



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

EDSON ROBERTO SANTESSO

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA
MONITORAMENTO DA TORRA DE GRÃOS DE CAFÉ**

Londrina
2022

EDSON ROBERTO SANTESSO

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA
MONITORAMENTO DA TORRA DE GRÃOS DE CAFÉ**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Química da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Química.

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Montazzolli Killner.

Coorientador: Prof. Dr. Evandro Bona.

Londrina
2022

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

E24d Santesso, Edson.
Desenvolvimento de Instrumentação para Monitoramento da Torra de Grãos de Café / Edson Santesso. - Londrina, 2022.
102 f. : il.

Orientador: Mario Killner.
Coorientador: Evandro Bona .
Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Química, 2022.
Inclui bibliografia.

1. Café - Tese. 2. Torrefação - Tese. 3. Automação - Tese. 4. Arduino - Tese. I. Killner, Mario . II. , Evandro Bona. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Química. IV. Título.

CDU 54

EDSON ROBERTO SANTESSO

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DA TORRA DE GRÃOS DE CAFÉ

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Química da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mario Henrique Montazzolli Killner
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profa. Dra. Suzana Lucy Nixdorf
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Paulo Henrique Março
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
- UTFPR

Londrina, 25 de março de 2022.

**Aos meus familiares e amigos que me
acompanharam ao longo dessa jornada.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por estar junto a mim em toda a caminhada até aqui.

Ao Prof. Dr. Mario Henrique Montazzolli Killner, orientador e amigo, pelos conhecimentos compartilhados, por todos os conselhos dados e por ser inspiração na minha carreira.

Ao Prof. Dr. Evandro Bona, coorientador por toda a ajuda no desenvolvimento desse trabalho e pelo tempo disponibilizado para me ensinar coisas novas.

Ao Prof. Me. Décio Luiz Gazzoni Filho, por toda a ajuda no desenvolvimento desse trabalho e pelo tempo disponibilizado para me ensinar coisas novas.

Ao amigo Dr. Lycio Shinji Watanabe, por toda a ajuda no desenvolvimento desse trabalho, pelo tempo disponibilizado para me ensinar coisas novas, por todos os conselhos dados e por ser parte do meu desenvolvimento acadêmico.

A amiga Me. Leticia Magalhães de Aguiar, por toda a ajuda no desenvolvimento desse trabalho, pelo tempo disponibilizado para me ensinar coisas novas, por todos os conselhos dados e por ser parte do meu desenvolvimento acadêmico.

À Universidade Estadual de Londrina, por prover os recursos para a minha aprendizagem e por ter me proporcionado momentos de alegria, superação e desenvolvimento pessoal.

Aos meus pais, Luiz e Maria, pela paciência durante toda a minha pós-graduação e pelo incentivo. Às minhas tias Catarina e Maria, pelo incentivo ao longo da minha pós-graduação.

Aos professores e colegas de pós-graduação, que de alguma forma contribuíram no meu crescimento pessoal e profissional. Meus mais sinceros agradecimentos!

SANTESSO Edson, Roberto. **Desenvolvimento de instrumentação para monitoramento da torra de grãos de café**. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

RESUMO

Neste trabalho objetivou-se o desenvolvimento de instrumentação para monitoramento da torra de grãos de café da espécie *Coffea canephora*, através do desenvolvimento de uma câmara de torração automatizada por microcontrolador com plataforma de computação *open source* (Arduino Mega 2560) para controle da instrumentação, sendo o microprocessador controlado pelo software Coffee Roast Control System V2.0, que fez todo o processamento e aquisição de dados, desenvolvido por Edson Roberto Santesso do grupo LATE (Laboratório de Analítica Thomas Edison) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), através do monitoramento *in-situ* durante o processo de torração. As amostras de café foram adquiridas do instituto agrônomo do Paraná (IAPAR) campus Londrina. Para cada amostra, foi separado pequenas porções de 40g, sendo submetidas ao processo de torra, adquirido imagens digitais canal L^* , frequência sonora e espectros de refletância no NIR nano portátil. A aplicação de diferentes padrões de cor e curvas de torrefação teve como propósito evidenciar a combinação entre a melhor configuração das variáveis tempo e temperatura e a tonalidade de cor final para obter o melhor desempenho. O método colorimétrico empregado para a avaliação da cor utiliza o sistema de cores CieLAB que é um padrão de cores que foi implementado pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 1986). Para a detecção dos cracks do café durante o processo de torra foi utilizado um captador de áudio no qual foi acoplado do lado de fora da câmara de torra a uma distância de aproximadamente 2cm, para realizar a gravação de áudio. Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o software GAMMA desenvolvido pelo professor Dr. Evandro Bona da (UTFPR) campus Campo Mourão, onde foi utilizado a análise de componentes principais (ACP) e a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLSR) como ferramentas quimiométricas com o intuito de se fazer uma análise exploratória e quantitativa dos grupos amostrais, para discriminalos entre si dentro da mesma curva de temperatura por suas características espectrais. A automação foi testada mostrando que o método escolhido para a detecção dos eventos de crack apresentou apenas ruído, não sendo possível discriminar a frequência na qual ocorrem os dois eventos. Foi verificado que o aumento no tempo de torra desencadeou o aumento no percentual de perda de massa. A análise quimiométrica utilizando o PLSR mostra que as coordenadas L^* , a^* e b^* do método de imagem digital podem ser empregados para a predição dos valores de L^* do colorímetro, sendo uma boa estimativa *online* durante todo o processo de torra, com baixos valores de RMSECV.

Palavras-chave: café cru; CieLAB; torrefação; cor; NIR; automação; arduino; hardware e software desenvolvidos.

SANTESSO Edson, Roberto. **Development of Instrumentation for Monitoring Coffee Beans Roasting**. 2022. 100 f. Dissertation (Master in Chemistry) - State University of Londrina, Londrina, 2022.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop instrumentation for monitoring the roasting of coffee beans of the species *Coffea canephora*, through the development of a roasting chamber automated by microcontroller with an open source computing platform (Arduino Mega 2560) to control the instrumentation, being the microprocessor controlled by the Coffee Roast Control System V2.0 software, which did all the processing and data acquisition, developed by Edson Roberto Santesso from the LATE group (Thomas Edison Analytical Laboratory) at the State University of Londrina (UEL), through monitoring in-situ during the roasting process. The coffee samples were acquired from the agronomic institute of Paraná (IAPAR) campus Londrina. For each sample, small portions of 40g were separated, being submitted to the roasting process, acquiring digital images L* channel, sound frequency and reflectance spectra in the portable NIR nano. The application of different color standards and roasting curves aimed to highlight the combination between the best configuration of the time and temperature variables and the final color tone to obtain the best performance. The colorimetric method used for the evaluation of color uses the CIE LAB color system, which is a color standard that was implemented by the International Commission on Illumination (CIE, 1986). For the detection of coffee cracks during the roasting process, an audio pickup was used, which was coupled outside the roasting chamber at a distance of approximately 2 cm, to perform the audio recording. To perform the statistical analysis, the GAMMA software developed by Professor Dr. Evandro Bona da (UTFPR) Campo Mourão campus, where principal components analysis (PCA) and partial least squares regression (PLSR) were used as chemometric tools in order to carry out an exploratory and quantitative analysis of the sample groups, to discriminate them from each other within the same temperature curve by their spectral characteristics. The automation was tested showing that the method chosen for the detection of crack events presented only noise, and it was not possible to discriminate the frequency in which the two events occur. It was found that the increase in roasting time triggered an increase in the percentage of mass loss. The chemometric analysis using the PLSR shows that the L*, a* and b* coordinates of the digital imaging method can be used to predict the L* values of the colorimeter, being a good estimate online throughout the roasting process, with low RMSECV values.

Keywords: raw coffee; CIE LAB; roasting; color; NIR; automation; arduino; developed hardware and software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Planta de coffea arabica com seus frutos.	17
Figura 2 -	Grão de café verde cortado na transfersal	18
Figura 3 -	Torrador industrial.	22
Figura 4 -	Câmara de torração na posição horizontal.	22
Figura 5 -	Câmara de torração na posição vertical.	23
Figura 6 -	Esquema do torrefador industrial.	23
Figura 7 -	Torrador de prova.....	24
Figura 8 -	Representação da reação de Millard.....	26
Figura 9 -	Dispositivo para avaliar a cor do café torrado.	29
Figura 10 -	Modelo CieRGB	30
Figura 11 -	Modelo CieXYZ	31
Figura 12 -	Modelo CieLAB	32
Figura 13 -	Modelo HSV	33
Figura 14 -	Esquema do processo de calibração pelo método PLS.....	36
Figura 15 -	Espectro visível de luz.....	38
Figura 16 -	Representação de imagem digital bidmencional.	39
Figura 17 -	Modulo de visão computacional.	40
Figura 18 -	Dispositivo arduino maga 2560.	42
Figura 19 -	Esquema do sistema instrumental.	45
Figura 20 -	Esquema da placa Arduino Mega 2560	47
Figura 21 -	Modulo rele duplo.....	48
Figura 22 -	Controladora de velocidade motor DC.	49
Figura 23 -	Modulo Max6675 e termopar	50
Figura 24 -	Relé de estado solido.....	50
Figura 25 -	Resistor.	51
Figura 26 -	(a) Mini bomba de água RS360-sh.....	52
Figura 26 -	(b) Trocador de calor do sistema de imagem digital.....	52
Figura 26 -	(c) Trocador de calor do sistema NIR.....	52
Figura 27 -	Sensor KY038.	53
Figura 28 -	Imagem do torrefador automatizado montado na plataforma online sketchup... ..	53
Figura 29 -	Suporte do sistema de torra montado com os componentes	

eletrônicos.....	54
Figura 30 - Esquema drive TB6600 e do motor de passo Nema 16.....	56
Figura 31 - (a) Ventoinha.....	57
Figura 31 - (b) Suporte ventoinha.....	57
Figura 31 - (c) Tubulação de cobre.	57
Figura 32 - Ventoinha.....	58
Figura 33 - (a) Lampada halogênea.....	58
Figura 33 - (b) Soquete.....	58
Figura 34 - (a) Base.....	60
Figura 34 - (b) Tampa.....	62
Figura 34 - (c) Haste da hélice.....	62
Figura 34 - (d) Hélice.....	63
Figura 35 - Sonda Câmera Teslong	64
Figura 36 - (a) DLP NIRscan Nano.....	65
Figura 36 - (b) Fibra ótica.....	65
Figura 37 - Software ProCoffee V1.0.....	66
Figura 38 - Moedor de grãos de café elétrico.....	70
Figura 39 - Esquema do torrador com infravermelho próximo montagem de espectroscopia e microfone	71
Figura 40 - Software AudioCrack.....	74
Figura 41 - (a) Espectros audio (b) Picos cracks.....	75
Figura 42 - Curva temperatura X tempo	75
Figura 43 - (a) Amostras torradas em diferentes tempos	76
Figura 43 - (b) Amostras torradas e moidas em diferentes tempos.....	76
Figura 44 - Colorímetro Konica Minolta CR-400.....	78
Figura 45 - Espectros NIR (a) Café arabca (b) Pré-processados.....	80
Figura 46 - ACP (a) Scores PC1 (b) Loading PC1 X PC2.....	81
Figura 47 - Dendogrma	82
Figura 48 - Correlação entre valores previstos e de referência para o NIR.....	83
Figura 49 - Correlação entre valores previstos e de referência para o NIR e imagem digital	84
Figura 50 - Correlação entre valores previstos e de referência para o NIR.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Compostos químicos do café verde	20
Tabela 2 -	Hardware da placa	47
Tabela 3 -	Amostras de café arábica.....	68
Tabela 4 -	Amostras de café com seu processo de torra	69
Tabela 5 -	Amostras de café em tempos diferentes	76
Tabela 6 -	Percentual de perda de massa	77
Tabela 7 -	Valores dos canais de cor utilizando a imagem digital e colorimétrico do café torrado	78
Tabela 8 -	Valores previstos pelo modelo PLSNIR	84
Tabela 9 -	Valores previstos pelo modelo PLSNIR Câmera.....	85
Tabela 10 -	Valores previstos pelo modelo PLSNIR	88

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
CAPITULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.1 CAFÉ	17
1.1.1 O Cafeeiro.....	17
1.1.1.1 O fruto do cafeeiro.....	17
1.1.1.2 Secagem do fruto verde.....	18
1.1.1.3 Processamento do grão verde	19
1.2 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TORRA	20
1.2.1 Torradores de Grãos de Café	21
1.2.1.1 Processo industrial.....	21
1.2.1.2 Processo laboratorial.....	24
1.3 PROCESSO DE TORREFAÇÃO DOS GRÃOS DE CAFÉ.....	25
1.3.1 Torra.....	25
1.3.1.1 Pírolise	25
1.3.1.2 Resfriamento.....	27
1.3.1.3 Moagem do café	27
1.4 COR DO CAFÉ E SEU EFEITO SOBRE PARÂMETROS DE QUALIDADE	28
1.4.1 Percepção da Cor	28
1.4.2 Sistema de Medição de Cor	28
1.4.2.1 Sistema Agtron/SCAA.....	28
1.4.2.2 Sistema Cie.....	30
1.4.2.2.1 <i>Sistema CieRGB</i>	30
1.4.2.2.2 <i>Sistema CieXYZ</i>	31
1.4.2.2.3 <i>Sistema CieLAB</i>	32
1.4.2.3 Sistema HSV	32
1.4.2.4 Análise da cor do café através de espectroscopia de infravermelho e análise multivariada.....	33
1.4.2.4.1 <i>Espectroscopia de infravermelho</i>	33
1.4.2.4.2 <i>Espectroscopia de infravermelho próximo</i>	34
1.4.2.4.3 <i>Análise multivariada</i>	34
1.4.2.5 Análise da cor através de processamento de imagens digitais.....	37

1.4.2.5.1.1	<i>Processamento de imagens digitais para análise da cor do café torrado</i>	37
1.4.2.5.1.2	<i>Sistema de visão computacional</i>	39
1.4.2.5.1.3	<i>Automação</i>	41
1.4.2.5.1.4	<i>Arduino</i>	41
1.5	OBJETIVO.....	43
1.5.1	Objetivo Geral	43
1.5.2	Objetivo Especifico.....	43
	 CAPITULO 2 - INSTRUMENTAÇÃO	44
2.1	HARDWARE E SOFTWARE	46
2.1.1	Microcomputador	46
2.1.2	Placa Arduino Mega 2560	46
2.1.3	Módulo Rele	48
2.1.4	Controladora de Velocidade Motor DC.....	48
2.1.5	Termopar Tipo K com Módulo max6675	49
2.1.6	Rele de Estado Solido (ssr).....	50
2.1.7	Mini Bomba de Água.....	51
2.1.8	Sensor KY 038.....	53
2.1.9	Suporte do Sistema de Torra	54
2.1.10	Modulo Drive TB600.....	55
2.1.11	Sistema de Exaustão	56
2.1.12	Sistema de Resfriamento da Câmara Torrefação	57
2.1.13	Iluminação.....	58
2.1.14	Câmara de Torrefação	59
2.1.15	Sistema de imagem Digital.....	63
2.1.16	NIR	64
2.1.17	Software	65
	 CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	67
3.1	AMOSTRAS E MATERIAIS	68
3.1.1	Amostras	68
3.1.2	Materiais e Equipamentos.....	68
3.2	PLANEJAMENTO.....	68

3.2.1	Torrefação do Café	68
3.2.2	Moagem	69
3.2.3	Análise Colorimétrica	70
3.2.4	Detecção dos Cracks	70
3.2.5	Análise por Espectroscopia no Infravermelho próximo	71
3.2.6	Análise Quimiométrica	72
	CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	ANÁLISE DO ÁUDIO	74
4.2	TORREFAÇÃO	75
4.3	ANÁLISE COLORIMÉTRICA.....	77
4.4	ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO	79
4.4.1	Diferença entre Espectros do Grão Cru e do Grão Torrado.....	79
4.4.2	Análise Quimiométrica	81
4.4.2.1	Análise de Componentes Principais.....	81
4.4.2.2	Regressão por Mínimos Quadrados Parciais.....	83
	CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS	89

INTRODUÇÃO

O café tornou-se uma *commodity* muito importante no cenário global tanto para exportação como importação, tendo um aumento na reivindicação do consumidor por um produto de qualidade superior nos últimos anos [1] Aspectos como genótipo e condições edafoclimáticas são de grande relevância para a qualidade do café. Todavia procedimentos empregados desde a colheita até o preparo da bebida tem grande influência na produção ou degradação de múltiplos compostos do grão que podem influir na qualidade da bebida que vai para a xícara [2,3].

