de laser são transferidas para a função OpenCV *grabCut*. Esta função efetua a extração da *Region of Interest* (ROI), de acordo com os parâmetros indicados pelos vértices do retângulo. Na sequência, ao pressionar a tecla "Enter", a imagem recortada é salva em uma pasta do sistema com a extensão JPG. O processo de extração do ROI da imagem é apresentado na Figura 3.33.

Figura 3.33 – Imagem da extração da região de interesse (ROI).



Legenda: 1 - Imagem original captada pela câmera. 2 - Identificação do contorno da linha de laser na imagem. 3 - Identificação dos vértices referentes às extremidades da linha de laser na imagem. 4 - Aplicação do ROI para recortar a área da imagem referente a linha de laser.

Fonte: O autor (2022)

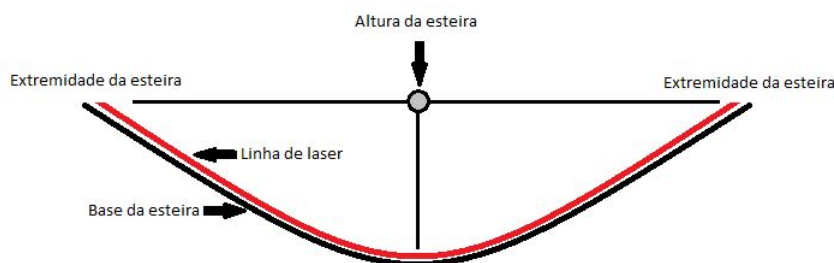
3.3.3.4 Cálculo da área em cm²

Ao estabelecer a imagem estática para referência de medida da esteira vazia, finaliza-se o processo de configurações iniciais e o processo de medição pode ser iniciado. Os módulos de configurações iniciais (alinhamento da câmera e extração do ROI), só precisam ser executados uma vez. Caso o alinhamento da câmera não seja alterado, os parâmetros serão sempre os

mesmos. Ainda assim, optou-se por manter os módulos ativos toda vez que o sistema for iniciado, desta forma, o operador poderá se certificar que o alinhamento da câmera está correto e a imagem estática permanecerá a mesma. Após pressionar a tecla "Enter" para salvar a imagem estática, o sistema de medição iniciará automaticamente.

Para execução do cálculo da medição da área em cm^2 , a medida da altura do vão da esteira deve estar previamente parametrizado no sistema. O operador deverá medir manualmente a altura da esteira e registrar a medida no sistema em centímetros. Para a medição da altura do vão da esteira, utiliza-se uma régua em MDF de 16m de espessura apoiada horizontalmente nas laterais direita e esquerda da esteira. Uma outra régua com escala em centímetros é posicionada verticalmente no centro da esteira. A medida da altura da esteira é aferida no ponto de intercessão entre as régua posicionadas horizontal e vertical. Este método apresentou-se eficiente nos ensaios realizados. Com o desenvolvimento do trabalho, pretende-se construir um modelo de ferramenta para facilitar a medição da altura do vão da esteira, que permita alcançar boa precisão e que evite a inserção de erro na medição por falha humana. A Figura 3.34 apresenta o ponto de referência para medir a altura da esteira.

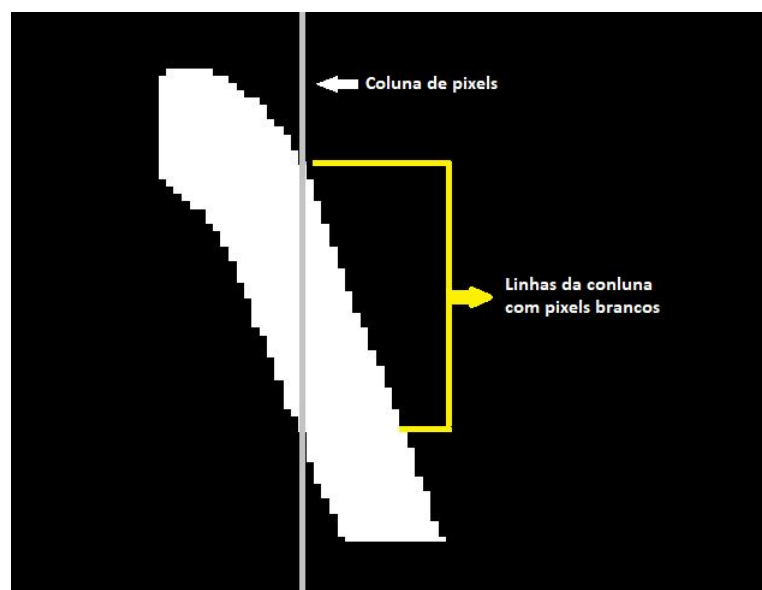
Figura 3.34 – Representação do ponto onde é encontrado a medida da altura da esteira



Fonte: O autor (2022)

Com o parâmetro da altura do vão da esteira, em centímetros, devidamente registrado no sistema, é possível iniciar o processo para medir a área do material em cm^2 . A primeira etapa deste módulo consiste em carregar a imagem estática, armazenada no módulo de extração da região de interesse. O algoritmo converterá a imagem com fundo preto e a linha de laser representada pela cor branca em uma matriz de pixels. Em seguida a matriz de pixels será submetida a um processo de repetição (*loop*), onde será aplicado um filtro para retornar o valor referente a posição das linhas que contenham pixels brancos. A Figura 3.35 apresenta uma parte da imagem da linha de laser ampliada, onde é possível visualizar uma coluna da matriz de pixels. Quando a coluna de pixels da imagem intercepta os pixels branco da linha de laser, é possível verificar que os pixels brancos correspondem à diversas linhas da que cruzam a coluna.

Figura 3.35 – Imagem de uma parte da linha de laser ampliada para visualização da coluna e linhas que com pixels brancos da coluna.



Fonte: O autor (2022)

Os valores referentes as linhas com pixels brancos filtrados na coluna, são armazenados em um vetor. Na sequência, o vetor é submetido a um algoritmo para calcular a mediana dos valores correspondentes às linhas da coluna. A mediana dos pixels brancos da coluna filtrada é adicionada a um somatório e o processo se repete até a última coluna da matriz da pixels da imagem. Após efetuar a varredura em todas as colunas da imagem estática, obtém-se a mediana total da linha de laser com a esteira vazia. Este valor é armazenado em uma variável e será aplicado ao cálculo da área em cm^2 quando for utilizado o frame captado pela câmera com a esteira em movimento.

Após registrar o valor total da mediana da linha de laser com a esteira vazia, inicia-se o processo de captura da imagem da câmera, com a esteira em movimento. A imagem captada pela câmera é processada em um sistema de repetição (*loop*), onde cada ciclo da repetição corresponde a um frame da imagem captada pela câmera. Ao carregar o frame da imagem, dentro do processo de repetição, o sistema utilizará as mesmas coordenadas da matriz de pixels, utilizadas para extrair a ROI e recortar a imagem estática. Com este processo, a imagem referente ao frame da câmera terá o mesmo tamanho da imagem estática.

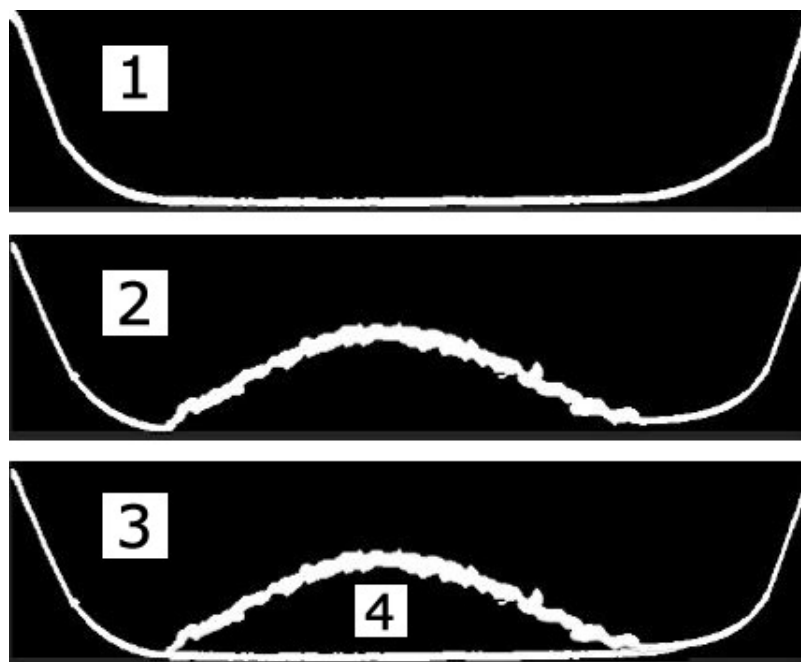
Ao efetuar o recorte do frame, o processo de filtragem dos pixels brancos inicia-se, em cada coluna do frame. O somatório da mediana dos pixels brancos de cada coluna é registrado. Em seguida, o total da mediana dos pixels brancos da imagem estática é subtraído do total da

mediana dos pixels brancos do frame. O resultado desta operação corresponde a área medida em pixels.