O processo industrial de torrefação do café em larga escala precisa de uma estrutura ampla que seja capaz de suportar o trabalho, sendo criadas as indústrias de torrefação de café, no qual essas estruturas necessitam apresentar diversos setores que serão responsáveis pelo recebimento e estocagem dos grãos crus, todo o processamento de preparação para a torra e o setor para a estocagem do café torrado.

Os torradores mais empregados na indústria são os de tambor rotativo na posição horizontal, podendo ser operados em batelada ou em fluxo contínuo, apresentando paredes perfuradas ou sólidas. Já os com a câmara de torra na posição vertical operam por batelada, também temos os de leite fluidizado que operam em batelada, em alguns casos operaram em fluxo contínuo.

O processo de torra do café é a operação unitária de maior relevância e determinante na qualidade do produto, tendo como objetivo a formação de aroma e sabor [4]. Neste processo ocorrem diversas reações químicas que dependem da estabilidade de diversos componentes presentes no café cru quando exposto ao calor, perdendo de forma gradativa no começo e mais acelerada no final a sua coloração verde assim adquirindo uma coloração escura. Com a elevação gradativa da temperatura ocorre um aumento no volume dos grãos de café, ocasionando a dispersão de compostos voláteis que formam o aroma de café torrado.

Este processo pode ser definido como um tratamento térmico dos alimentos com a finalidade do desenvolvimento de compostos aromáticos, e da cor, no qual ocorrem em três etapas distintas: secagem, pirólise e resfriamento [5].

A cor dos grãos de café é utilizada como indicativo para que o processo de torra seja interrompido, e pode ser empregado como um padrão para a avaliação do grau de torra, geralmente o grau de torra é avaliado de forma visual, observando a cor final desejada, na qual pode ocorrer uma diferenciação por fatores como qualidade do

grão, torrefador e pelas variáveis de tempo e temperatura [6].

Na indústria do café um descritor de cor que é muito utilizado para avaliar o grau de torra é o valor de Agtron, no qual através de equipamentos portáteis é possível realizar sua medição, essa medição pode ser feita utilizando colorímetros, espectrofotômetros portáteis ou ainda, através de discos de Agtron que foram desenvolvidos pela SCAA. Esses discos apresentam diferentes tonalidades de marrom no qual e associado um valor de Agtron em uma escala que varia de 25 a 95, onde 25 representa a tonalidade mais escura e 95 a mais clara [7].

A variável que é utilizada para se fazer a determinação de Agtron, trabalha na região do infravermelho próximo e visível, medindo a quantidade luz que é refletida na superfície da amostra, os métodos que foram descritos demandam um alto investimento, não sendo viáveis às empresas de pequeno porte para fazer o controle de cor do café, desde modo o monitoramento do grau de torra acaba sendo realizado através do método visual utilizando de toda a experiência do mestre de torra [7].

No decorrer dos últimos anos a automação, que pode ser definida como o “funcionamento de uma máquina ou um grupo de máquinas que, sob o controle de um programa único, permite efetuar, sem intervenção humana, uma série de operações contábeis, estatísticas ou industriais [8]. Se tornou mais comum, e tem sido requisitada por causa da grande demanda de análises, grandes avanços no que diz respeito a otimização de métodos analíticos, tornando-se de grande interesse para a indústria e pesquisadores, por se tratar de um meio de economia de materiais e diminuição do tempo dedicado aos procedimentos [9].

O sistema de visão computacional é um processo de extração de dados que ocorre através de transformações que são realizadas em imagens digitais, vídeos, etc., olhando pela ótica da engenharia a visão computacional é um processo para a automação de tarefas que são realizadas pelo sistema de visão humana [10,11].

O espaço de cores RGB é um modelo monocromático formado pela combinação variável das componentes monocromáticas nas faixas espectrais que são associadas a cor verde, vermelho e azul, que formam as demais cores que são capturadas pelo olho humano [12].

O espaço de cores HSV possui três variáveis *Hue*, *Saturation* e *Value*, na qual a variável matriz e a cor, a saturação mede a pureza da cor, se houver uma diminuição da variável saturação mais clara será a cor, este sistema apresenta vantagens em relação ao RGB por ser mais intuitivo [12].

Um dos sistemas que é mais comumente utilizado para a determinação de cor tem sido o CIELab, este sistema se baseia em três elementos luminosidade, tonalidade e saturação, elementos estes que são obtidos através das coordenadas colorimétricas L^* , a^* e b^* [13].

As técnicas espectroscópicas são um procedimento que se baseia na absorção e emissão de energia eletromagnética no qual compreende alguma região do espectro. Métodos espectroscópicos compreendem leituras de transmitância ou refletância, como a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) a refletância é mais utilizada na área de alimentos, por não precisarem de muito preparo da amostra para a análise [14].

A espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), vem sendo empregada em grãos para a determinação de diversos compostos, e atualmente tem sido empregada em substituição as análises tradicionais em alimentos. A análise espectral da amostra através do NIR fornece informações específicas muito características de cada conjunto de amostral [15,16].

A análise multivariada também conhecida como quimiométricas teve seu surgimento advindo da necessidade do desenvolvimento de novas técnicas para o tratamento de dados mais complexos do ponto de vista estatístico e matemático [17,18]. Sendo uma técnica de extrema importância e uma ferramenta indispensável para qualquer estudante e pesquisador da área química.

A análise de componentes principais (ACP) tem como objetivo diminuir a dimensão dos dados multivariados, isso faz com que as informações que tem um maior valor significativo e com menos variáveis fique visível [17].

A regressão dos mínimos quadrados parciais (PLSR) faz uso de dois conjuntos de predição no qual vai modelar uma relação entre matrizes \mathbf{X} e \mathbf{Y} , modelando também a estrutura dessas matrizes \mathbf{X} e \mathbf{Y} , e a ideia principal é encontrar a variável latente (VL) da matriz que vai maximizar os scores [19].

Desta forma este trabalho tem o intuito de desenvolver uma instrumentação de baixo custo para controle de torra automatizado, com o auxílio da automação.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Café

1.1.1 O cafeeiro

O cafeeiro é uma planta da família *Rubiaceae* que possui diversas espécies no qual as mais importantes para o contexto comercial são *Coffea Arábica* (Fig. 1) e *Coffea Canephora* comumente conhecida como robusta, sendo mais produtiva [20]. É uma espécie proveniente da Etiópia, país do continente africano, onde os seus habitantes tinham o habito de se alimentarem da poupa do fruto e também mastigar as folhas ou utilizar para o preparo de chás, porem sua propagação se deu pelos árabes chegando ao continente europeu por volta do século XIV [21].



Fig. 1 - Planta de *coffea arábica* com seus frutos

Fonte: Adaptado de [22].

1.1.1.1 O fruto do cafeeiro

O fruto do cafeeiro tem uma anatomia que é constituída pela casca (exocarpo), mucilagem (mesocarpo), pergaminho (endocarpo) e a semente (endosperma, película prateada e embrião). A Fig. 2 mostra a composição química do endosperma o qual tem grande importância para o café torrado, influenciando na qualidade da bebida por afetar os precursores de aroma e sabor [23,24].



Fig. 2 – Grão de café verde cortado na transversal

Fonte: próprio autor.

1.1.1.2 Secagem do fruto verde

Inicialmente o café possui entre 45 e 55% de umidade, a sua casca passa por um processo de desidratação atingindo 30% de umidade, conhecido como pré-secagem (meia seca), quando ocorre a secagem total da casca e da polpa o percentual encontrado é de 18 a 20% de umidade. O processo de secagem do grão caminha junto com o processo de desidratação, com a umidade migrando do interior para o exterior do grão [25].

A secagem pode ser feita em terreiros, onde os frutos ainda no pé são expostos ao ambiente, radiação solar, correntes de ar, e a variação de umidade do grão em relação a atmosfera faz com que o café sofra uma secagem natural, após serem colhidos utiliza-se de terreiros, que é o sistema mais utilizado no Brasil, sendo mais viável devido ao seu baixo custo se comparado a secadores mecânicos, e por ser de fácil manejo, mas em contra partida expõe os grãos às variações atmosféricas [26].

Primeiramente o café é esparramado no terreiro em camadas podendo atingir 3cm de espessura, sendo revolido após o esparrame, nos próximos dias o revolvimento dos grãos é feito de hora em hora, permanecendo no terreiro no período noturno sem o uso de lonas ou qualquer cobertura, ao se atingir 30% de umidade o

que pode levar de 5 a 7 dias, onde os grãos não grudam mais ao serem apertados [26].

Assim que o café atingir de 18 a 20% de umidade o que deve ocorrer por volta do 8 dia, a secagem deve ocorrer de forma lenta, não podendo nesta etapa tomar chuva, sendo feito o uso de lonas no período noturno e em dias chuvosos e podendo permanecer coberta as leiras em dias nublados, é nesta etapa que ocorre a uniformização da seca entre os grãos com diferentes graus de secagem, a umidade final dos grãos gira em torno de 10,5 a 11,5% [25].

1.1.1.3 Processamento do grão verde

O café verde pode ser processado por diferentes métodos, o qual tem influência na composição e qualidade dos grãos, via seca e via úmida, o método de processamento por via seca, não há a remoção da casca e os grãos são secos inteiros, o qual é recebe o nome de café natural. No caso do processamento por via úmida, há uma divisão em três maneiras de processar o grão. O primeiro método não há remoção da mucilagem sendo removido apenas a casca do grão, o qual recebe o nome de café descascado, o segundo método a mucilagem é removida através do processo de fermentação, sendo o grão descascado mecanicamente este método o nome de café despulpado, o terceiro método o grão e descascado e a mucilagem e retirada mecanicamente [24].

A qualidade do café torrado a princípio está ligada com a composição química do café verde a qual se relaciona diretamente com o manejo, variedade, pós-colheita, armazenamento e secagem. Sendo que a complexidade dos compostos químicos que se encontra no café verde importantes para a qualidade, será apenas durante o processo de torra que ocorreram mudanças físicas e químicas, a qual afetaram a cor e aroma do café [27–32].

A tabela 1 mostra alguns compostos químicos que estão presentes tanto no café verde como no torrado para espécies *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora*.

Compostos químicos	<i>Coffea arabica</i> L.		<i>Coffea canephora</i> .	
	Grão verde	Grão torrado	Grão verde	Grão torrado
Polissacarídeos	43,0 - 45,0	38,0	46,9 - 48,3	42,0
Sacarose	6,2 - 8,4	0,0	0,9 - 4,8	0,0
Lipídios	15,0 - 18,0	17,0	8,0 - 12,0	11,0
Proteínas	8,5 - 12,0	7,5	8,5 - 12,0	7,5
Aminoácidos	0,2 - 0,8	0,0	0,2 - 0,8	0,0
Ácidos alifáticos	2,0 - 2,9	1,6	1,3 - 2,2	1,6
Ácidos clorogênicos	6,7 - 9,2	2,5	7,1 - 12,1	3,8
Cafeína	0,8 - 1,4	1,3	1,7 - 2,4	2,4
Trigonelina	0,6 - 1,2	1,0	0,3 - 0,9	0,7
Minerais	3,0 - 5,4	4,5	3,0 - 5,4	4,7
Água	8,0 - 12,0	0,0 - 5,0	8,0 - 12,0	0,0 - 5,0
Melanoidinas	0,0	23,0	0,0	23,0

Tabela 1 – Compostos químicos do café verde e torrado (g/100g) para as espécies *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora*.

Fonte: Adaptado de [33].

1.2 Desenvolvimento do processo de torra

Em meados do século XIV foi onde ocorreu o desenvolvimento do processo de torrefação do café, sendo um passo importantíssimo, fazendo com que a bebida adquirisse a forma e aroma que conhecemos hoje [1]. Sendo amplamente conhecido e consumido por volta do ano de 1615, propiciando assim seu plantio, e tendo os colonizadores disseminado a cultura do café por onde passaram [21]. A sua produção comercial foi o passo seguinte sendo desenvolvida no lêmên, por ser uma bebida estimulante e agradável se tornou um produto que recebia grandes investimentos o que permitiu sua globalização, assim tendo facilitado sua interação nas formas de consumo bem como nas técnicas de plantio [1].

Por volta de 1727 as primeiras cultivares de café a chegaram em solo brasileiro, trazidas por Francisco de Melo Palheta (1670 – 1750), sendo inicialmente cultivadas no estado do Pará, e posteriormente difundidas para os estados de Minas gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, que na década de 80 se tornaram os principais produtores nacionais de café [1].

1.2.1 Torrefadores de grãos de café

1.2.1.1 Processo industrial

O processo industrial de torrefação do café em larga escala precisa de uma estrutura ampla, capaz de suportar o trabalho, sendo criadas as indústrias de torrefação de café, no qual essas estruturas necessitam apresentar diversos setores que são responsáveis pelo recebimento e estocagem dos grãos crus, todo o processamento de preparação para a tora e o setor para a estocagem do café torrado [30,34].

Os torradores que são usados pela indústria (Fig. 3) são os de tambor rotativo na posição horizontal (Fig. 4), podendo ser operados em batelada ou em fluxo contínuo, apresentando paredes perfuradas ou sólidas. Já os com a câmara de torra na posição vertical (Fig. 5) operam por batelada. Também existe os de leito fluidizado que operam em batelada, mas alguns sistemas foram desenvolvidos para operar em fluxo contínuo, a Fig. 6 mostra o desenho esquemático de um torrador industrial.

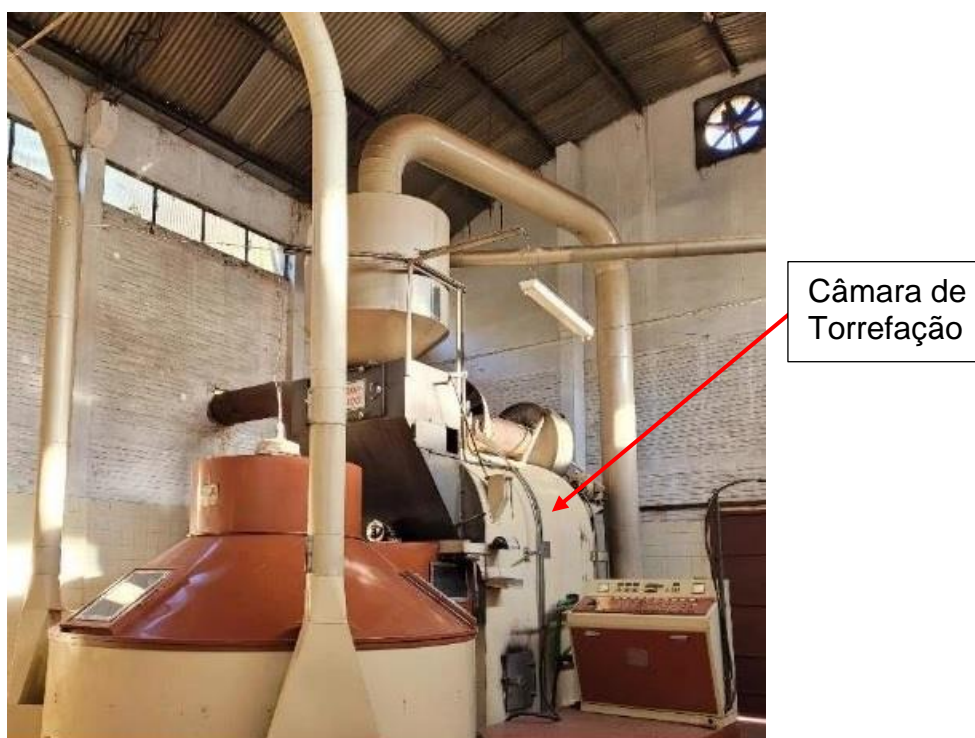


Fig. 3 - Torrador industrial

Fonte: Adaptado de [35].

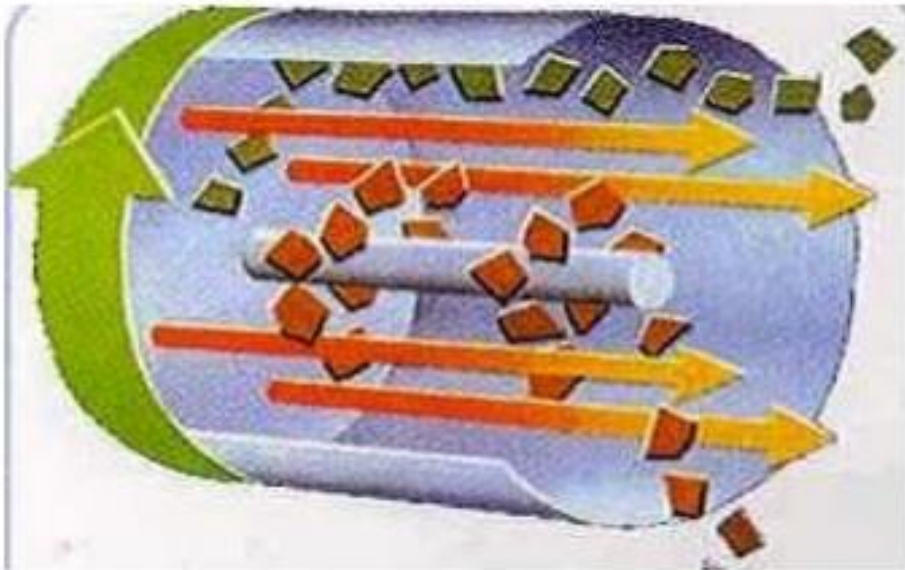


Fig. 4 - Câmara de torração na posição horizontal

Fonte: Adaptado de [36].

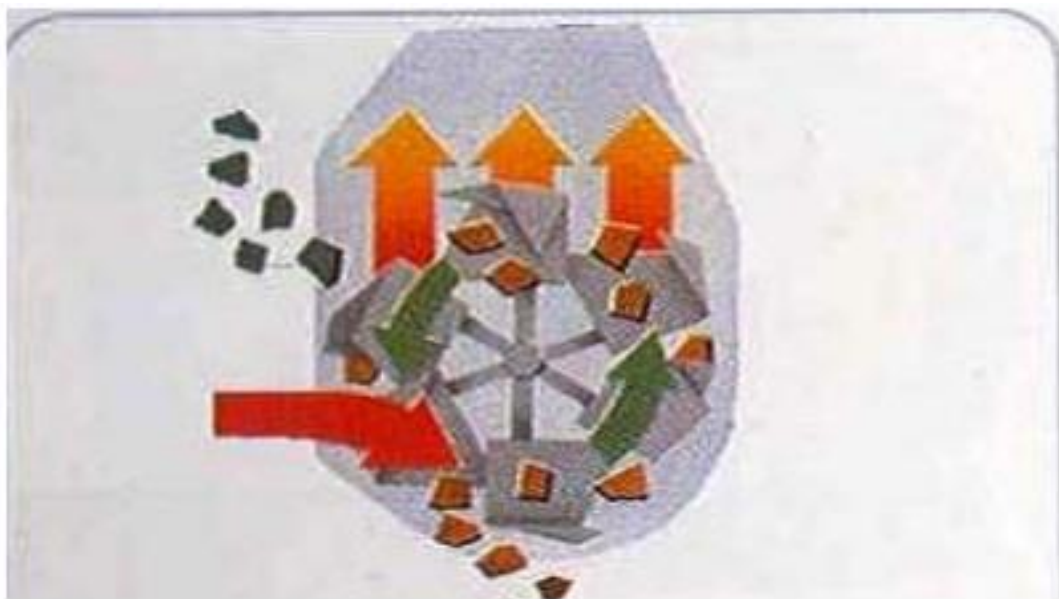


Fig. 5 - Câmara de torração na posição vertical

Fonte: Adaptado de [36].

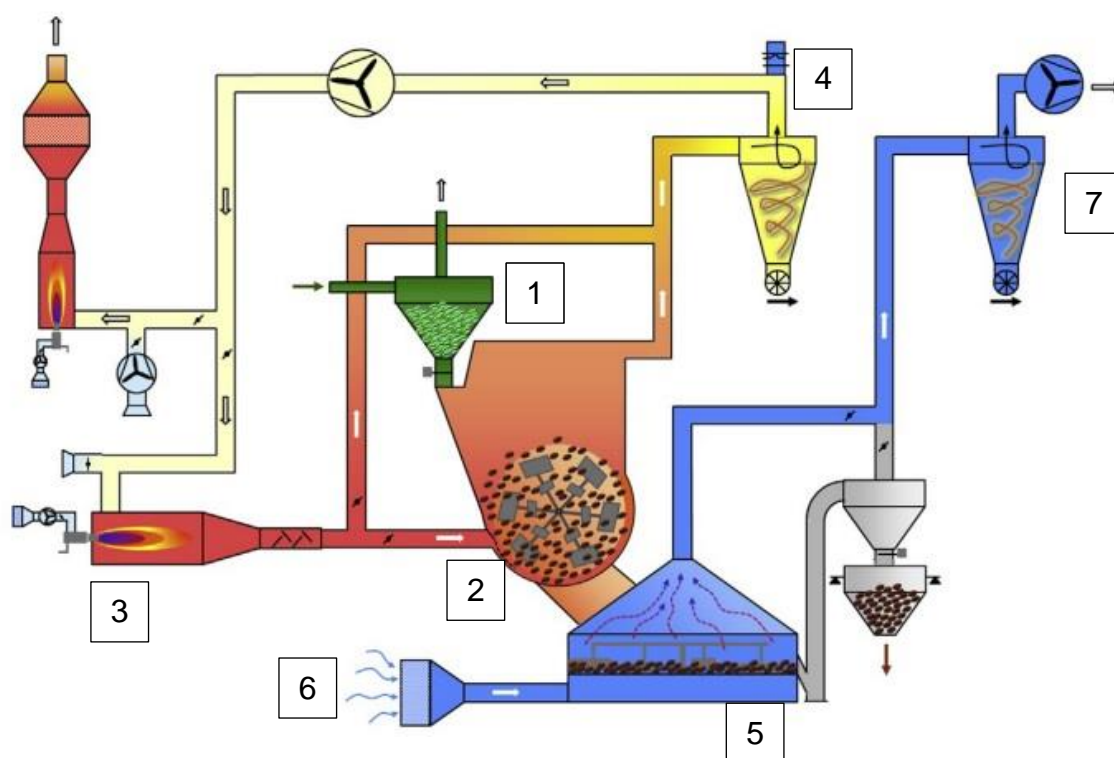


Fig. 6 - Desenho esquemático de um sistema de torrefação industrial

Fonte: Adaptado de [34].

1 Moega, 2 câmara de torrefação, 3 Entrada de ar quente na câmara de torrefação, 4 saída de ar da câmara de torrefação, 5 seção de resfriamento, 6 entrada de ar frio na seção de resfriamento, 7 saída de ar da seção de resfriamento.

Esses equipamentos tem a capacidade de torrar cerca de 240kg de grãos de café verde em média, com temperaturas variando entre 250 a 500°C, o aquecimento é feito através do ar quente advindo do sistema de fornalha, no qual o calor é gerado por óleo diesel ou gás [30,34].

1.2.1.2 Processo laboratorial

No processo laboratorial de torrefação de café os torradores utilizados são comumente conhecidos como torradores de prova (Fig. 7), possuem modelos que podem ter de 1 a 6 cilindros de torra com tambor rotativo na posição horizontal. Esse equipamento tem capacidade de torrar de 80 a 120g de grãos de café verde, com temperaturas variando entre 120 e 250°C, o aquecimento é feito através do ar quente que pode ser feito de forma elétrica ou a gás [36,37].



Fig. 7 - Torrador de prova

Fonte: Adaptado do site [38].

1.3 Processo de torrefação dos grãos de café

1.3.1 Torra

O processo de torra do café ser definido como um tratamento térmico dos alimentos com a finalidade do desenvolvimento de compostos aromáticos, e da cor, no qual ocorrem em três etapas distintas: secagem, pirólise e resfriamento.

1.3.1.1 Pirólise

Inicialmente o grão possui de 8 a 13% de água, ao serem expostos a elevadas temperaturas que podem chegar a picos de 220 a 280°C ocasionando assim a evaporação da água [22]. Nos primeiros minutos, ocorre o maior percentual de

evaporação, isto depende é claro do método utilizado na torra.

A mudança da tonalidade de verde para amarelada ocorre próximo aos 8 minutos, onde o grão sofre uma elevação da sua temperatura, etapa que a água é evaporada com mais intensidade, já próximo dos 12 minutos e com a temperatura em elevação gradativa o grão passa da cor amarelado para marrom clara, essas mudanças de tonalidade no decorrer do processo continuam até que atinjam o patamar definido pelo mestre de torra [39].

A passagem de marrom claro ao escuro se deve pela caramelização dos açúcares, reações de Maillard que ocorrem pela presença de aminoácidos e sacarose e outras degradações químicas, o que confere alterações de aroma e sabor [40].

A reação de Maillard ocorre por meio de três etapas, preferencialmente em meio alcalino, conforme a Fig. 8. A primeira etapa ocorre a condensação da glicose (açúcar redutor) com o aminoácido, a qual ocorre no carbono reativo sendo acelerada pelo calor na presença de água. Ocorrendo a desidratação do composto formado e a formação da base de Schiff, de imediato ocorre o rearranjo para a forma cíclica que é mais estável, no qual a N-glicosilamina se encontra em equilíbrio com a solução aquosa [41].

Na segunda etapa ocorre o rearranjo de Amadori, sendo muito importante para o escurecimento, na qual ocorre a entrada e saída de um H^+ , que é formado inicialmente na base de Schiff, na forma cetoseamina que é mais estável. A terceira etapa é onde ocorre a formação das redutonas que tem alto poder redutor e fonte de escurecimento, sendo esse escurecimento oxidativo, nesta etapa temos também a obtenção do hidroximetilfurfural, o qual reage com os outros compostos dando origem as melanoidinas.

Há também a liberação de CO_2 , nesta etapa por conta da degradação dos aldeídos e aminoácidos, a qual recebe o nome de degradação de Strecker [41].

A caramelização também tem influência na cor durante o processo de torrefação, a qual se dá pelo aquecimento dos carboidratos (sacarose e açúcares redutores) na ausência de compostos nitrogenados, dando origem ao caramelo e compostos de aroma e sabor. Ocorrendo em meio ácido e/ou alcalino[42].

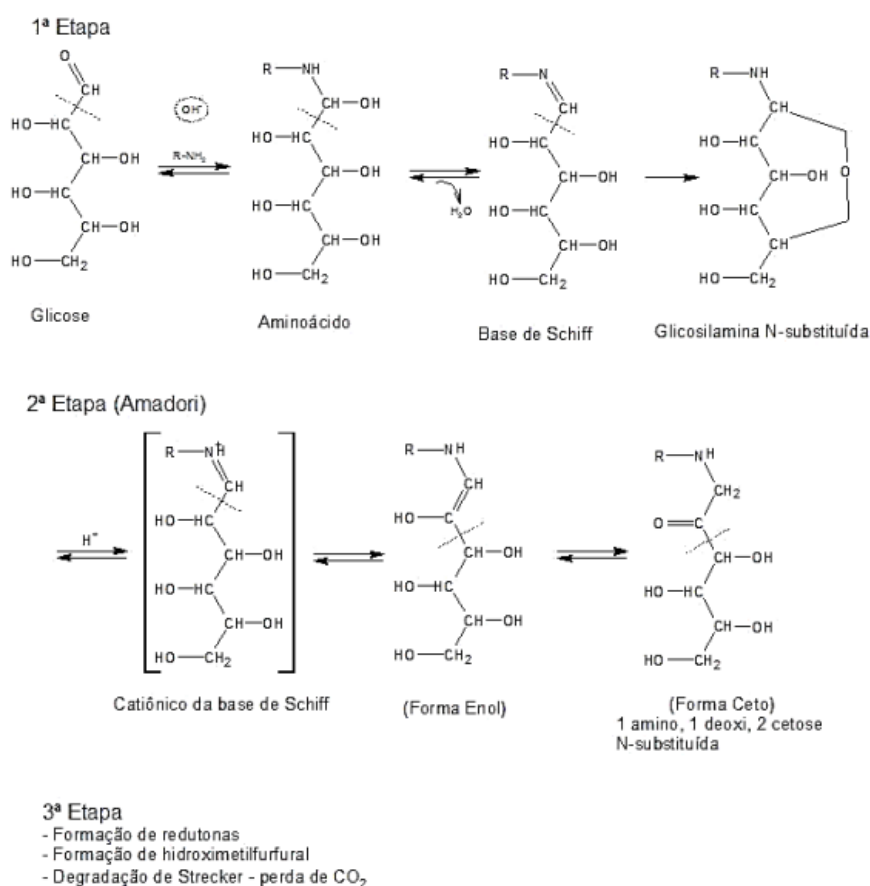


Fig. 8 - Representação da reação de Maillard.

Fonte: adaptado de [41].

1.3.1.2 Resfriamento

O resfriamento dos grãos ocorre logo após ao se atingir a cor desejada de modo imediato, sendo resfriados pelo ar ambiente ou por aspersão de água na forma de spray, podendo ainda ser injetada no interior da câmara de torração, como no caso dos torradores industriais paralisando a pirólise e evitando assim a carbonização do produto [39].

1.3.1.3 Moagem do café

A moagem do café é um processo no qual exige um esforço mecânico para

gerar partículas menores, aumentando sua superfície de contato e possibilitando a extração dos compostos solúveis. O processo de moagem está relacionado com o grau de torra do café, no qual uma torra rápida e com o grau de torra escuro, facilita a moagem devido ao aumento da porosidade e fragilidade dos grãos, já para uma torra mais lenta e com grau de torra mais claro e com maior residual de umidade apresenta uma maior homogeneidade no tamanho dos poros e alta densidade, o que requer uma energia maior para a moagem resultando num produto mais homogêneo [43].

Como o teor de umidade do café torrado é importante para se obter uma moagem mais homogênea, o tempo mínimo de descanso entre a torrefação e a moagem deve ser de 6 a 12 horas, visando que haja uma redistribuição uniforme de água no grão [43]. Já cafés que apresentam um teor de umidade acima de 6% são mais elásticos com isso são mais difíceis de serem moídos, mesmo passando por um longo período de descanso [4].

A moagem também tem uma grande importância para a análise sensorial do café, sendo um dos parâmetros de padronização exigidos pela metodologia oficial [44]. As amostras devem ter uma granulometria visando que 70% das partículas passem pela peneira de 20 mesh (0,84 mm).

1.4 Cor do café e seu efeito sobre parâmetros de qualidade

1.4.1 Percepção da cor

Desta forma este trabalho tem o intuito de desenvolver uma instrumentação de baixo custo para controle de torra automatizado, com o auxílio da automação.