No protótipo desenvolvido em laboratório, enquanto a esteira em movimento estiver vazia, o total obtido com o somatório da mediana do frame será o mesmo valor do somatório da mediana da imagem estática da esteira vazia e o resultado da subtração será zero. Isso se deve ao fato da gaveta que simula a esteira estar sobre uma superfície plana. Em uma esteira localizada em ambiente de produção, é constatado que quando a esteira entra em movimento, acontece uma diferença devido a trepidação ocasionada pela tração. Ao ser preenchida pelo volume de grãos de café, a esteira em ambiente de produção se estabiliza. Este fenômeno deve ser considerado ao efetuar a implantação do protótipo em ambiente de produção para as devidas correções e calibração do sistema.

Quando a esteira estiver transportando algum material, a linha de laser do frame, representado pelos pixels brancos, irá contornar o volume, enquanto a linha da imagem estática com a esteira vazia, permanecerá a mesma. O somatório da mediana dos pixels brancos da imagem estática com a esteira vazia, será uma constante, permanecendo sempre o mesmo valor. O somatório da mediana dos pixels brancos do frame será variável, de acordo com o volume transportado. Ao subtrair o total da mediana dos pixels brancos da imagem estática, com indicação (1) na Figura 3.36, do total da mediana dos pixels brancos do frame registrado com determinado volume sendo transportado pela esteira, com indicação (2) na Figura 3.36, obtém-se como resultado a área total em pixels, representado pela indicação (4) da Figura 3.36. Na imagem (3) da Figura 3.36, é possível observar que as laterais da linha de laser, onde o espaço não é ocupado pelo volume, acontece a sobreposição dos pixels brancos da linha estática e dos pixels brancos do frame. Os valores atribuídos a esta sobreposição resultarão em zero. Com isso, apenas a quantidade total de pixels, referente à área ocupada pelo volume, representado pela indicação (4) da Figura 3.36, será retornado como resultado. Este resultado será armazenado na variável "areaPx". A cada leitura de um novo frame o cálculo é refeito e o valor atribuído à variável "areaPx" é atualizado.

Figura 3.36 – Representação gráfica da sobreposição da linha de laser para extração da área medida em pixels.

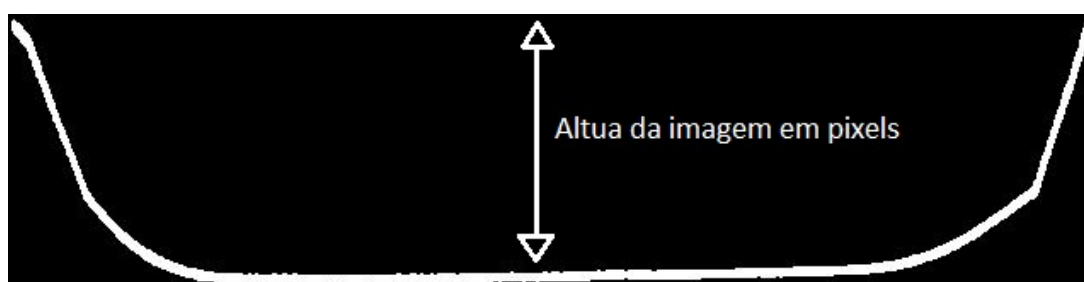


Legenda: 1 - Imagem estática da linha de laser com a esteira vazia. 2 - Imagem do frame com a linha de laser sobre o volume. 3 - Imagem do frame sobreposta a imagem estática. 4 - Representação da área medida.

Fonte: O autor (2022)

Com a definição da área medida em pixels atribuída à variável "areaPx", é possível aplicar o parâmetro da altura da esteira em centímetros, medida manualmente, para calcular a área medida em cm^2 . O primeiro passo para execução do cálculo é atribuir a uma constante a altura da imagem em cm aferida pelo operador, conforme demonstrado na Figura 3.34, é atribuída à constante nomeada de "altEst". O segundo passo para execução do cálculo é atribuir a uma constante a altura da imagem em pixels. Na Figura 3.37 é possível constatar que a altura da imagem indicada pela seta representa a altura das extremidades da esteira, portanto, esta é a representação da altura da esteira em pixels e será armazenada na constante "altfrm".

Figura 3.37 – Representação da altura da imagem da esteira em pixels.



Fonte: O autor (2022)

Com os valores devidamente atribuídos às constantes, a altura da esteira em cm "altEst" é dividida pela altura do frame em pixels "altFrm". O resultado do cálculo é atribuído à constante "altPx", conforme apresentado na Equação 3.1.

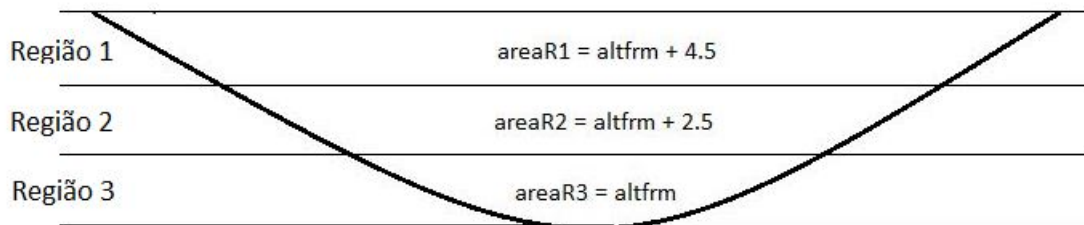
$$altPx = altEst / altFrm \quad (3.1)$$

Ao elevar a altura do pixel em cm "altPx", ao quadrado, obtém-se o cm² do pixel. Multiplicando o cm² do pixel pela área do volume em pixels "areaPx", obtém-se a área do volume em cm², conforme apresentado na Equação 3.2.

$$areaPx^2 = areaPx * altPx^2 \quad (3.2)$$

Conforme apresentado na Seção 3.3.3.1, para corrigir a distorção na imagem, foi efetuado o processo de calibração, onde, atribuiu-se um fator de cálculo para cada região da imagem. No processo de medição, a mesma divisão da imagem foi atribuída ao frame, resultando em três regiões de medição. Cada região do frame receberá o fator resultante da calibração acrescido ao total da altura da imagem em pixels. Por exemplo: a região 3, correspondente à parte mais baixa do frame, receberá o total de pixels correspondente a altura da imagem. A região 2, acima da região 1, receberá o total de pixels correspondente a altura da imagem mais o fator calibrado para a mesma região. Respectivamente, a região 3 receberá o fator calibrado acrescido na altura do frame em pixels. Um exemplo deste processo é apresentado na Figura 3.38

Figura 3.38 – Representação gráfica da divisão da imagem em regiões.

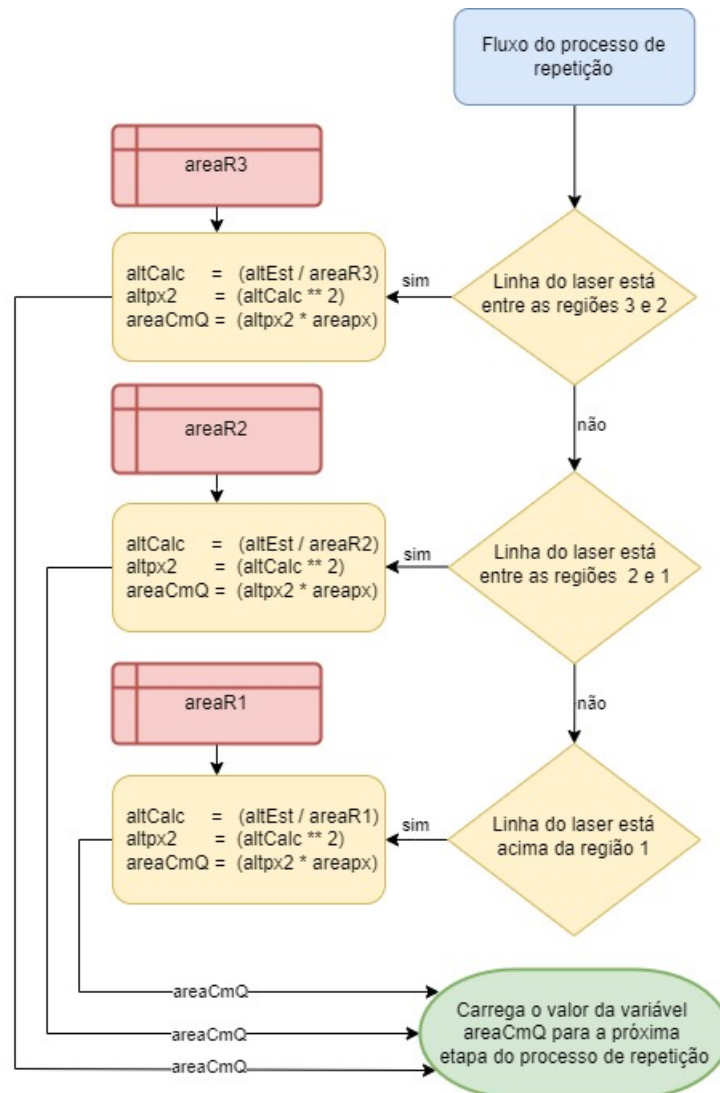


Fonte: O autor (2022)

Com este processo, a altura da esteira em pixels terá três fatores diferentes, onde cada fator será aplicado no cálculo do quadrado do pixels quando a altura do volume for elevando e atingindo a região superior. A divisão das regiões do frame, durante o processo de medição, é realizada com a implementação da verificação da posição da linha do laser no momento em que

o frame foi captado pela câmera. Então, é efetuada uma verificação condicional para aplicação do fator e realizar a operação para calcular a área do volume em cm^2 . A Figura 3.39 apresenta o processo realizado para calcular a área do volume em cm^2 de cada região do frame.

Figura 3.39 – Fluxo do processo de cálculo da área do volume em cm^2 de cada região do frame.



Legenda: **altCalc**: recebe o resultado da divisão da altura da esteira em cm pela altura do frame em pixels referente à região indicada. **altpx2**: recebe o resultado da altura do pixel em cm elevado ao quadrado. **areaCmQ**: recebe o resultado do pixel elevado ao quadrado multiplicado pelo total da área medida em pixels.

Fonte: O autor (2022)

Ao apurar a área em cm^2 do volume referente ao frame no mesmo processo de repetição, é possível passar para a próxima fase da medição e calcular o volume em centímetros cúbicos (cm^3), a cada segundo.

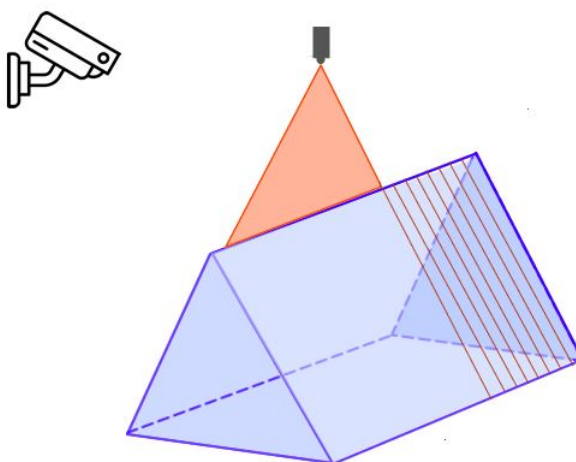
3.3.3.5 Cálculo do volume em cm^3

O módulo de cálculo do volume em cm^3 tem como principal função estabelecer a medida do volume transportado, ou seja, com a esteira em movimento. O processo de apuração do volume em cm^3 inicia-se com o registro da velocidade do movimento da esteira em centímetros por segundo. Este parâmetro é alcançado por meio da medição manual da velocidade da esteira utilizando um tacômetro. Sabemos que em uma unidade operacional de beneficiamento de grãos de café, a velocidade das esteiras é padronizado, portanto, este parâmetro não se altera e a velocidade registrada será um valor constante.

Prosseguindo com o mesmo processo de repetição, discutido nas seções anteriores, será adicionado o cálculo para apurar a medição do volume em cm^3 , a partir dessa etapa do processo. A base para o cálculo do volume em cm^3 são: o parâmetro com a velocidade da esteira em cm por segundo e a área do volume em cm^2 , registrada na etapa anterior, referente ao frame analisado no processo de repetição.

Para exemplificar a apuração da medida do volume em cm^3 , será utilizado um prisma triangular como modelo para o processo de medição. A medida em que o prisma triangular se movimenta sob a linha de laser, a câmera registrará uma sequência de frames. Cada frame corresponde a um processo de repetição do sistema que irá executar todo o cálculo para apurar a área em cm^2 e o volume em cm^3 . A Figura 3.40 exemplifica o prisma triangular se movimentando sob a linha de laser. A medida que o prisma vai avançando, são registrados os dados de medição em cada frame.

Figura 3.40 – Representação do registro dos frames em um prisma triangular em movimento.



Fonte: O autor (2022)

Para este estudo, foi utilizado um modelo de registro médio de 30 frames por segundo (FPS). Portanto, obtém-se em média 30 medições da área em cm^2 por segundo. Sabendo que a esteira percorre 14,5 cm a cada segundo, é possível dividir 14,5 pela quantidade de frames registrados naquele segundo, assim, encontra-se a distância em cm entre cada frame registrado. Por exemplo: 14,5 cm dividido por 30 frames é igual a 0,4833 cm de distância entre cada frame. Ao efetuar um somatório de todas as áreas em cm^2 e multiplicar pela distância entre cada frame registrado no segundo corrente, obtém-se o volume em cm^3 do segundo. A exemplo do cálculo do volume de um prisma triangular, onde a base multiplicada pela altura, dividido por dois, vezes o comprimento, é determinado o volume em cm^3 , ao multiplicar todas as áreas em cm^2 registradas no segundo, pela distância percorrida em um segundo (comprimento do volume), obtém-se o volume em cm^3 registrado no segundo. Este processo evidencia que quanto mais frames por segundo o sistema for capaz de registrar, melhor vai ser a precisão, uma vez que os intervalos entre os frames será diminuída e um número maior de alterações no volume dos grãos e café serão registrados. Em contrapartida, aumentar o número de frames por segundo requer equipamentos com maior capacidade de processamento e consequentemente com um custo mais elevado. Este fator deve ser levado em consideração em uma avaliação de custo benefício.

Para implementar o cálculo no sistema, seguindo o mesmo processo de repetição onde foi aferida a área em cm^2 , o módulo de cálculo do volume em cm^3 inicia-se com o registro do segundo corrente. Um marcador de tempo é implementado por meio da função Python *datetime*, onde em cada frame registrado, é verificado se o segundo permanece o mesmo e uma contagem é realizada; ao mudar para o próximo segundo, ficará registrado a quantidade de frames processados. Ao dividir o fator constante da velocidade da esteira em centímetros por segundo, pela quantidade de frames registrado no segundo, encontra-se a distância entre cada frame. Multiplicando a distância entre cada frame pelo somatório das áreas em cm^2 , encontraremos o volume transportado no segundo. A Tabela 3.1 corresponde a tabela do banco de dados onde foram registrados os dados da medição em um segundo. Neste exemplo, é possível observar que foram registradas 32 medições no segundo 41, correspondentes aos 32 frames lidos neste segundo. Os experimentos realizados indicam uma variação média de dois registros para mais ou para menos em cada segundo. Na medida em que a distância entre os registros é calculada de acordo com o total de registros acumulados no segundo, esta variação não interfere no resultado do cálculo.