O primeiro atributo que é avaliado nos alimentos pelo consumidor é a cor, sendo de grande importância na qualidade e aceitação do produto, com o aumento da exigência por parte dos consumidores no que se diz respeito a qualidade, fazendo com que a indústria de alimentos se preocupasse em medir e controlar a cor dos produtos. Assim torna-se fundamental o desenvolvimento e utilização de sistemas de monitoramento de cor de maneira mais objetiva e eficiente [45].

A seguir serão apresentados alguns parâmetros de qualidade que frequentemente são utilizados para a avaliação da cor do café torrado, como: Sistema

Agtron/SCAA, Sistema Cie, Sistema CieRGB, Sistema CieXYZ, Sistema CieLab, Sistema HSV, espectroscopia de infravermelho próximo NIR e processamento de imagens digitais.

1.4.2 Sistema de medição de cor

A cor do grão torrado indicara o grau de torra, gerando uma tonalidade do grão que vai de marrom claro a marrom escuro, o que se deve a reações químicas que acontecem durante o processo de pirolise no qual ocorre a formação das melanoidinas [6].

1.4.2.1 Sistema Agtron/SCAA

Na indústria do café um descritor de cor que é muito utilizado para avaliar o grau de torra é o valor de Agtron, possui uma escala de 0 a 100. O valor de 75 representa a torra clara, 55 a torra média e 35 a torra escura [33].

Essa variável trabalha na região do infravermelho próximo e visível, medindo a quantidade luz que é refletida na superfície da amostra. A calibração do sistema Agtron é realizada por meio de uma classificação de grau de torra onde 0 é referente a carbonização total da sacarose e 100 é referente a caramelização da sacarose entre 5 e 10% [7].

O monitoramento do grau de torra muitas vezes é feito pelo método visual e pela experiência do operador, a SCAA desenvolveu modelos para monitorar o grau de torra de forma indireta visando a padronização do método visual, como o *Roast Classification Color Disk* (Fig. 9.a) no qual são discos com diferentes tonalidades da cor marrom [7].

Outras técnicas podem ser utilizadas além da análise visual que são baseadas em reflectância na região do infravermelho próximo no espectrofotômetro, em luminosidade pelo parâmetro L^* e por colorímetro através dos parâmetros L^* , a^* , b^* , C^* e H° [6]. O espectrofotômetro que é projetado para fornecer com precisão o valor Agtron e correlacionar com o grau de torra é o M - Basic II da marca Agtron Inc. (Fig. 9.b).

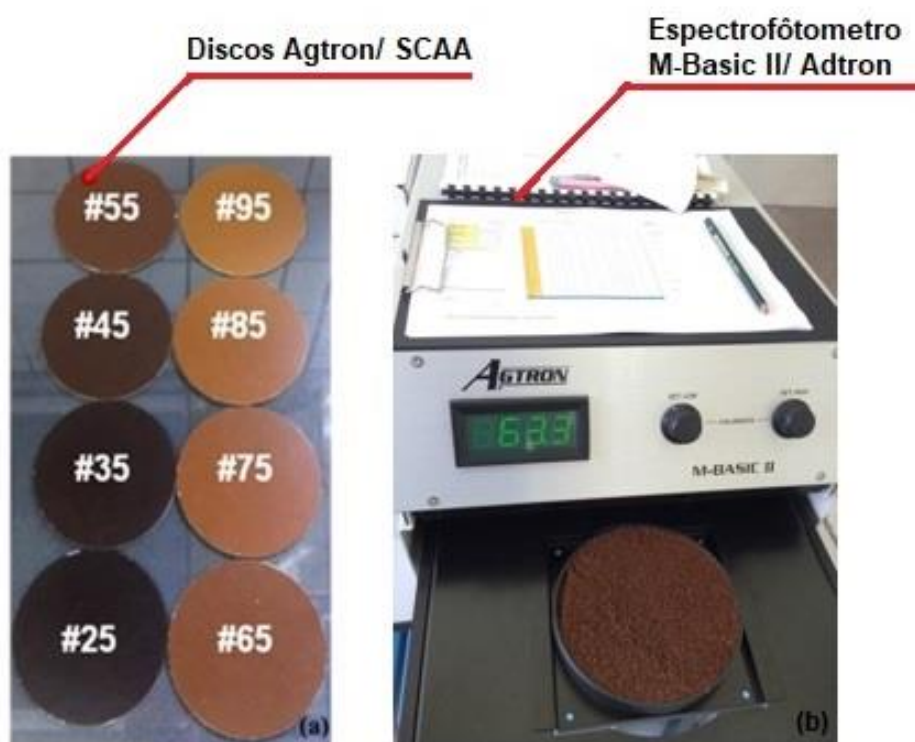


Fig. 9 - Dispositivo para avaliar a cor do café torrado.

- a) *Roast Classification Color Disk*: Discos Agtron/SCAA. Variam de #25 a #95 o grau de intensidade marrom, no qual 25 é marrom escuro e 95 marrom claro.
- b) Equipamrnto: Espectrofotômetro M - Basic II/ Agtron realiza a leitura direta do valor Agtron.

Fonte: Adaptado de [46].

1.4.2.2 Sistema Cie

Os sistemas de cores Cie foram desenvolvidos em 1931 pela comissão internacional de iluminação (Cie) e são as primeiras ligações quantitativas definidas entre as distribuições de comprimentos de onda no espectro eletromagnético visível e as cores fisiologicamente percebidas na visão humana das cores [13].

1.4.2.2.1 Sistema CieRGB

Os objetos que são capazes de produzir emissão de luz na região do visível

são captados em função da soma das cores espectrais que são emitidas, sendo conhecido como processo aditivo. Tal processo pode ser entendido como uma combinação variável das componentes monocromáticas nas faixas espectrais que são associadas a cor verde, vermelho e azul, que formam as demais cores que são capturadas pelo olho humano. Esse processo de formação gerou um modelo cromático conhecido como RGB (Red, Green e Blue), onde a Cie que é uma entidade sem fins lucrativos definiu para as cores primárias intervalos de comprimento de onda (Fig. 10) e a combinação dessas cores produz as cores secundárias [12].

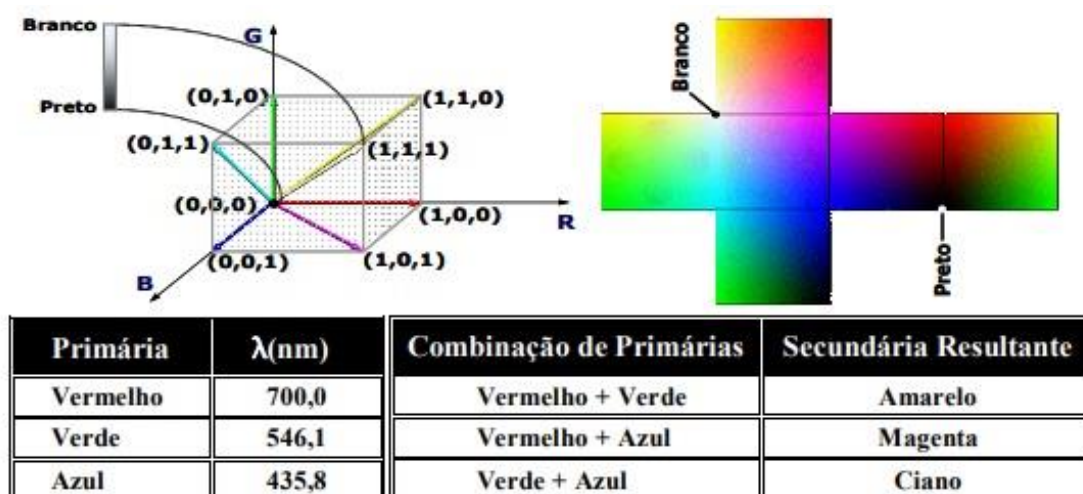


Fig. 10 - Modelo CIE RGB

Fonte: Adaptado de [12].

1.4.2.2 Sistema CieXYZ

O sistema de cor CIE XYZ (Fig. 11) foi desenvolvido em 1931, sendo derivado do espaço de cor CIE RGB, abrangendo todas as sensações de cores que são visíveis para uma pessoa com visão média, servindo como uma referência padrão contra a qual muitos outros espaços de cores são definidos.

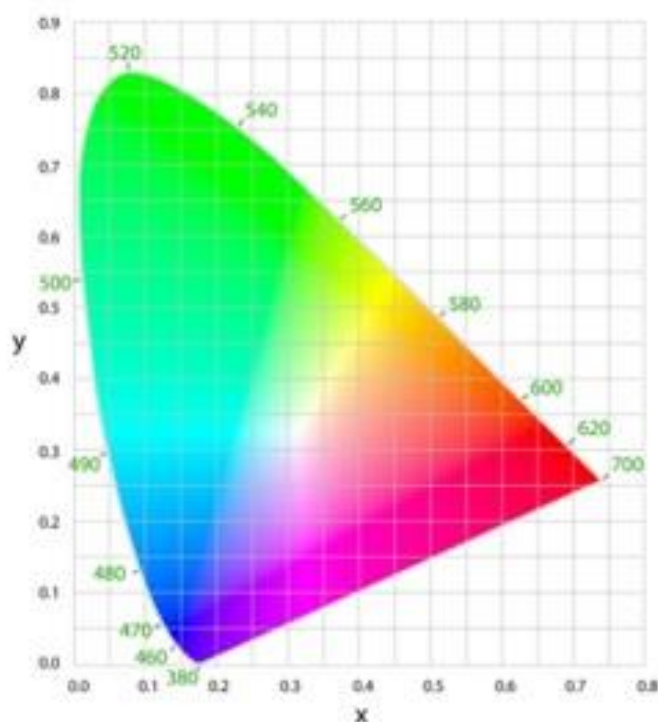


Fig. 11 - Modelo CieXYZ

Fonte: Adaptado do site [47].

A coordenada Y é a luminância, Z é quase igual ao azul do RGB e X é uma mistura das três curvas do RGB escolhidas para serem não negativas. Definindo Y como luminância tem-se um resultado útil de que, para qualquer determinado valor de Y, o plano XZ conterá todas as cromaticidades possíveis naquela luminância.

A unidade dos valores de X, Y e Z é frequentemente é uma escolha arbitrária de forma que $Y = 1$ ou $Y = 100$ seja o branco mais brilhante que um visor colorido suporta. Nesse caso, o valor Y é conhecido como luminância relativa. Os valores de ponto branco correspondentes para X e Z podem então ser inferidos usando o iluminante padrão [12,13].

1.4.2.2.3 Sistema CieLAB

O sistema de medição de cor CieLAB foi desenvolvido em 1976, sendo derivado do espaço de cor CieXYZ, com a intenção de que este modelo fosse mais uniforme que o CieXYZ, no qual se baseia em três elementos luminosidade,

tonalidade e saturação, elementos estes que são obtidos através das coordenadas colorimétricas L^* , a^* e b^* (Fig. 12).

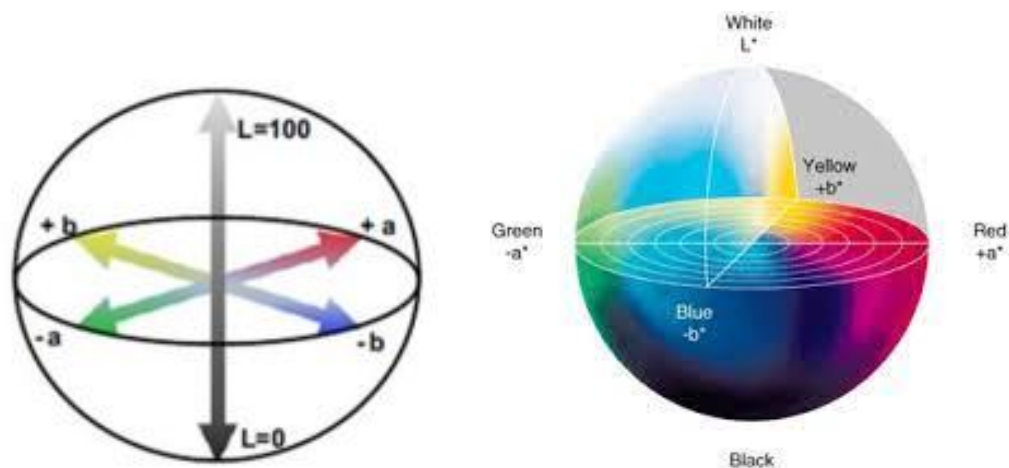


Fig. 12 - Modelo CielAB

Fonte: Adaptado de [13].

A luminosidade (coordenada L^*) é representada pela escala de cinza variando de 0 (totalmente escuro) para 100 (totalmente branco), a tonalidade (coordenada a^*) representa o eixo horizontal variando de +120 (verde) para -120 (vermelho) e a saturação (coordenada b^*) representa o eixo vertical variando de +120 (amarelo) para -120 (azul) [13,48].

1.4.2.3 Sistema HSV

O sistema de cor HSV possui três variáveis Hue, Saturation e Value, a variável matriz e a cor, a saturação mede a pureza da cor, se houver uma diminuição da variável saturação mais clara será a cor. A variável valor e referente a quantidade de luminância, este sistema apresenta vantagens em relação ao RGB por ser mais intuitivo. Este sistema apresenta uma coordenada angular que é a matriz, a coordenada radial que representa a saturação e o eixo vertical que define o valor (Fig. 13) [12].

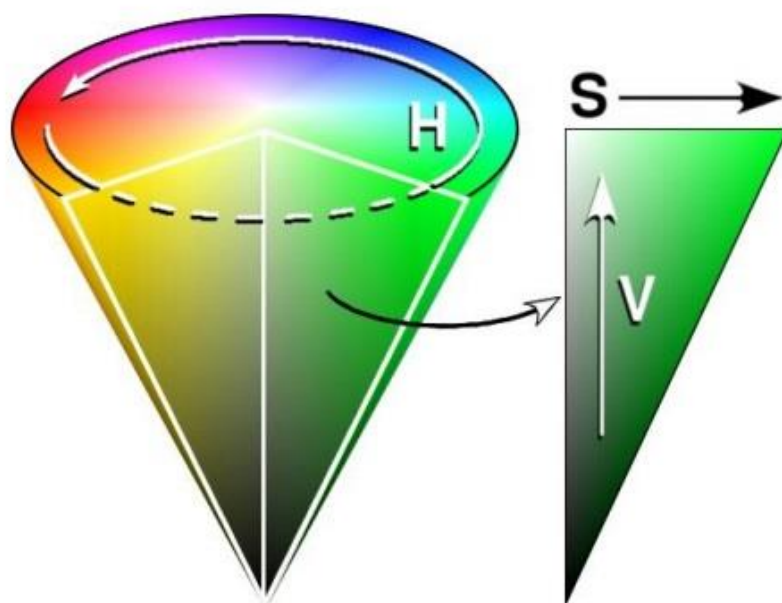


Fig. 13 - Modelo HSV

Fonte: Adaptado de [12].

1.4.2.4 Análise da cor do café através de espectroscopia de infravermelho e análise multivariada

1.4.2.4.1 Espectroscopia de infravermelho

As técnicas espectroscópicas são um procedimento que se baseia na absorção de energia eletromagnética no qual compreende a região de 700 a 1000000 nm do espectro, esta região é subdividida em outras três regiões infravermelho próximo que está entre 700 e 2500 nm, infravermelho médio que compreende a região entre 2500 e 10000 nm e infravermelho distante que está entre 10000 e 1000000 nm.

Métodos espectroscópicos compreendem leituras de transmitância ou refletância, como a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) a refletância é mais utilizada na área de alimentos, em muitos casos não precisarem de preparo da amostra para a análise [14]. Todas estas regiões têm sua importância e quando acompanhadas de técnicas de análises multivariadas apresentam diversas aplicações qualitativas e quantitativas [49,50].

1.4.2.4.2 Espectroscopia de infravermelho próximo

A espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) tem como base a absorção da radiação na faixa de comprimento de onda de 800 a 2500nm no espectro de luz, no qual são resultado de vibrações de ligações moleculares em alguns compostos [50].