Ao final da tabela é possível constatar que ao avançar para o próximo segundo, reinicia-se a contagem de frames.

Tabela 3.1 – Reprodução da tabela do banco de dados *medicao_item*, onde são armazenados os dados de cada processo de medição.

id_med_item	fk_medicao	item_area_med	item_hora	item_num_seg	item_segundo
20	14	727.500	20:38:41	1	41
21	14	693.900	20:38:41	2	41
22	14	693.800	20:38:41	3	41
23	14	693.800	20:38:41	4	41
24	14	730.900	20:38:41	5	41
25	14	730.900	20:38:41	6	41
26	14	853.800	20:38:41	7	41
27	14	853.500	20:38:41	8	41
28	14	853.600	20:38:41	9	41
29	14	882.600	20:38:41	10	41
30	14	882.400	20:38:41	11	41
31	14	900.600	20:38:41	12	41
32	14	900.400	20:38:41	13	41
33	14	900.000	20:38:41	14	41
34	14	980.400	20:38:41	15	41
35	14	995.000	20:38:41	16	41
36	14	995.000	20:38:41	17	41
37	14	995.000	20:38:41	18	41
38	14	1.000.400	20:38:41	19	41
39	14	1.001.300	20:38:41	20	41
40	14	1.025.400	20:38:41	21	41
41	14	1.025.300	20:38:41	22	41
42	14	1.025.300	20:38:41	23	41
43	14	1.034.400	20:38:41	24	41
44	14	1.034.500	20:38:41	25	41
45	14	1.044.200	20:38:41	26	41
46	14	1.063.200	20:38:41	27	41
47	14	1.063.200	20:38:41	28	41
48	14	1.062.300	20:38:41	29	41
49	14	1.047.800	20:38:41	30	41
50	14	1.047.900	20:38:41	31	41
51	14	1.054.700	20:38:41	32	41
52	14	1.055.500	20:38:42	1	42

Legenda: **id_med_item**: chave primária da tabela. **fk_medicao**: chave estrangeira da tabela medição para relacionar o item medido à uma medição. **item_area_med**: registro da área em cm² computada em cada frame. **item_hora**: registro da medição do frame em hora/minuto/segundo. **item_num_seg**: contagem dos frames registrados no segundo. **item_segundo**: registro do segundo corrente.

Fonte: O autor (2022)

Ao finalizar a medição, seja com o desligamento da esteira ou apenas para iniciar a medição de um novo volume, pressionando a tecla "enter", o operador interrompe o processo de repetição. Neste momento, o sistema carrega os dados armazenados no banco de dados, correspondentes à medição e efetua um somatório de todas os volumes em cm³ computados em cada segundo. Na sequência, o sistema apresenta na tela o volume total calculado naquele

processo de medição. Outros cálculos podem ser obtidos neste processo, como: o total em quilos e o total em sacas. Para isso, basta indicar o fator de conversão do peso equivalente a 1 cm³ de grãos de café.

3.3.3.6 Armazenamento de Dados

No início do desenvolvimento do sistema de medição, os dados eram gravados em arquivos, no formato CSV. Os dados de cada experimento realizado geravam um arquivo CSV e posteriormente era analisado por meio do software Excel. Este método demonstrou-se eficiente para os experimentos de medição de área em cm². Com o desenvolvimento do módulo para medição volumétrica em cm³ com a esteira em movimento, observou-se a necessidade de utilizar um método mais robusto, e que permitisse relacionar os dados da medição e sua verificação de forma automática. Para atender essa necessidade do projeto, foi implementado o banco de dados MariaDB em sua versão 10.0. O banco de dados MariaDB foi selecionado para integrar este projeto por ser um banco de dados gratuito e facilmente implementado em servidores web. Outro fator preponderante, é o fato de ser desenvolvido pelo mesmo grupo desenvolvedor do banco de dados MySQL, e por isso, oferecer confiabilidade e estar amplamente difundido, principalmente para utilização em sistemas web. Neste contexto, é possível que o sistema de medição volumétrica de grãos de café, possa ser executado junto a esteira de transporte e os dados armazenados localmente e replicados para um banco de dados em nuvem. Desta forma, além de manter um backup dos dados em nuvem, também poderão ser consumidos e analisados por sistemas web e disponibilizados para ser acessados de qualquer lugar.

Para execução do banco de dados no mesmo computador onde o sistema de medição volumétrica é executado, foi utilizado o servidor MySQL disponibilizado pela ferramenta XAMPP em sua versão 3.3.0. O gerenciador de banco de dados phpMyAdmin em sua versão 5.1.3, foi utilizado para criação de tabelas e visualização de dados.

A modelagem das tabelas do banco de dados foi planejada para atender os requisitos de configuração e medição. Uma tabela nomeada "configuracoes" foi criada para armazenar os parâmetros de configuração do sistema e utilizados como base para os cálculos nas medições. A indicação dos campos da tabela e configurações de sua descrição dos dados armazenados em cada campo são apresentados a seguir:

id_config: chave primária da tabela.

cfg_alt_esteira: parâmetro da altura da esteira medida em centímetros.

cfg_area_min_medicao: parâmetros estabelece volume mínimo para início do registro da medição.

cfg_cm_segundo: parâmetro da velocidade de movimento da esteira em centímetros por segundo.

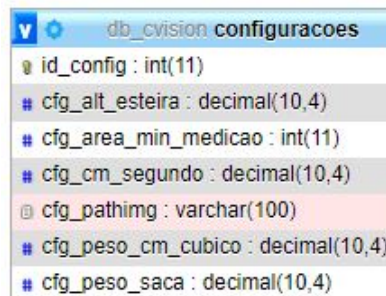
cfg_pathimg: caminho do diretório para carregar a imagem estática de referência da esteira vazia.

cfg_peso_cm_cubico: parâmetro de conversão do peso do café em centímetros cúbicos, utilizado para apresentar o total medido em quilogramas.

cfg_peso_saca: parâmetro do peso da saca de café, utilizado para apresentar o total medido em sacas.

A Figura 3.41 apresenta a tabela "configuracoes" modelada no sistema phpMyAdmin.

Figura 3.41 – Tabela configuracoes do banco de dados para armazenamento dos parâmetros do sistema e para cálculo das medições.



id_config	cfg_alt_esteira	cfg_area_min_medicao	cfg_cm_segundo	cfg_pathimg	cfg_peso_cm_cubico	cfg_peso_saca
int(11)	decimal(10,4)	int(11)	decimal(10,4)	varchar(100)	decimal(10,4)	decimal(10,4)

Fonte: O autor (2022)

Para armazenamento dos dados de medição foram modeladas três tabelas no banco de dados. Estas tabelas relacionam entre si, para garantir que os dados que compõe uma mesma medição estejam associados, permitindo que sua recuperação e visualização sejam unificadas. Outra propriedade importante do relacionamento é impedir que um dado fique sem referência, por exemplo: um dados referente a uma medição fique sem a referência de a qual medição pertence. Para garantir a consistência do banco de dados, a propriedade de restrição da relação entre as tabelas foi configurada com "CASCADE" para a execução do comando delete. Desta forma, caso a tabela medição seja excluída, os itens referentes a aquela medição e os totais da medição, também serão excluídos.

As tabelas para armazenamento dos dados de medição foram modeladas em três classes. A tabela "medicao", armazena a data e o rótulo da medição. Ao iniciar uma medição, o operador poderá rotular a medição com o tipo do café ou o nome do cliente que está a quem o café beneficiado pertence, entre outros. A chave primária armazenada no campo "id_medicao", da tabela "medicao", é utilizado como referência para o relacionamento com as tabelas "medicao_item" e "medicao_total". Desta forma, é possível saber a qual medição pertencem os itens e os totais. Os campos das tabelas e a descrição de cada campo são apresentados a seguir:

Campos da tabela medicao:

id_medicao: armazena a chave primária da tabela medicao.

med_data: armazena data e hora do início da medição.

med_rotulo: armazena o rótulo ou título da medição.

Campos da tabela medicao_item:

id_med_item: armazena a chave primária da tabela medicao_item.

fk_medicao: armazena a chave estrangeira para relacionamento com a tabela medicao.

item_area_med: armazena a área em cm² apurada em cada frame processado.

item_hora: armazena hora, minuto e segundo em que a área em cm² foi apurada.

item_num_seg: armazena a contagem dos frames registrados em cada segundo. A contagem reinicia a cada novo de segundo.

item_segundo: armazena o segundo corrente.

Campos da tabela medicao_total:

id_med_total: armazena a chave primária da tabela medicao_total.

fk_medicao: armazena a chave estrangeira para relacionamento com a tabela medicao.

total_area: armazena o total do somatórios das áreas medidas em cada segundo.

total_cuboseg: armazena resultado do calculo para apuração do volume em cm³ de cada segundo.

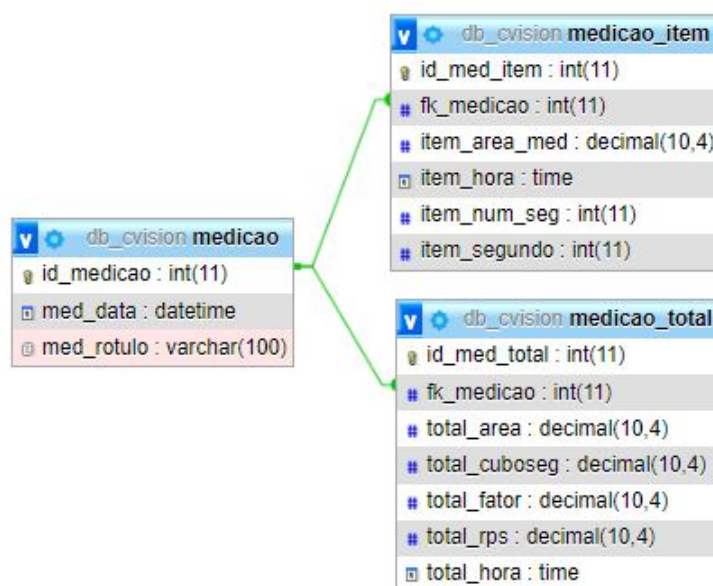
total_fator: armazena o fator para cálculo da medição em cm^3 aplicado em cada segundo. Este fator é alcançado dividindo a velocidade da esteira pelo total de frames registrados a cada segundo.

total_rps: armazena o total de frames registrados a cada segundo.

total_hora: armazena a hora, minuto e segundo em que o conjunto de frames foi processado.

A Figura 3.42 apresenta as tabelas `medicao`, `medicao_item` e `medicao_total` e o relacionamento existente entre elas.

Figura 3.42 – Tabela configurações do banco de dados para armazenamento dos parâmetros do sistema e para cálculo das medições.



Fonte: O autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados. Para melhor organizar a discussão, os resultados foram divididos em três seções. Na seção 4.1 são apresentados os resultados dos experimentos com o sistema de medição volumétrica do fluxo de grãos de café por visão computacional.

4.1 Resultados experimentais referentes à segunda fase da pesquisa

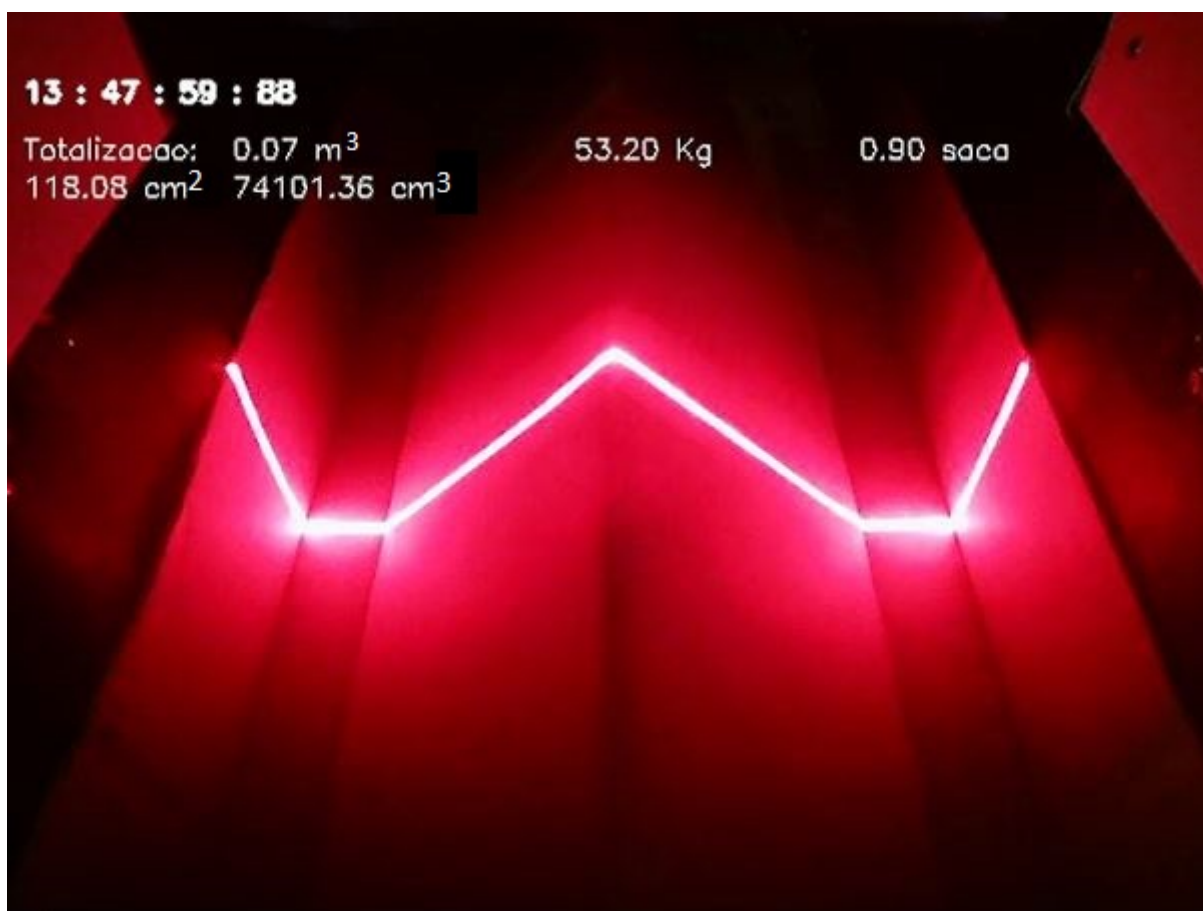
Na segunda fase da pesquisa, os esforços foram concentrados no desenvolvimento e aprimoramento da proposta de visão computacional, haja vista os resultados preliminares encontrados na primeira fase da pesquisa.

4.1.1 Sistema de visão computacional para medição volumétrica em esteira transportadora

O sistema de visão computacional para medição do fluxo de grãos em esteira transportadora foi concebido por meio do processo de implementação, experimentação, análise e melhorias. Inicialmente, foi estudado o método com maior eficiência para capturar o valor da posição da linha de laser na imagem e converter esse valor em uma medição de área em cm^2 . Diversos experimentos foram realizados até chegar a um modelo que realizasse o processo de forma rápida e sem necessidade de grande recurso computacional. Na sequência, foi estudado o método para calcular o volume transportado com a esteira em movimento. Novamente, foram realizados diversos experimentos e métodos de implementação com o objetivo de aproximar o sistema de medição e atingir a eficiência almejada. Para aliar este objetivo à melhor exatidão na medição volumétrica dos grãos de café, foi desenvolvido um protótipo e foram realizados diversos experimentos em laboratório, os resultados serão apresentados nesta seção.