Esta técnica vem sendo empregada em grãos para a avaliação de diversos compostos, e atualmente tem sido empregada em substituição as análises tradicionais em alimentos para a avaliação de compostos como óleo em milho, em grãos armazenados que foram submetidos a secagem para avaliar a composição química [15,16].

Corrêa *et al.* [51] fez o uso da técnica NIR na avaliação da qualidade do café frente a adulterações, para distintos graus de torra, assim mostrando que o método possui a capacidade de prever as adulterações para níveis mínimos de quantificação, Catelani *et al.* [52] por sua vez propôs a utilização no método NIR no monitoramento do processo de torra de grãos de café demonstrando que é possível utilizar este método como uma ferramenta para auxiliar na detecção de perturbações durante o processo de torra dos grãos de café.

1.4.2.4.3 Análise multivariada

A quimiometria é uma análise multivariada que surgiu advindo da necessidade do desenvolvimento de novas técnicas para o tratamento de dados mais complexos do ponto de vista estatístico e matemático [17,18]. Permitindo que a quimiometria possa avaliar os dados frente a influência que variáveis existentes na informação que desejasse extrair [17].

Nos dias atuais a quimiometria tornou-se uma técnica de extrema importância e uma ferramenta indispensável para qualquer estudante e pesquisador da área química ou de áreas correlatas, isso pode ser melhor entendido observando o crescente emprego da análise multivariada em diversas áreas da química [53].

A análise multivariada é um processo no qual é aplicado para construir um algoritmo matemático que mostre a relação entre variáveis de interesse e o resultado obtido através de instrumentos laboratoriais, como por exemplo o espectrofotômetro NIR que faz a avaliação da existência ou ausência de diferenças nas regiões

espectrais de absorvência da amostra e a alta correlação entre elas [54].

A análise de componentes principais (ACP) tem como objetivo diminuir a dimensão dos dados multivariados, fazendo com que as variáveis correlacionadas diminuam se tornando variáveis não correlacionadas, conhecidas como componentes principais (PCs), sendo um método que pode ser considerado como base para o tratamento de dados [17,55].

O processo de calibração multivariada por meio da regressão por mínimos quadrados parciais (*Partial Least Squares Regression* – PLS), consiste em duas etapas: a primeira etapa é denominada treinamento na qual desenvolve um modelo matemático que seja capaz de reproduzir os valores da matriz **Y** a partir dos dados da matriz **X**, esta matriz é montada fazendo o uso dos dados de calibração com as respostas instrumentais chamadas variáveis independentes, e a matriz **Y** com as respostas de interesse chamadas de variáveis dependentes.

A segunda etapa é denominada validação a qual faz a predição dos valores das variáveis dependentes dos dados de validação, através do modelo matemático que foi desenvolvido na etapa de calibração [19,56,57].

A calibração multivariada é um processo aplicado para construir um algoritmo matemático entre variáveis preditoras e o resultado obtido através de instrumentos laboratoriais, como por exemplo o espectrofotômetro NIR que faz a avaliação das regiões de absorvência da amostra

A equação (1) descreve o modelo linear que representa a forma na qual a variáveis preditoras das amostras que não são conhecidas é prevista pela resposta instrumental.

$$\text{Equação 1} \quad \mathbf{Y}_{[n \times p]} = \mathbf{X}_{[n \times J]} \mathbf{b}_{[J \times p]} + \mathbf{E}_{[n \times p]}$$

A matriz **Y** tem valores das p variáveis preditoras das n amostras em análise, **X** apresenta os valores de absorvência avaliados ao longo dos J comprimentos de onda, b é uma matriz que possui os coeficientes do modelo e **E** é o resíduo não explicado pelo modelo [58].

A Fig. 14 mostra o esquema do processo de calibração, o qual ocorre através do desenvolvimento de um modelo matemático que extrai informações relevantes dos espectros NIR (matriz **X**) e os correlacionam com as variáveis preditoras (matriz **Y**). Este modelo faz a estimativa dos valores do método de referência sempre que

amostras que não são conhecidas são submetidas a análise [59].



Fig. 14 – Esquema do processo de calibração pelo método PLS.

Fonte: Adaptado de [59].

O PLS busca encontrar as variáveis latentes (VL) que são variáveis preditoras, entre os dados instrumentais e os de interesse para construir o modelo de calibração. Podemos estipular o número de variáveis latentes utilizando a validação cruzada, este número é estipulado através da soma residual preditiva dos quadrados (predicted residual error sum of squares - *PRESS*), o qual consiste na diferença entre os valores *Y* de referência e o predito Equação 2 [19,54].

Equação 2

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Na qual y_i é o valor de referência para *i*-ésima amostra e \hat{y}_i é o valor predito desta amostra para a variável de interesse durante a validação cruzada. O decréscimo do valor de *PRESS* indica a habilidade do modelo em prever corretamente as variáveis de interesse das novas amostras [60].

Há uma necessidade de se testar e garantir a validade do modelo, como a significância estatística da curva ajustada, através da análise de variância. O R^2 é uma

razão entre a soma quadrática da regressão e a soma quadrática total, no qual $0 \leq R^2 \leq 1$, sendo assim quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 melhor será o ajuste do modelo [61].

1.4.2.5 Análise da cor através de processamento de imagens digitais

1.4.2.5.1 Processamento de imagens digitais para análise da cor do café torrado

1.4.2.5.1.1 Imagem digital

A luz compreende no espectro eletromagnético a região do visível (Fig. 15) na qual se caracteriza pela frequência (f) e pelo comprimento de onda (λ), os limites do comprimento de onda na região do visível a qual o ser humano é sensível se estende de 400 a 770nm. O olho humano é capaz de perceber dentro do intervalo desta faixa comprimentos de onda distintos como cores diferentes, também podemos definir as fontes de radiação que apresentam um único comprimento de onda como monocromáticas [12].

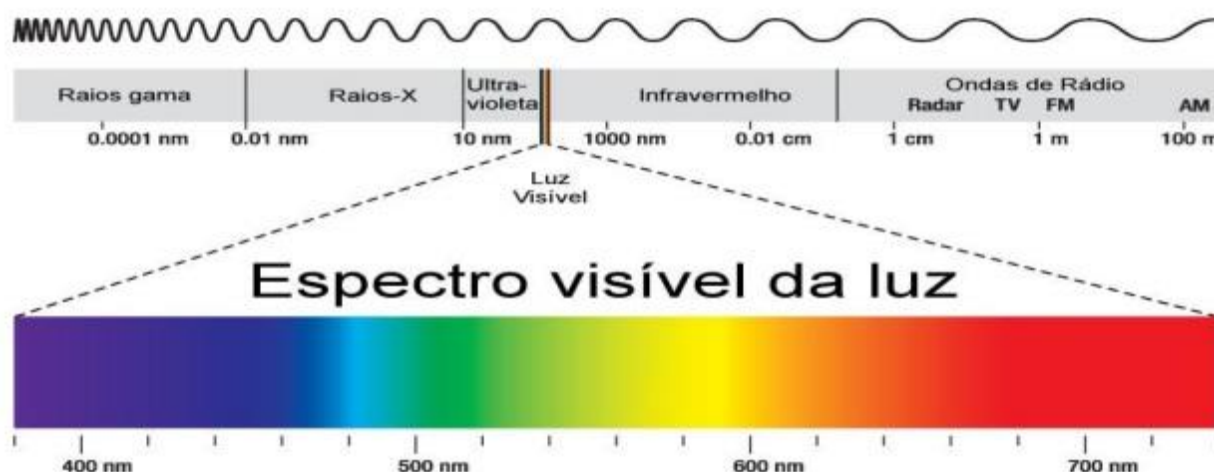


Fig. 15 - Espectro visível da Luz

Fonte: Adaptado de [12].

Uma imagem monocromática é descrita pela função da intensidade bidimensional, expressada por $f(x, y)$, em que x e y descrevem coordenadas espaciais,

sendo o valor de f proporcional a intensidade luminosa em qualquer ponto de x, y . Sendo os computadores incapazes de fazer o processamento de imagens contínuas, processando apenas imagens discretizadas, tornando-se indispensável representar imagens como arranjos bidimensionais de pontos [12].

Pixel ou elemento de imagem (Fig. 16) é como foi chamado cada ponto na grade bidimensional na qual representa a imagem digital, onde apresenta a designação matricial usual aonde o possível fazer a localização de um pixel dentro de um arranjo de pixels em uma imagem bidimensional [12].

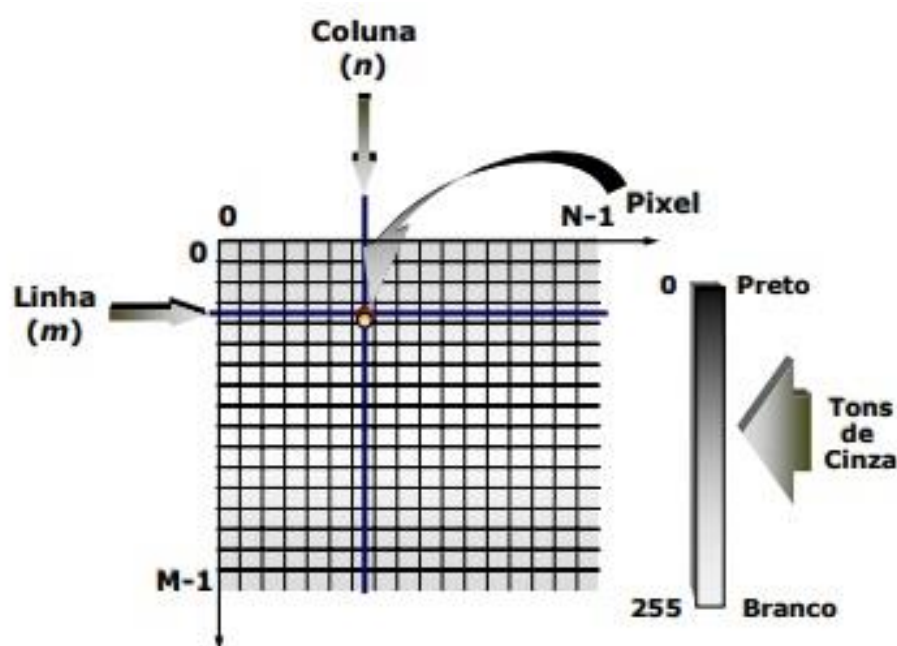


Fig. 16 - Representação de uma imagem digital bidimensional

Fonte: Adaptado de [12].

O primeiro índice evidencia a posição da linha m , aonde o pixel se encontra, o segundo ponto n , evidencia a posição da coluna, caso a imagem digital contiver M linhas e N colunas, ocorrerá uma variação de 0 a $M-1$ para o índice m , ocorrendo uma variação de 0 a $N-1$ para o índice n [12].

1.4.2.5.1.2 Sistema de visão computacional

O sistema de visão computacional é um processo de extração de dados que ocorre através de transformações que são realizadas em imagens digitais, vídeos, etc. que podem a uma nova representação destes dados ou a alguma tomada de decisão

[10]. Já olhando pela ótica da engenharia a visão computacional (Fig. 17) é um processo para a automação de tarefas que são realizadas pelo sistema de visão humana, estes sistemas de visão computacional poderiam reconhecer rostos em uma fotografia assim como uma pessoa [11].

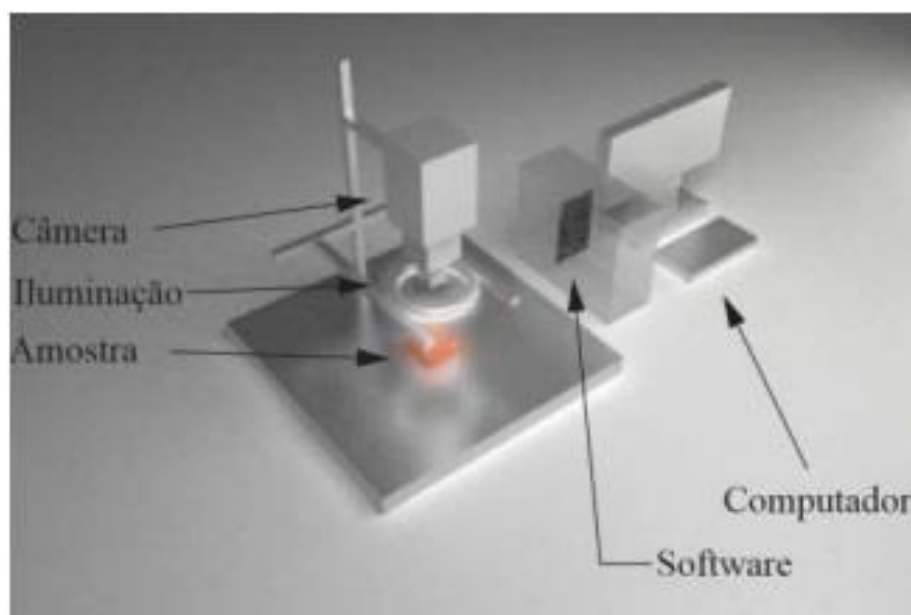


Fig. 17 - Modelo de visão computacional

Fonte: Adaptado de [45].

A vantagem desta técnica é não ser invasiva, rápida e econômica, para a utilização deste sistema alguns elementos são necessários como: uma fonte de iluminação, uma câmera digital e um software para processamento de imagem [62].

Este sistema funciona capturando a cor de cada pixel da imagem através de sensores de cor, sendo o sistema de cor RGB o mais utilizado, no qual cada sensor captura a intensidade de luz no espectro de vermelho, verde e azul [45,63].

Foi desenvolvido por Leme et al. [48] um sistema de visão computacional para identificar os graus de torra de cafés torrados e moídos, no qual obteve-se um alto grau de confiança entre os valores de Cielab e Agron.

A utilização de um sistema deste para a predição dos dados leva a ocorrência de erros numéricos oriundos do próprio método, sendo necessário a realização de uma análise de erros, uma estimativa do desvio padrão da componente aleatória é a

raiz do erro quadrático (root means square error - *RMSE*), Equação 3, sendo que o quando mais próximo a zero o valor de *RMSE* melhor vai ser o ajuste do modelo [64].

Equação 3

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Na qual y_i é o valor dos dados observados, \hat{y}_i é o valor previsto pelo ajuste, w_i é a ponderação aplicada para cada dado, n é o número de valores de resposta, m é o número de coeficientes estimados a partir dos valores de resposta [64].

1.4.2.5.1.3 Automação

Nos últimos anos a automação de métodos analíticos se tornou mais comum tendo grandes avanços no que se diz respeito a otimização de métodos analíticos, sendo de grande interesse para a indústria e pesquisadores, por se tratar de um meio de economia de matérias e diminuição do tempo dedicado aos procedimentos. Uma diferenciação entre automação, instrumentação e mecanização, é onde a automação pode ser referida como o uso de dispositivos que são capazes de tomar decisões por si só, buscando melhorar a inteligência humana no desenvolvimento de processos, sendo que a mecanização apenas compreende a utilização de dispositivos mecânicos visando diminuir o esforço realizado pelo ser humano e a instrumentação pode ser compreendida como um dispositivo para se realizar medidas e observações. Ainda, possuem as vantagens da confiabilidade das análises, com pouca intervenção do analista, simplicidade, versatilidade e melhor reprodutibilidade [65].

Os sistemas embarcados cabem em aproximadamente todas as atividades do ser humano e com os baixos custos tecnológicos atuais, alavancaram sua presença no cotidiano das pessoas. Projetar sistemas eletrônicos é de um alto grau de complexidade por apresentar um alto nível de dificuldade na captura de sinais e comunicação entre os dispositivos, uma oportunidade para automação é fazer uso de dispositivos de prototipação certificado por instituições confiáveis, como o Arduino [66,67].