Para viabilizar o acompanhamento do processo de medição em tempo real, foi implementado a exibição dos dados na imagem captada pela câmera e exibida na tela do computador. A Figura 4.1 apresenta a tela com a imagem capturada pela câmera, onde os dados da medição são apresentados. As informações apresentadas são: um *timer* com hora, minuto, segundo e milésimo de segundo; a totalização da medição em m^3 , quilograma, e saca; o somatório da área em cm^2 ; e o somatório em cm^3 . A exibição dos dados da medição na imagem, foram importantes para o acompanhamento do processo durante a realização dos experimentos.

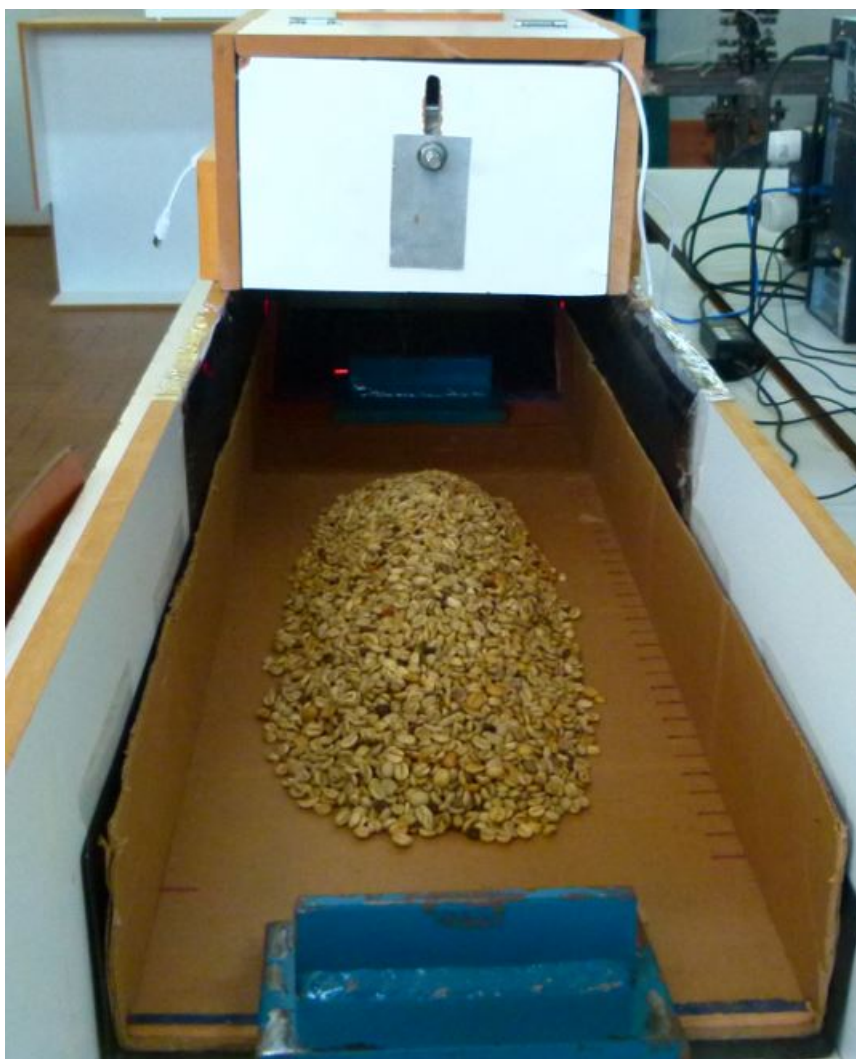
Figura 4.1 – Tela com dados da medição apresentada pelo sistema de processamento de imagens.



Fonte: O autor (2022)

Após a primeira versão funcional do sistema de medição volumétrica de grãos de café por visão computacional, iniciou-se o processo de realização de experimentos para validar o sistema. Para estabelecer uma amostra dos experimentos para compor a descrição desse trabalho, foram utilizados diferentes volumes de grãos de café. A Figura 4.2 apresenta o primeiro volume de grãos de café sobre a gaveta deslizante, posicionada no início da canaleta para ser submetido à medição.

Figura 4.2 – Volume de 2000 cm³ de grãos de café.



Fonte: O autor (2022)

A amostra dos experimentos realizados para validação do sistema de medição volumétrica foi dividida em três volumes: 2000 cm³, 4000 cm³ e 6000 cm³, em 10 repetições para cada volume. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, em que erros relativos percentuais médios de $1,4 \pm 0,74\%$, $1,35 \pm 1,02\%$ e $1,07 \pm 0,75\%$ foram obtidos para os volumes de 2000 cm³, 4000 cm³ e 6000 cm³, respectivamente.

Tabela 4.1 – Medição realizada com volume de 2000 cm³

Volume Real (Cm ³)	Volume Apurado (Cm ³)	Erro Absoluto (Cm ³)	Erro Relativo (%)
2.000,00	1.989,32	10,68	0,53
2.000,00	1.979,88	20,12	1,01
2.000,00	1.979,09	20,91	1,05
2.000,00	1.954,10	45,90	2,30
2.000,00	1.948,27	51,73	2,59
2.000,00	1.953,45	46,55	2,33
2.000,00	2.018,77	18,77	0,94
2.000,00	2.017,37	17,37	0,87
2.000,00	1.968,94	31,06	1,55
2.000,00	2.016,20	16,20	0,81

Fonte: O autor (2022)

Tabela 4.2 – Medição realizada com volume de 4000 cm³

Volume Real (Cm ³)	Volume Apurado (Cm ³)	Erro Absoluto (Cm ³)	Erro Relativo (%)
4.000,00	3.882,87	117,13	2,93
4.000,00	3.992,10	7,90	0,20
4.000,00	4.024,33	24,33	0,61
4.000,00	4.068,47	68,47	1,71
4.000,00	3.895,43	104,57	2,61
4.000,00	3.902,42	97,58	2,44
4.000,00	3.962,36	37,64	0,94
4.000,00	3.974,63	25,37	0,63
4.000,00	3.992,33	7,67	0,19
4.000,00	4.048,07	48,07	1,20

Fonte: O autor (2022)

Tabela 4.3 – Medição realizada com volume de 6000 cm³

Volume Real (Cm ³)	Volume Apurado (Cm ³)	Erro Absoluto (Cm ³)	Erro Relativo (%)
6.000,00	6.131,49	131,49	2,19
6.000,00	5.948,07	51,93	0,87
6.000,00	6.009,16	9,16	0,15
6.000,00	6.110,54	110,54	1,84
6.000,00	5.988,15	11,85	0,20
6.000,00	6.028,60	28,60	0,48
6.000,00	6.035,17	35,17	0,59
6.000,00	6.119,96	119,96	2,00
6.000,00	5.942,42	57,58	0,96
6.000,00	5.917,36	82,64	1,38

Fonte: O autor (2022)

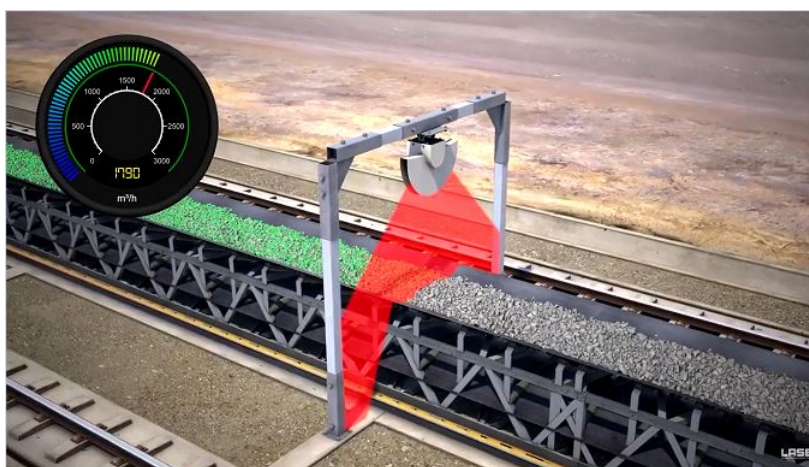
Ao analisar os resultados apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, é possível observar a variação nos valores apurados nas medições. Fatores relacionados à estrutura de experimentos podem influenciar esta variação. Como os grãos de café estão posicionados sobre uma gaveta montada em uma folha de papelão, ao ser puxada pelo cabo conectado ao motor, durante o arraste pode ocorrer pequenas interrupções causadas pelo atrito entre a gaveta e a estrutura.

Outro fator que pode influenciar a variação do erro é quando o cabo está enrolando na polia do motor para tracionar a gaveta. Por vezes, pode ocorrer do cabo que esta se enrolando na polia sobrepor o cabo que já está enrolado, causando uma pequena variação na velocidade da gaveta. Por se tratar de um pequeno volume de grãos de café, uma pequena interferência na velocidade pode causar uma variação significativa no resultado da medição. Entende-se que em uma esteira de transporte localizada em ambiente operacional de rebeneficiamento de grãos de café, ocorrerão outros fatores que poderão influenciar o erro nas medições. Com a realização de experimentos neste ambiente, pretende-se efetuar um estudo aprofundado dos fatores que influenciam o erro, e elaborar soluções para mitigação, tanto no software quanto na estrutura de fixação da câmera e do emissor de laser.

Para avaliar questões técnicas referentes aos padrões de erro e o custo de tecnologias similares já disponíveis no mercado foi efetuada uma pesquisa junto a empresas que comercializam estas tecnologias e duas delas retornaram com informações sobre seus produtos.

Em Maio de 2022 foi realizado o orçamento por *e-mail* junto à empresa alemã *LASE Industrielle Lasertechnik GmbH*, de seu sistema de medição volumétrica em correia transportadora, onde foi informado pela empresa o preço de 14.000 euros para o produto *LaseBVC - Bulk Volume Conveyor*. Este sistema de medição utiliza uma tecnologia laser scanner para leitura dos dados e não foi possível obter informações sobre a precisão nas medições e variações de erro deste produto. A Figura 4.3 apresenta a imagem do *LaseBVC - Bulk Volume Conveyor* utilizada pela empresa para divulgação.

Figura 4.3 – Sistema de medição em esteira transportadora fornecido pela empresa alemã *LASE Industrielle Lasertechnik GmbH*



Fonte: (LASE, 2023)

A empresa brasileira Marrari, forneceu o orçamento do seu produto MR600 VOLUME – X, medição de volume em transportadores de correia em Maio de 2022. O valor deste produto, informado pela empresa via *e-mail* foi de R\$ 96.000,00. A empresa informou que este produto alcança uma precisão média de 2% nas medições. A Figura 4.4 apresenta a imagem do produto MR600 VOLUME – X utilizada pela empresa para divulgação.

Figura 4.4 – Sistema de medição em esteira transportadora fornecido pela empresa brasileira Marrari



Fonte: (MARRARI, 2023)

O custo atual dos materiais para desenvolvimento do protótipo do sistema de visão computacional para medição volumétrica do fluxo de grãos de café em esteira transportadora, desenvolvido neste trabalho, é de R\$ 6.371,90. A relação dos materiais e os respectivos valores orçados em Fevereiro de 2023 são apresentados na Tabela 4.4

Tabela 4.4 – Custo dos materiais para desenvolvimento do protótipo apresentado neste trabalho

Descrição	Qtd.	Preço
Emissor de linha de laser 100mW 650nm Vermelho	1	R\$ 177,00
Fonte 5v 2a Plugue P4 5.5mm Bivolt 110v 220v (Para ligar o emissor de laser)	1	R\$ 18,00
Webcam Lenovo 300 FHD FULL HD	1	R\$ 399,00
Sistema em Python para Cálculos de Medição	1	R\$ 0,00
Suporte para Webcam e Laser (Valor estimado)	1	R\$ 200,00
Computador Dell OptiPlex 3000 - i5, 8Gb Ram, SSD 256 GB	1	R\$ 5.131,00
Motinor PC LED 17 HDMI	1	R\$ 367,20
Multilaser Combo Mouse Teclado	1	79,90
TOTAL DO CUSTO		R\$ 6371,90

Fonte: O Autor (2023)

Diante dos resultados alcançados com os experimentos, é possível avaliar que o sistema desenvolvido neste trabalho representa uma solução viável para a medição volumétrica de grãos

de café em esteira transportadora, devido às suas características relevantes, como o baixo custo para o seu desenvolvimento e facilidade de implantação.

O sistema foi testado em uma esteira de transporte localizada em uma unidade operacional de beneficiamento de grãos de café, porém foram encontradas dificuldades para a realização de experimentos neste ambiente devido ao fato dos equipamentos estarem em processo de transporte e não ser possível interromper o trabalho para realização de repetições nas medições, tornando inviável a realização de experimentos controlados para aferir a precisão final.

Com a indisponibilidade de uma esteira de transporte real para a realização dos experimentos, a estrutura construída em laboratório para simular o café em movimento foi utilizada para realização dos experimentos. Por meio dessa estrutura, foi possível realizar os testes necessários para a implementação do sistema. O processo de movimentação dos volumes de café foi atendido em seus requisitos mínimos. Ainda assim, entende-se como necessário a realização dos experimentos em esteiras transportadoras e com volumes maiores de grãos de café para realização de ajustes e adaptações do sistema ao ambiente de produção. Espera-se realizá-los em trabalhos futuros.

Conforme apresentado na seção 3.3.3.1, com a realização dos experimentos durante o processo de desenvolvimento do sistema de medição, foi identificado que a distorção da imagem captada pela câmera exercia influência nas medições. A medida que se aumentava o volume de grãos, o erro aumentava. Estudos e testes de implementações foram realizados com objetivo de corrigir a distorção. Com o avanço dos estudos e testes, foi implementado um método para calibrar a medição na tentativa de reduzir o erro causado pela distorção. O método descrito na seção 3.3.3.1 apresentou-se como uma possível solução, ainda assim, entende-se que um estudo aprofundado sobre as características da distorção e métodos para mitigação do erro deva ser realizado para aprimorar o sistema e com isso, alcançar maior precisão nas medições. Ao comparar as dimensões da esteira de transporte utilizada em ambiente operacional de rebeneficiamento de grãos de café com as dimensões da estrutura de experimentos utilizada em laboratório, é possível considerar a necessidade de uma maior divisão nas regiões para mitigar a distorção na imagem. Outro fator que deve ser estudado com maior profundidade é o sistema de calibração do fator de distorção. O aprimoramento do sistema de calibração poderá resultar em maior precisão nas medições. Em trabalhos futuros, pretende-se realizar um estudo aprofundado sobre estes fatores ao efetuar experimentos em esteira transportadora utilizada em ambiente operacional de rebeneficiamento de grãos de café.

Para a continuidade deste trabalho, objetivando o desenvolvimento de um produto final e, aplicável em esteiras transportadoras, deve-se avaliar alguns fatores que podem conduzir ao aprimoramento do protótipo. O *hardware* utilizado para o processamento de imagens utilizado para o desenvolvimento do protótipo foi um computador. Outros modelos de *hardware* para processamento de imagens, como FPGA, Raspberry PI, Nvidia Jetson Nano, podem oferecer um bom custo benefício ao sistema para processamento em borda, ou seja, próximo ao equipamento onde a medição é realizada. Outra possível solução, enviar as imagens captadas pela câmera para uma central de processamento, com *hardwares* mais robustos, neste caso, deve-se atentar para o sistema de comunicação de dados. A comunicação de dados poderá ser realizada por cabeamento ou *wireless*, desde que se atente para o *delay* causado pela distância em que os dados irão trafegar. Por se tratar de um sistema de medição volumétrica de grãos de café, onde todo processamento de imagens e cálculos são realizados em um software desenvolvido em uma linguagem de programação altamente adaptável em diversos sistemas operacionais e modelos de hardware, esta solução se torna igualmente adaptável a diversos ambientes. A continuidade dos trabalhos para aprimoramento desta solução poderá indicar novas possibilidades que indiquem um melhor custo benefício, assim como novas aplicações.