1.4.2.5.1.4 Arduino

O Arduino foi desenvolvido no ano de 2005 por um grupo de 5 pesquisadores Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis. O objetivo era elaborar um dispositivo que fosse ao mesmo tempo barato, funcional e fácil de programar, sendo dessa forma acessível a estudantes e projetistas amadores, esta plataforma nos possibilita o envio de sinais analógicos e digitais para ter controle de motores, bombas, relés, dentre outros por meio de uma linguagem de programação fundamentada em C/C++ [68].

O Arduino (Fig. 18) é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, projetada com um micro controlador Atmel AVR, com linguagem de programação padrão, essencialmente C/C++ [66].

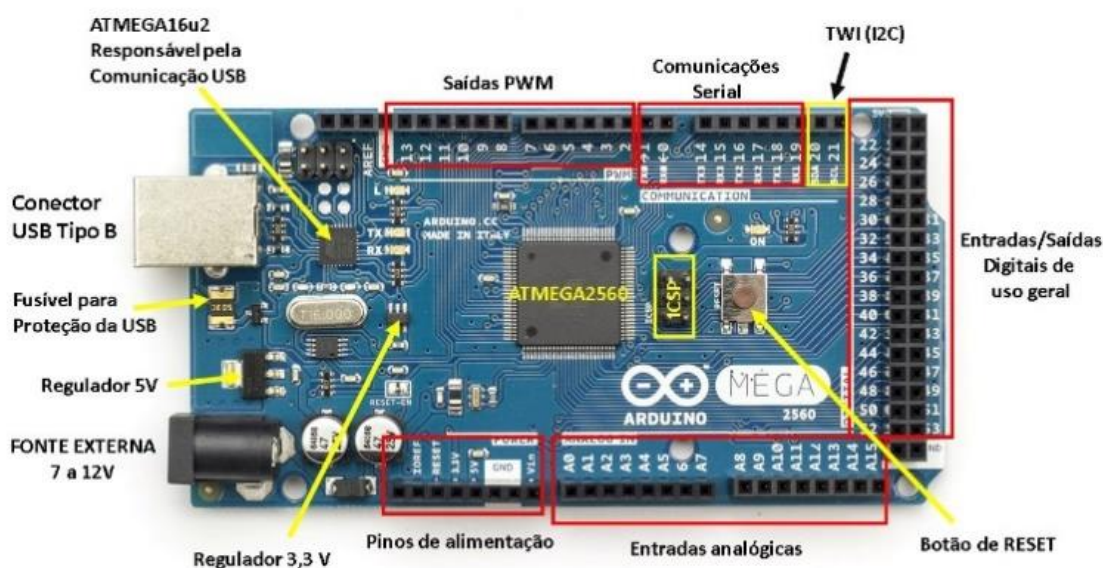


Fig. 18 - Dispositivo Arduino mega 2560

Fonte: Adaptado de [69].

Uma vantagem na sua utilização é a possibilidade de se realizar alterações na programação, sendo possível sua utilização em diversos projetos variando de acordo com a necessidade de cada usuário desde uma simples tarefa a uma tarefa mais elaborada, pois é uma programação de código aberto [66].

Hoje em dia há uma diversidade de modelos da plataforma Arduino no mercado, sendo classificadas como Mega 2560, Uno, Mini e Nano, tendo algumas delas até mais de uma versão.

1.5 Objetivo

1.5.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma instrumentação de baixo custo, automatizada para controle da torra de grãos de café.

1.5.2 Objetivo Especifico

- Projetar a dorna de torrefação de grãos de café;
- Montar e ajustar o protótipo;
- Desenvolver algoritmos de automação;
- Adquirir imagem digital em tempo real durante a torra de grãos de café;
- Adquirir espectros NIR em tempo real durante a torra de grãos de café;
- Realizar análise exploratória dos dados gerados pela instrumentação desenvolvida.

CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTAÇÃO

O sistema de torração automatizado foi desenvolvido empregando uma placa Arduino Mega 2560. O esquema apresentado na Fig. 19 mostra o sistema desenvolvido no presente trabalho.

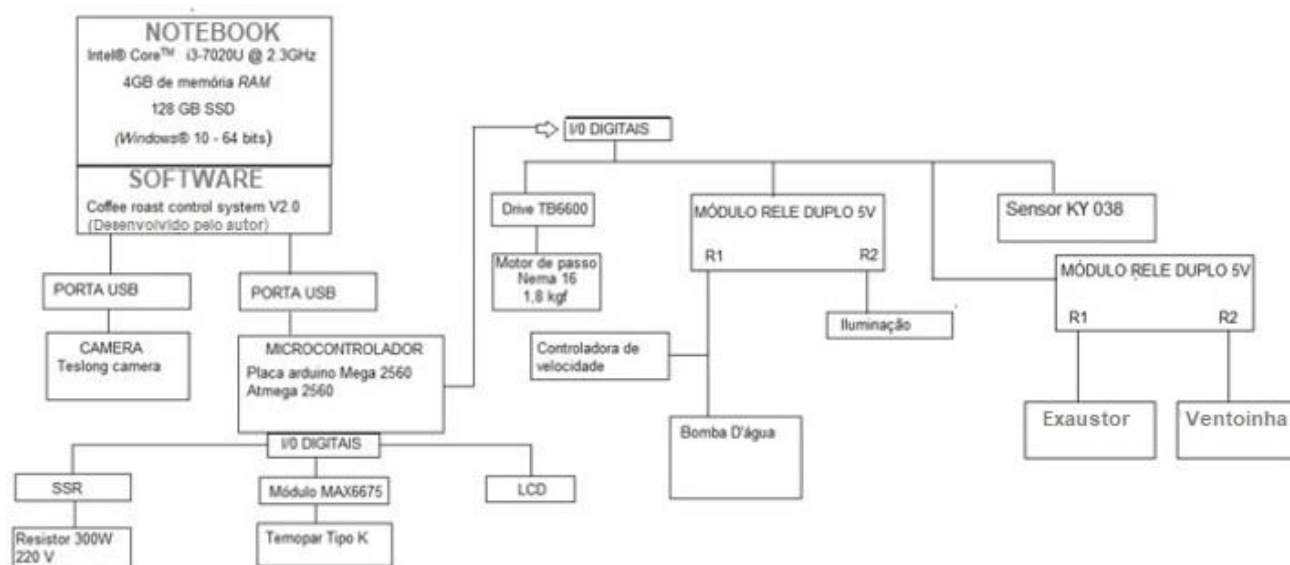


Fig. 19 - Esquema do sistema instrumental

Fonte: Próprio autor

Como é mostrado no fluxograma, a placa Arduino Mega 2560 é conectada a porta USB (“*Universal Serial Bus*”, porta universal) do microcomputador, onde através do software *Coffee Roast Control System V1.0* (desenvolvido no laboratório) são enviados comandos sequencialmente aos microcontroladores da placa para a mudança de estado das portas digitais de entrada/saída (*Input/Output*) o que possibilita o acionamento do relé de estado sólido responsável por controlar o sistema de aquecimento e do módulo MAX6675 responsável pelo controle da temperatura.

A micro controladora ainda é responsável por controlar o driver TB6600, este driver permite ligar, mudar a velocidade e direção de rotação do motor de passo, responsável pela movimentação dos grãos de café no interior da câmara de torração.

O primeiro módulo relé de dois canais (canal N01) é responsável por controlar o acionamento do sistema de resfriamento do módulo de imagem digital e do sistema NIR, funcionando acoplado a um Dimmer controlador de velocidade que é responsável por controlar a rotação do motor da bomba de água.

O outro canal, N02, é responsável por controlar o acionamento do sistema de iluminação da câmara de torração, o segundo módulo relé de 2 canais, onde o canal

N01 é responsável por controlar o sistema de exaustão, o outro canal N02 é responsável por controlar o sistema de resfriamento do torrador, e o sensor KY 038 responsável por captar o áudio proveniente do crack do café. O sistema utiliza-se do software Coffee Roast Control System V1.0 (desenvolvido no laboratório) permite o gerenciamento e aquisição dos dados experimentais (tempo em (s), temperatura em (°C), PID e imagem digital) provenientes dos sensores acoplados ao sistema.

2.1 Hardware e software

2.1.1 MICROCOMPUTADOR

No presente trabalho, utilizou-se: um notebook LENOVO IDEAPAD 330 com um processador Intel® Core™ i3-7020U CPU @ 2.3GHz 2.3 GHz 7th Gen, 4GB de memória RAM, 128 GB SSD e sistema operacional Windows® 10 - 64 bits.

2.1.2 PLACA ARDUINO MEGA 2560

O Arduino Mega 2560, é uma placa microcontrolada baseada em um microcontrolador ATmega2560 AVR. Possui 70 pinos de entrada / saída digital (dos quais 14 podem ser usados como saídas PWM (modulação por largura de pulso) e 16 podem ser usados como entradas analógicas), (Fig. 20).

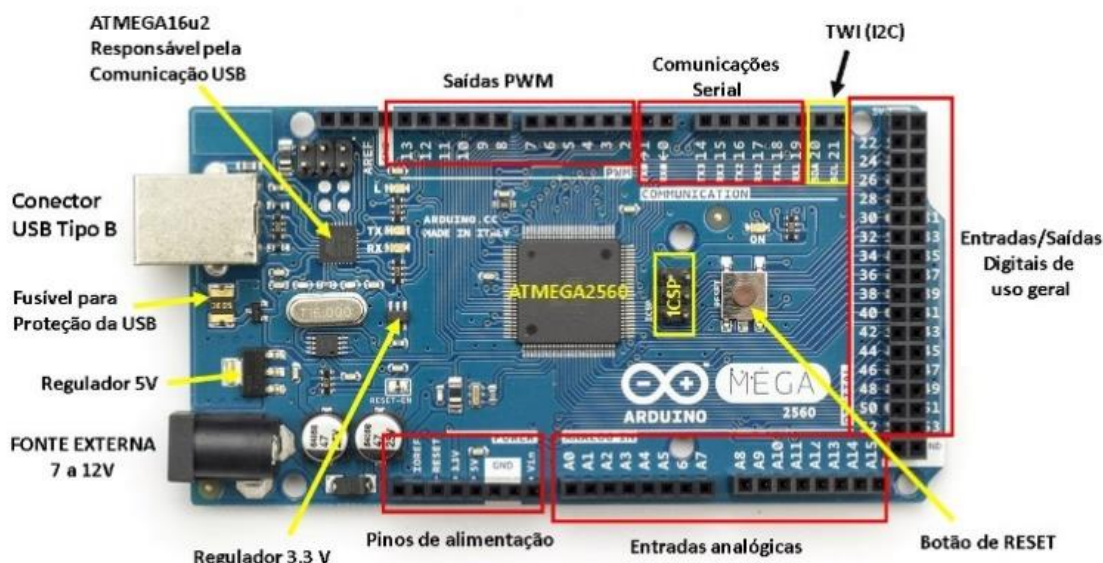


Fig. 20 - Esquema da placa utilizada no sistema Arduino MEGA 2560
 Fonte: Adaptado de [69].

Toda a programação dos macros comandos foi desenvolvida na plataforma do Arduino, *IDE Arduino* versão 1.8.10 que utiliza linguagem C e C++, e compilada na placa para o controle da instrumentação. A Tabela 2 mostra em detalhes o *hardware* da placa utilizada no sistema.

Descrição	Arduino MEGA 2560 R3
Alimentação (V):	5,0
Entrada Regulada (V):	7 ~ 12
Consumo (mA):	~ 70
Temperatura (°C):	-40 ~ 85
Processador:	ATmega2560 AVR com até 16 MIPS
Frequência (MHz):	0 ~ 16
Memória FLASH (KB):	256
Memória RAM (KB):	8
Memória ROM (KB)	4
Pinos de entrada/saída I/O*:	70 pinos com 14 PWM

Tabela 2. Hardware da placa utilizada no sistema

R3 – 3ª geração da placa; * I/O – *Input/Output* (entrada/saída); ** AD – Analógico-Digital; *** DA – Digital-Analógico;

Fonte: Adaptada de [70].

2.1.3 MÓDULO RELÉ

Este módulo apresenta dois canais de acionamento, podendo ser alimentado pela própria placa Arduino (5,0 V) utilizando o mesmo polo negativo (GND) ou sendo utilizada uma alimentação externa de 5 a 12 VDC, utilizando os fotoacopladores do próprio módulo (Fig. 21). O módulo relé consegue fazer o acionamento de cargas com até 220V AC, sendo equipado com transistores, conectores, leds, diodos e relés, no qual cada canal possui um led para indicar o estado da saída do relé.



Fig. 21 - Módulo Relé duplo utilizado no sistema

Fonte: Adaptado de [71].

Foram utilizados dois módulos relé sendo o primeiro responsável pelos acionamentos: do sistema de resfriamento do módulo de imagem digital e do sistema NIR no canal 01 e do sistema de iluminação no canal 02, o segundo módulo de relé é responsável pelo acionamento do sistema de exaustão no canal 01 e pelo sistema de resfriamento da câmera de torração no canal 02.

2.1.4 CONTROLADOR DE VELOCIDADE MOTOR DC

Este controlador de motor DC permite controlar a direção de um motor DC, fazendo uso de uma largura de pulso modulada (PWM) com ciclo de trabalho ajustável, este controlador pode ser alimentado pela própria placa Arduino (5,0 V)

utilizando o mesmo polo negativo (GND) ou sendo utilizada uma alimentação externa de 6 a 28 VDC (Fig. 22).



Fig. 22 - Controlador de Velocidade Motor DC

Fonte: Adaptado de [72].

O controlador é acoplado a uma mini bomba de água RS360-sh capaz de bombear água, no qual faz o controle da velocidade de rotação do motor através de uma chave de rotação que é responsável pelo sistema de resfriamento do módulo de imagem digital e do sistema NIR.

2.1.5 TERMOPAR TIPO K COM MÓDULO MAX6675

O Termopar Tipo K com Módulo MAX6675 (Fig. 23) é um sensor de temperatura que já vem com o módulo que trata os sinais recebidos, medindo a tensão no termopar e enviando, via SPI (Serial Peripheral Interface), o valor medido já com o sinal tratado, o módulo MAX6675 pode ser alimentado pela própria placa Arduino (5,0 V) utilizando o mesmo polo negativo (GND).

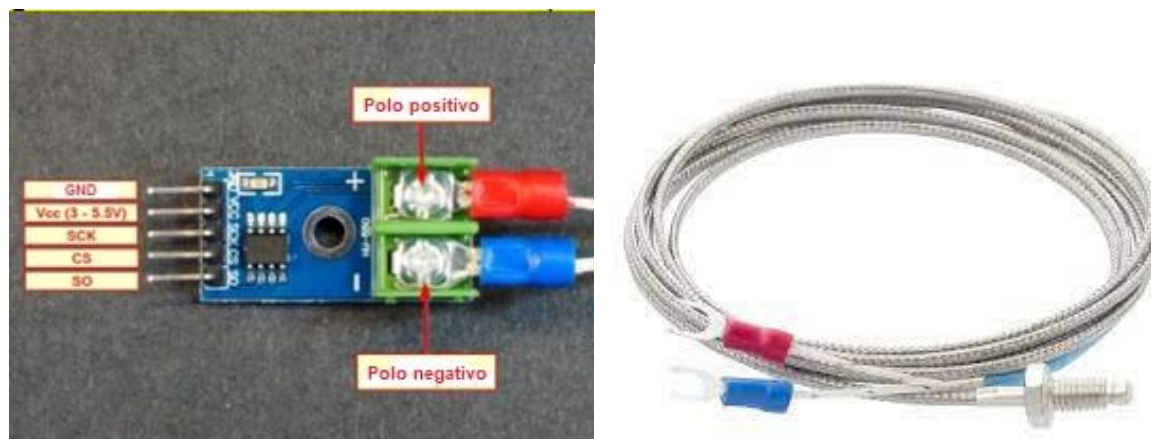


Fig. 23 - Módulo MAX6675 e Termopar do tipo K
 Fonte: Adaptado de [73].