Contudo, é possível avaliar que a tecnologia aplicada para o desenvolvimento do sistema de medição proposto, atende ao seu propósito e abre um precedente para continuidade de estudos que possam aprimorá-la e disponibilizar ao mercado um sistema de medição volumétrica de grãos de café, eficiente e de baixo custo.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a proposta inicial do deste trabalho, onde objetivou-se a descoberta de tecnologias viáveis para a medição volumétrica de grãos de café transportados internamente em unidade operacional de beneficiamento de grãos de café, foram identificadas tecnologias em trabalhos relacionados e produtos similares disponíveis no mercado. Dentre as tecnologias selecionadas para estudo neste trabalho, a visão computacional para medição volumétrica de grãos de café, demonstraram maior eficiência e aplicabilidade nos processos e equipamentos da unidade operacional de beneficiamento de grãos de café.

Uma análise efetuada pela equipe envolvida no projeto, considerou o desenvolvimento do protótipo de visão computacional para medição volumétrica de grãos de café com maior viabilidade de execução em laboratório e maior possibilidade de aplicações em uma unidade operacional de rebeneficiamento de grãos de café. Foram considerados fatores como: custo para montagem da estrutura de experimentos, possibilidade de continuidade do desenvolvimento e por se tratar de um método inovador para medição por meio de imagens.

Pesquisas realizadas para verificar a existência de tecnologias para medição volumétrica com a mesma base tecnológica não identificaram produto no mercado ou estudo que utilizasse o mesmo método de processamento de imagens e cálculos empregados neste trabalho.

Com o trabalho de implementação e experimentação desenvolvido, alcançou-se um protótipo funcional do sistema de visão computacional para medição volumétrica do fluxo de grãos de café. Como trabalhos futuros, pretende-se investigar com maior profundidade as fontes de variações de erros e aperfeiçoá-lo em ambiente industrial para sua conversão em um produto comercial.

REFERÊNCIAS

- ACETO, G.; PERSICO, V.; PESCAPÉ, A. A survey on information and communication technologies for industry 4.0: State-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 21, n. 4, p. 3467–3501, 2019.
- BENITEZ, R. *et al.* Sensors calibration for metrology 4.0. In: **2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0 IoT)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 296–299.
- BORÉM, F. **Pós-colheita do café**. Lavras/MG: Editora da UFLA, 2007. 128-157 p.
- BRADSKI, G. The opencv library. **Dr. Dobb's Journal of Software Tools**, 2000.
- CAMARGO, A. P. d. **Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga**. 125 p. Dissertação (Mestrado) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2010.
- CECAFE. **Relatório mensal – dezembro 2020. Conselho dos Exportadores de Café do Brasil**. [S.l.]: Embrapa, 2020.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: café. V.10, Safra 2023 , N.1 Primeiro levantamento**. [S.l.]: Observatório Agrícola, 2023.
- D'EMILIA, G.; GASPARI, A. Data validation techniques for measurements systems operating in a industry 4.0 scenario a condition monitoring application. In: **2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 112–116.
- ELETROGATE. **Balança Digital com Arduino e Célula Strain Gauge**. 2023. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/balanca-digital-com-arduino-aprenda-a-usar-a-celula-de-carga/>> Acesso em Janeiro de 2023.
- FAPANNI, T. *et al.* Novel piezoelectric sensor by aerosol jet printing in industry 4.0. In: **2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 379–383.
- FERRÃO, R. G. *et al.* **Café Conilon**. Vitória/ES: Incaper, 2017. 42-43 p. ISBN 978-85-89274-26-5.
- FOJTÍK, D. Measurement of the volume of material on the conveyor belt measuring of the volume of wood chips during transport on the conveyor belt using a laser scanning. In: **Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 121–124.
- GOMEZ, R.; TORRES, L. Innovative technologies for coffee processing and quality improvement. **Journal of Food Science**, v. 86, n. 4, p. 1051–1060, 2021.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HAMDAN, M. *et al.* Mass estimation from images using deep neural network and sparse ground truth. In: **2019 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1987–1992.

HASNAN, N. Z. N.; YUSOFF, Y. M. Short review: Application areas of industry 4.0 technologies in food processing sector. In: **2018 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

HOBERGE, S. M. zu *et al.* Piezoelectric sensor array with evaluation electronic for counting grains in seed drills. In: **IEEE Africon '11**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6.

ISA, M.; WU, Z. Microwave doppler radar sensor for solid flow measurements. In: **2006 European Microwave Conference**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1508–1510.

KAEHLER, J. A. **OpenCV 3 Blueprints**. [S.l.: s.n.], 2016.

KUSTER, M. A measurement information infrastructure's benefits for industrial metrology and iot. In: **2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 479–484.

LASE. **LaseBVC Bulk Volume Coveyor**. 2023. Disponível em: <<https://lase-solutions.com/products/bulk-material/lasebvc/>> Acesso em Janeiro de 2023.

LI, Z.-L. *et al.* 3d reconstruction of material transportation status on belt conveyors. In: **2015 12th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 168–172.

LIU, Y. *et al.* From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 6, p. 4322–4334, 2021.

MARRARI. **MR600 VOLUME – X**. 2023. Disponível em: <<https://www.marrari.com.br/produto/mr600-medidor-de-volume-em-linha/>> Acesso em Janeiro de 2023.

MARTINS, A. L. **História do café/ Ana Luiza Martins**. 2ª. ed. São Paulo/SP: Contexto, 2017. 42-43 p. 978-85-7244-377-7.

MEDEIROS, R.; RODRIGUES, P. A economia cafeeira no brasil e a importância das inovações para essa cadeia. **A Economia em Revista**, v. 25, p. 2, 07 2017.

MURATA. **Piezoelectric Sound Components: Application Manual**. 2023. Disponível em: <<https://www.murata.com/ /media/webrenewal/support/library/catalog/products/-sound/p15e.ashx>> Acesso em Janeiro de 2023.

OJO, O. O. *et al.* Potential impact of industry 4.0 in sustainable food supply chain environment. In: **2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 172–177.

PRATT, W. K. **Digital Image Processing: PIKS Inside**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

RODRÍGUEZ, J. P. *et al.* A computer vision system for automatic cherry beans detection on coffee trees. **Pattern Recognition Letters**, v. 136, p. 142–153, 2020. ISSN 0167-8655.

SILVA, L. C.; MORELI, A. P.; JOAQUIM, T. N. M. **Café: beneficiamento e industrialização**. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C.; **Café na Amazônia**. Brasília/DF: Embrapa, 2015.

SONKA, M.; HLAVAC, V.; BOYLE, R. **Image Processing, Analysis, and Machine Vision**. [S.l.]: Cengage Learning, 2014.

SOTT, M. K. *et al.* Precision techniques and agriculture 4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: State of the art, challenges and future trends. **IEEE Access**, v. 8, p. 149854–149867, 2020.

SOTT, M. K. *et al.* Precision techniques and agriculture 4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: State of the art, challenges and future trends. **IEEE Access**, v. 8, p. 149854–149867, 2020.

SURYANA, A.; MUNTINI, M. S. Strain gage for mass sensor using cantilever beam. In: **2017 International Conference on Computing, Engineering, and Design (ICCED)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.

SYAL, A.; GARG, D.; SHARMA, S. Apple fruit detection and counting using computer vision techniques. In: **2014 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.

VEHEC, I.; LIVOVSKY, L. Flexible resistive sensor based on velostat. In: **2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.

WANG, H.; HU, J.; GAO, L. Design and performance test of a test rig for grain flow sensor. In: **2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1442–1445.

WANG, H. G.; YANG, W. Q.; WU, Z. P. Measurement of external-solids circulation flux in a circulating fluidized bed by electrical capacitance tomography and microwave doppler radar. In: **2018 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.

WILLIAM, D. C. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**. 5ª edição. ed. [S.l.]: LTC, 2000.

WILLIAM, D. C. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**. 9ª. ed. [S.l.]: LTC, 2016. ISBN ISBN 978-85-216-3103-3.

ZHAN, Z.; JING, Z. Study on grain loss detecting sensor of combine harvester. In: **2011 International Conference on New Technology of Agricultural**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 109–112.

ZHAO, P.; LI, Y. Grain counting method based on image processing. In: **2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–3.

ZHOU, J.; CONG, B.; LIU, C. Elimination of vibration noise from an impact-type grain mass flow sensor. **Precision Agriculture**, v. 15, p. 627–638, 12 2014.