2.1.6 RELÉ DE ESTADO SÓLIDO

O relé de estado sólido também conhecido como SSR (Solid State Relay) (Fig. 24), é um componente eletrônico com características sólidas, isto é, não possui qualquer tipo de elemento mecânico ou peça móvel, sendo assim, este equipamento apresenta menor desgaste e maior vida útil quando comparado as tradicionais relés sendo.



Fig. 24 - Relé de Estado Sólido.
 Fonte: Próprio autor

O relé de estado sólido é diferente de um relé eletromecânico. A principal diferença é que o relé de estado sólido não possui elementos mecânicos ou peças móveis em seus mecanismos. Sendo assim o seu funcionamento é a partir de

componentes semicondutores que tem a função de acionar uma carga de maior potência a partir de uma baixa potência aplicada em sua entrada ao invés dos contatos físicos como por exemplo o mosfet.

Este relé está acoplado a um resistor de 300 W a 220 V (Fig. 25) responsável pelo aquecimento do torrador, o resistor é preso ao corpo do torrador, transformando energia elétrica em energia térmica e basicamente ele funciona limitando a corrente elétrica que passa por ele.

Este sistema trabalha em uma curva de temperatura definida na programação do software, basicamente ela funciona através de um PID que é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade capaz antecipar através da ação derivativa.



Fig. 25 - Resistor.

Fonte: Próprio autor

2.1.7 MINI BOMBA DE ÁGUA

A mini bomba de água Rs360-sh foi desenvolvida com a finalidade de facilitar a criação de projetos hidráulicos com plataformas microcontroladas, sendo comumente utilizado em projetos com Arduino, PIC, Raspberry, NodeMCU ESP8266 e outras plataformas embarcadas.

Esta mini bomba de água (Fig. 26 (a)) opera com alimentação na faixa de 3 a 5VDC e tem consumo de corrente de 800mA, responsável pelo bombeando da solução utilizada no sistema de resfriamento do suporte da câmara (Fig. 26 (b)) e do suporte da fibra óptica (Fig. 26 (c)), que foram desenvolvidos com a finalidade de troca térmica, foi utilizado um tubo de cobre de $\frac{1}{4}$, com 1 metro de comprimento para a confecção dos dois trocadores de calor. Esta mini bomba está conectada com o controlador de velocidade de motor DC 6V – 28V 3A com chave de rotação (Fig. 26 (d)), na qual e responsável por controlar a vazão da bomba.

(a)



(b)



(c)



(d)



Fig. 26 - (a) Mini bomba de água RS360-sh, (b) Trocador de calor do sistema de imagem digital, (c) Trocador de calor do sistema NIR e (d) Controlador de velocidade motor DC.

Fonte: Adaptado de [74] e próprio autor.

Nos trocadores de calor que estão representados acima nas figuras 26 (b) e (c) é aonde ocorreria a troca de térmica entre a corrente fluida (fonte fria) e o suporte da câmera responsável pelo sistema de imagem digital e do suporte da fibra óptica responsável pelo sistema NIR (fonte quente), entre as quais existe um diferencial de temperatura, ocorrendo o aquecimento da fonte fria (água) e o resfriamento da fonte quente (suporte da câmera e da fibra óptica).

2.1.8 Sensor KY 038

O sensor KY 038 (Fig. 27) pode ser alimentado pela própria placa Arduino (5,0 V) utilizando o mesmo polo negativo (GND), este sensor tem o objetivo de medir a intensidade sonora do ambiente ao seu redor, variando o estado de sua saída digital caso detectado um sinal sonoro. O limite de detecção pode ser ajustado através do potenciômetro presente no sensor que regulará a saída digital D0. Contudo, para ter uma resolução melhor, é possível utilizar a saída analógica A0 e conectar a um conversor AD, sendo utilizado no sistema com a finalidade de captar a frequência sonora dos cracks emitidos pelo café durante o processo de torra.

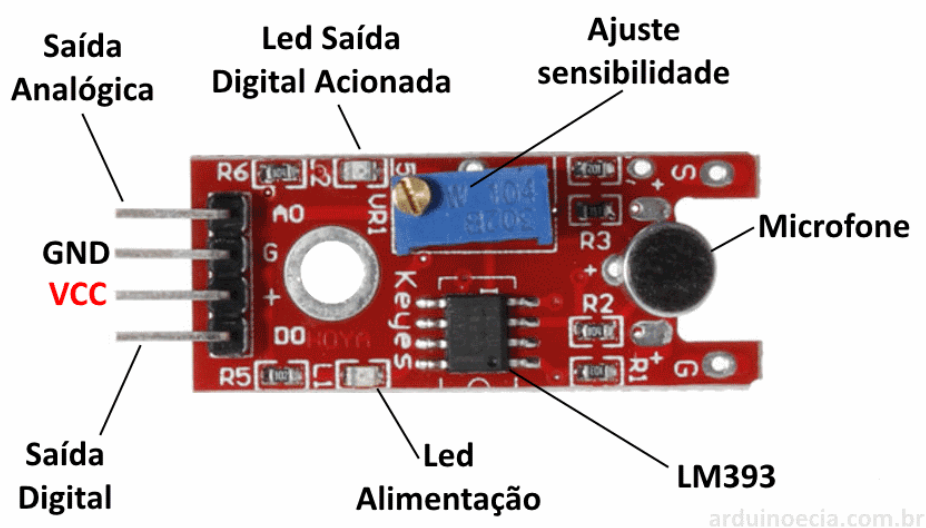


Fig. 27 - Sensor KY 038

Fonte: Adaptado de [70].

2.1.9 SUPORTE DO SISTEMA DE TORRA

O projeto piloto do torrador automatizado foi desenhado em dimensões reais na plataforma *online Sketchup*, como indicados com detalhes na Fig. 28. Para a montagem do suporte do torrador e instalação dos componentes eletrônicos, foram utilizadas 4 peças de madeiras MDF 20mm (dimensões indicadas nas imagens abaixo) e 14 parafusos 3,5x12, na qual foram acoplados 1 motores de passo NEMA 16 1,8 kgf, 3 barras roscadas de $\frac{1}{4}$ de aço carbono polido, cortadas com 19cm de comprimento cada, para estabilização do torrador, 1 reservatório de água de 5000mL de plástico e 1,0m de tubulação de silicone no diâmetro de $\frac{1}{4}$ e toda a eletrônica envolvida. A Fig. 29 mostra o suporte do torrador construído com todos os componentes eletrônicos montados.

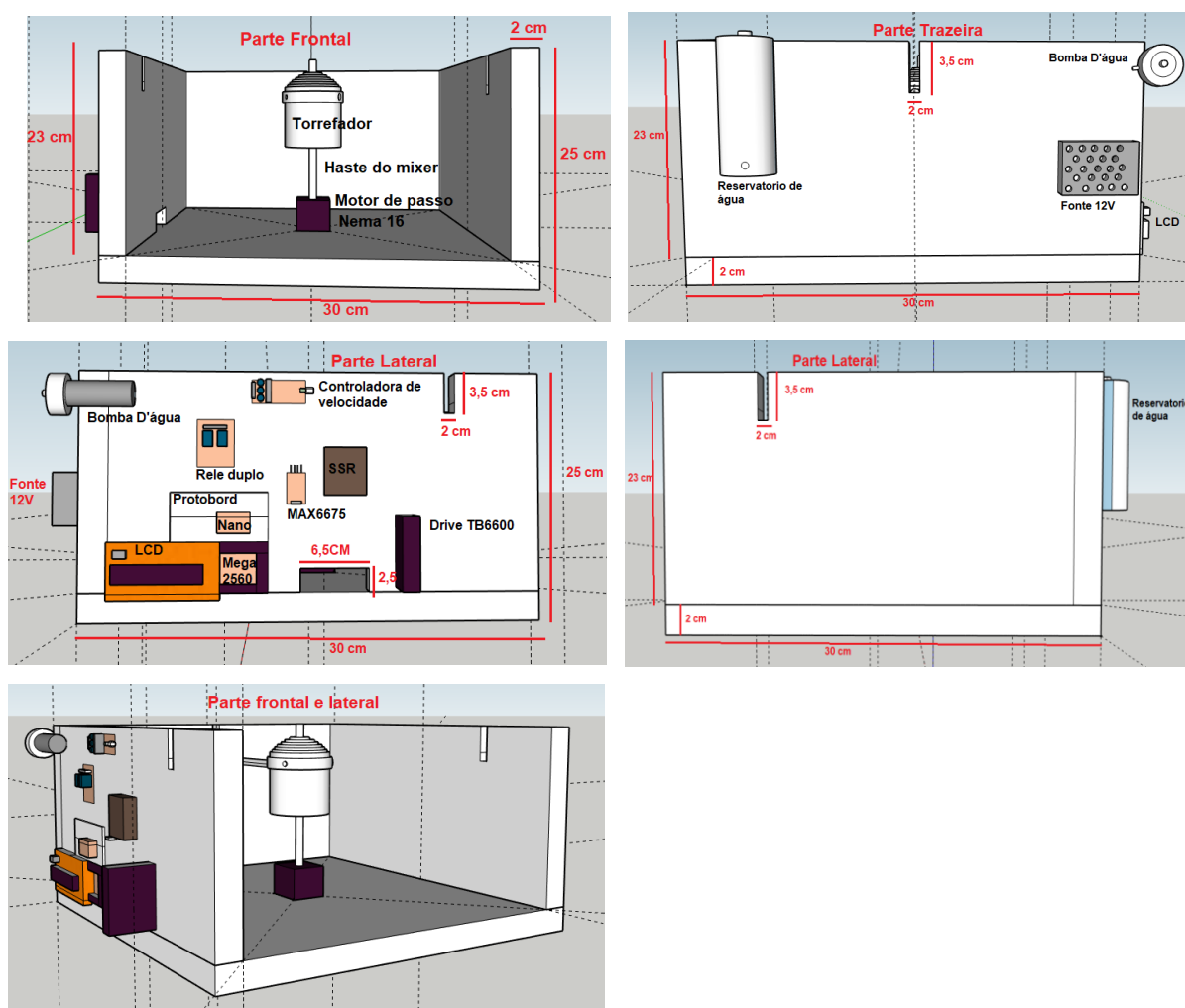


Fig. 28 - Imagens do suporte do sistema de torra automatizado desenvolvido na

plataforma *online Sketchup*.

Fonte: Próprio autor.

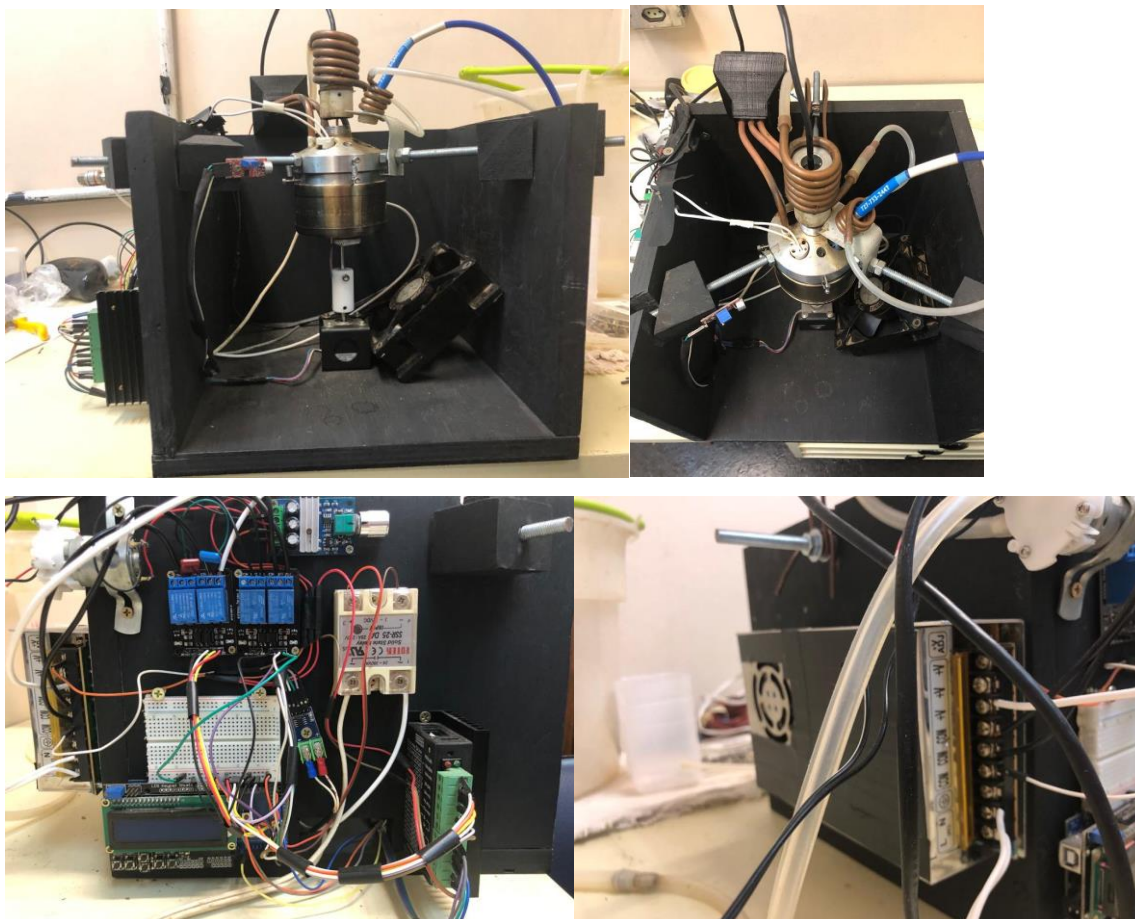


Fig. 29 - Suporte do sistema de torra montado com os componentes eletrônicos

Fonte: Próprio autor

2.1.10 Módulo drive TB6600

Módulo Driver Motor de Passo TB6600 é um driver para motor de passo baseado no circuito integrado de alto desempenho da Toshiba TB6600, ele garante uma alta eficiência e baixa vibração, trabalhando com uma tensão de entrada de no máximo 40V e corrente de saída de no máximo 4A, trabalha com 5 tipos de modos selecionáveis de passo (1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 1/32 passo). Possui proteção contra sobtensão, sobretensão, sobrecorrente e sobreaquecimento. (Fig. 30).

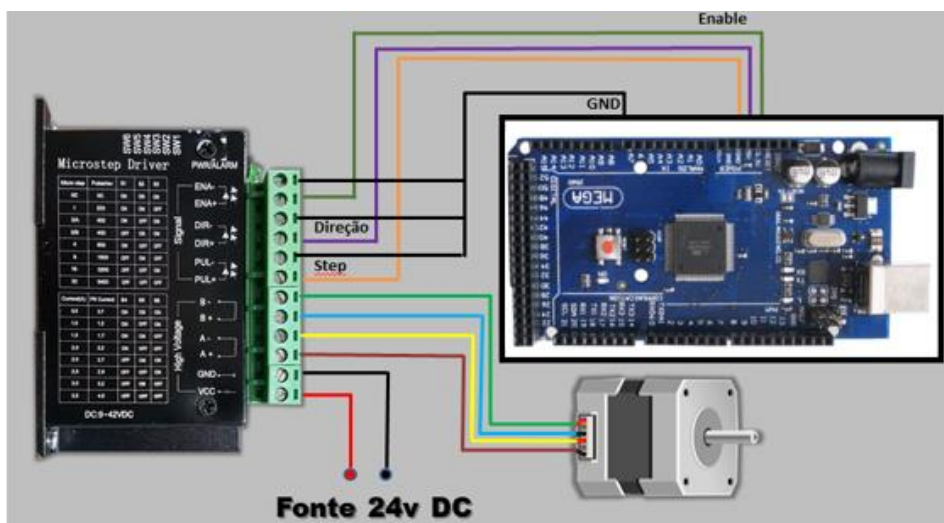


Fig. 30 - Esquema Drive TB6600

Fonte: Adaptado de [75].

O esquema mostra a conexão entre o drive TB6600 e o motor de passo NEMA 16 de 1.8 Kgf de torque, responsável pela movimentação da pá no interior do torrador também podemos ver a conexão entre o drive e a placa Arduino Mega 2560 que é responsável por enviar os comandos para o funcionamento do motor.

2.1.11 Sistema de exaustão

O sistema de exaustão foi desenvolvido utilizando uma ventoinha modelo MVD 0612 HB – 25 DC 12 V – 0,23 A (Fig. 31 (a)) a qual foi acoplada em um suporte (Fig. 31 (b)) que foi desenvolvido utilizando uma impressora 3d, o suporte possui saídas na qual são acopladas tubulações de cobre de $\frac{1}{4}$ com aproximadamente 30 cm de comprimento (Fig. 31 (c)) que se conectam diretamente dentro da câmara de torração através de uma entrada na tampa do torrador.

Sendo responsável pela retirada da fumaça gerada durante o processo de torração, assim evitando que o grão absorva a fumaça e fique com aspecto defumado e a lente do suporte do sistema de imagem digital (câmera) não fique com aspecto embaçado.

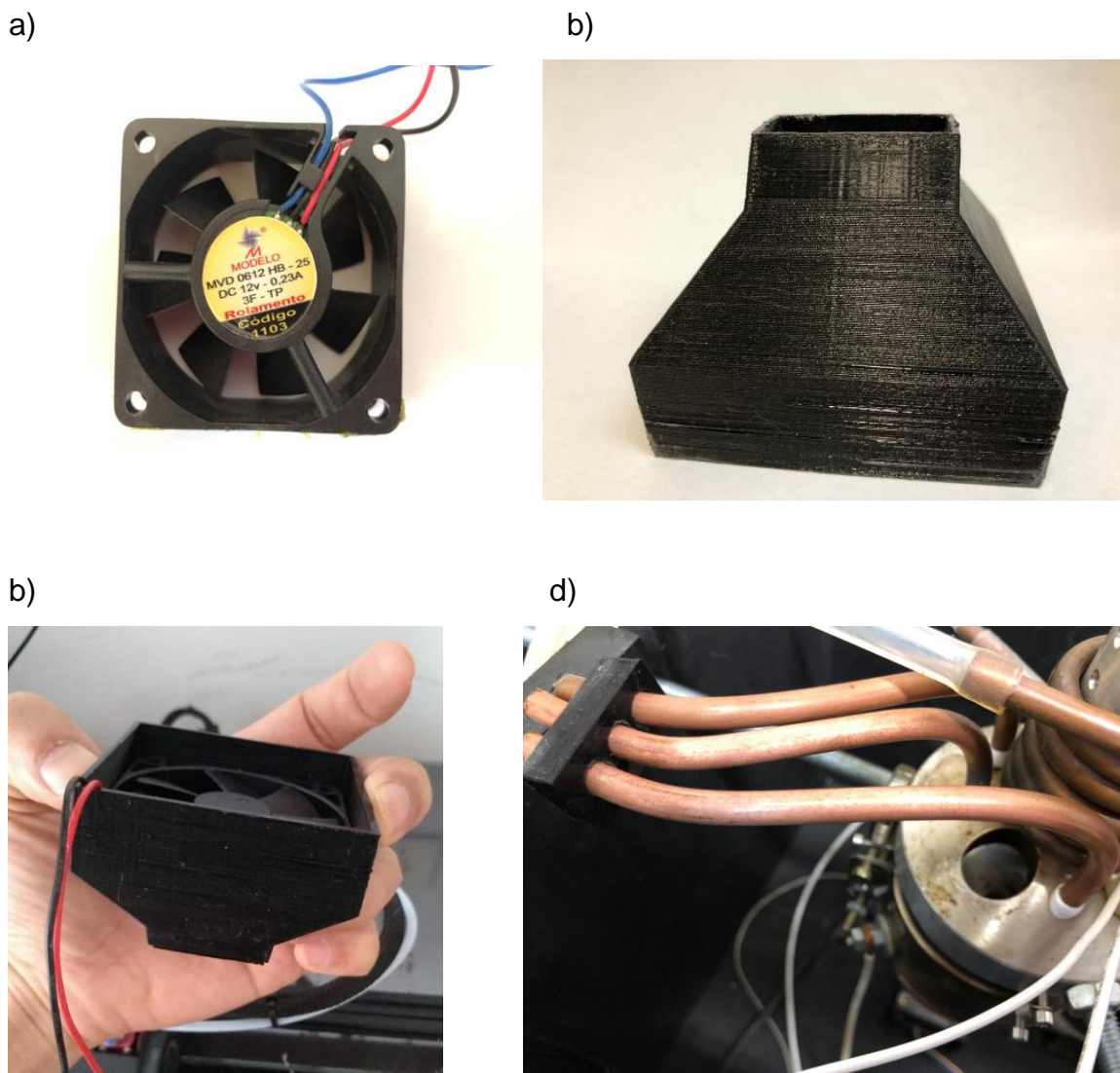


Fig. 31 – (a) Ventoinha, (b) e (c) suporte ventoinha, (d) Tubulação de Cobre

Fonte: Próprio Autor

2.1.12 Sistema de resfriamento da câmara de torração

O sistema de resfriamento foi desenvolvido utilizando uma ventoinha Muffin modelo mu2A1 - 115v – 50/60HZ – 14W (Fig. 32), na qual é acionada ao final da torra via software exercendo a função de resfriamento da câmara de torração, na qual leva aproximadamente 10 minutos para o decaimento da temperatura final de torra para a temperatura ambiente.

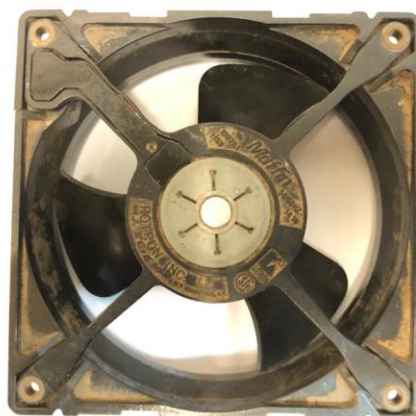


Fig. 32 - Ventoinha

Fonte: Próprio Autor

2.1.13 Iluminação

A iluminação no interior da câmara de torra é feita utilizando uma lâmpada halógena bipino JC 12v Gy6.35 50w Ourolux (Fig. 33 (a)) juntamente com um soquete de porcelana Gu5.3 P (Fig. 33 (b)) disposto na da câmara de torração através da uma entrada na tampa do torrador.

a)



b)

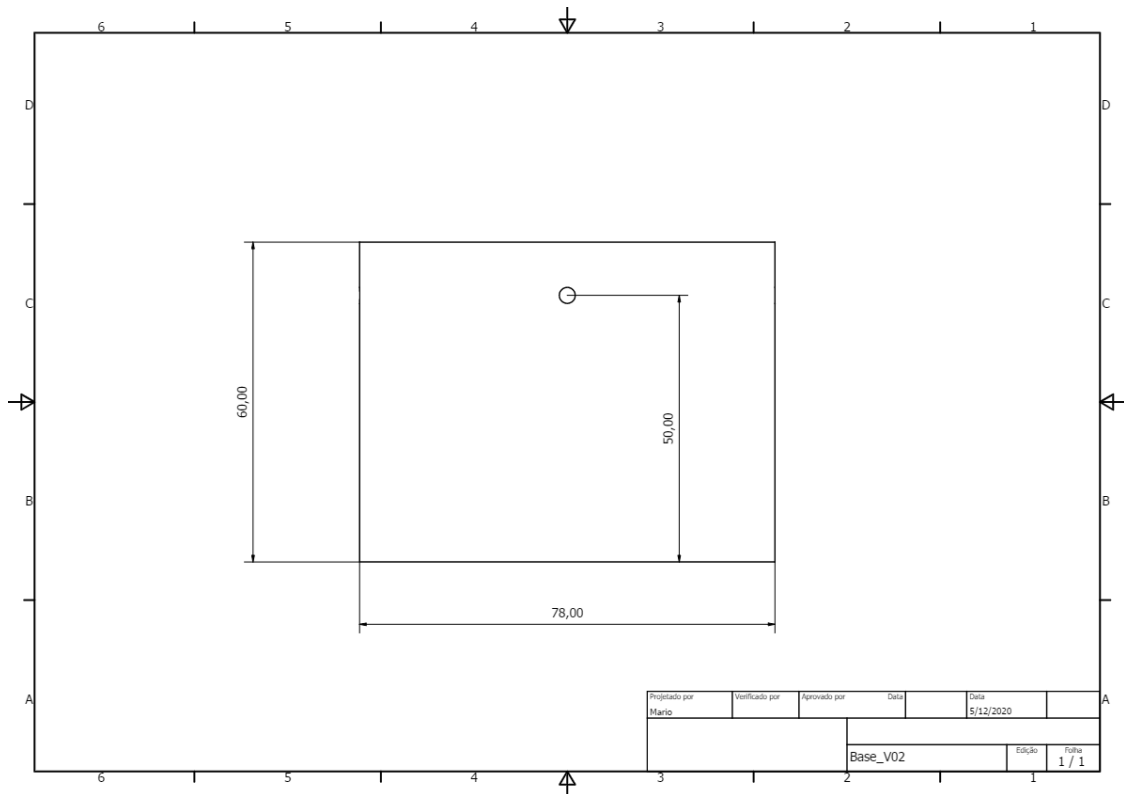


Fig. 33 - (a) Lâmpada Halógena, (b) Soquete

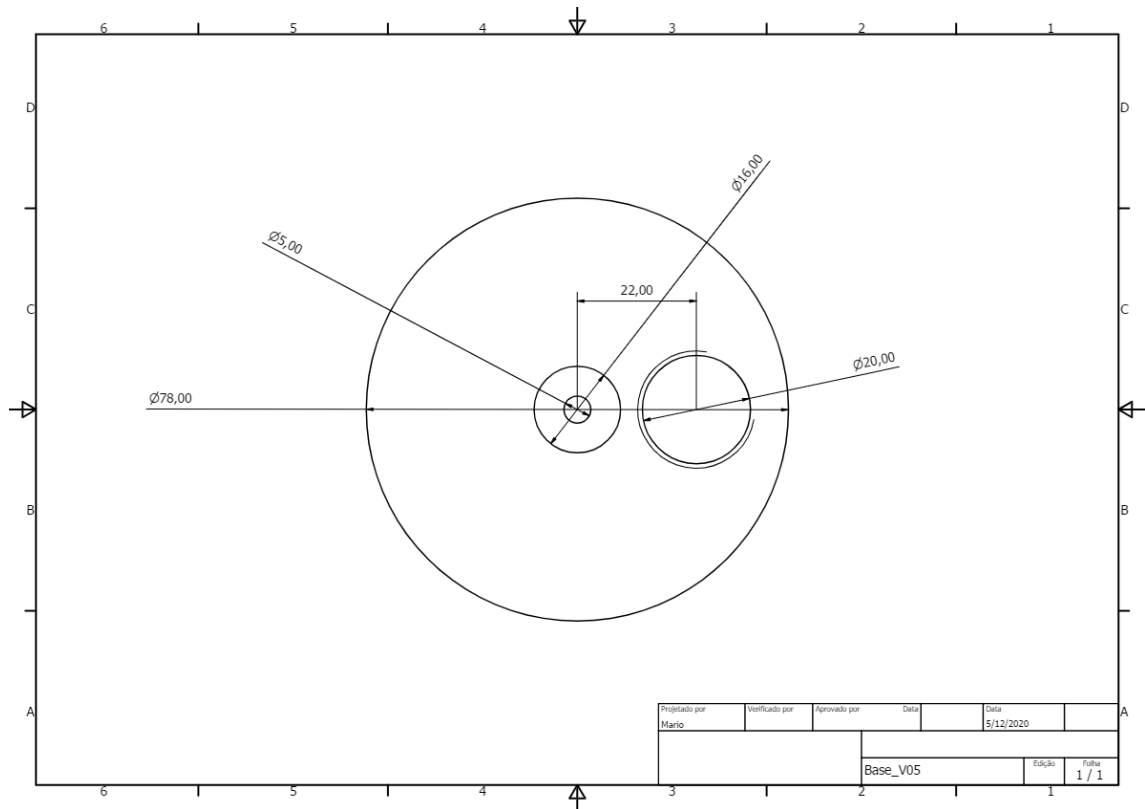
Fonte: Adaptado de [76].

2.1.14 Câmara de Torrefação

A câmara de torra foi desenvolvida utilizando o software Autodesk Inventor Professional 2020, na qual foi feito todo o dimensionamento em milímetros das peças que compõem a câmara de torra em tamanho real sendo elas a base (Fig. 34 (a)), a tampa (Fig. 34 (b)), haste da hélice (Fig. 34 (c)) e hélice (Fig. 34 (d)), após projetadas as peças via software as mesmas foram encaminhadas a uma empresa especializada em tornearia onde foram confeccionadas em alumínio por ser um material de baixo custo, para a construção do protótipo.



Vista lateral da câmara de torrefação.



Vista da parte inferior da câmara de torrefação com o encaixe do eixo do motor e a saída dos grãos.

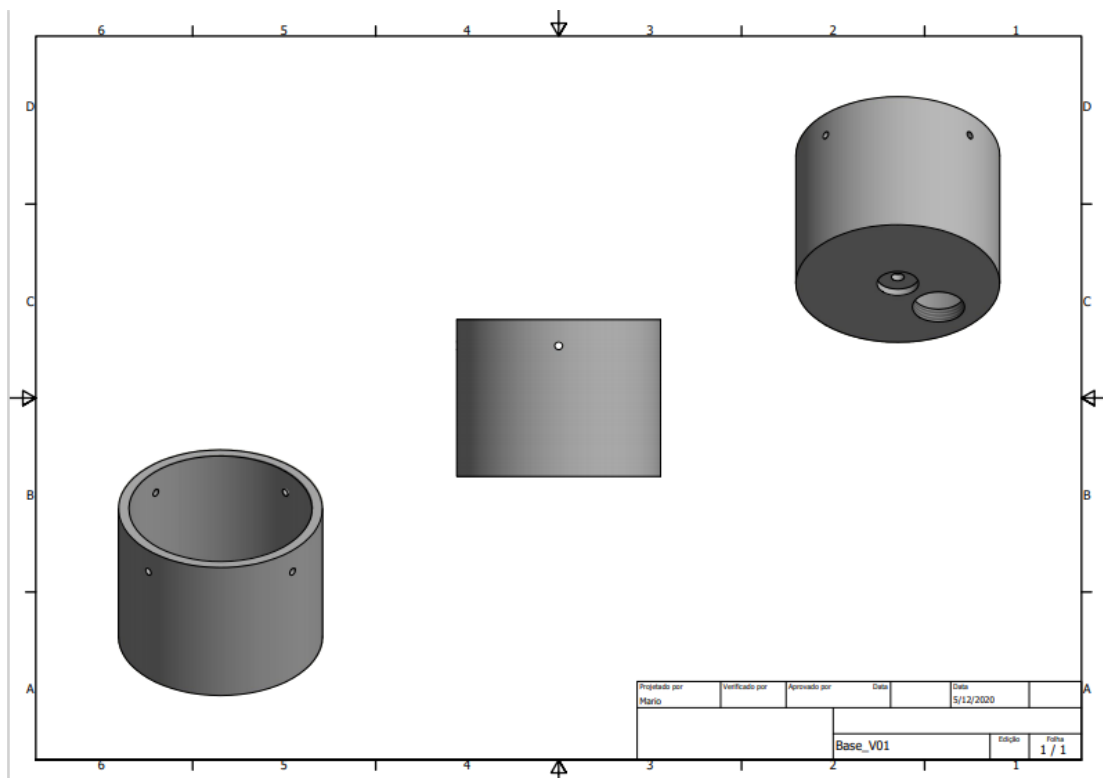
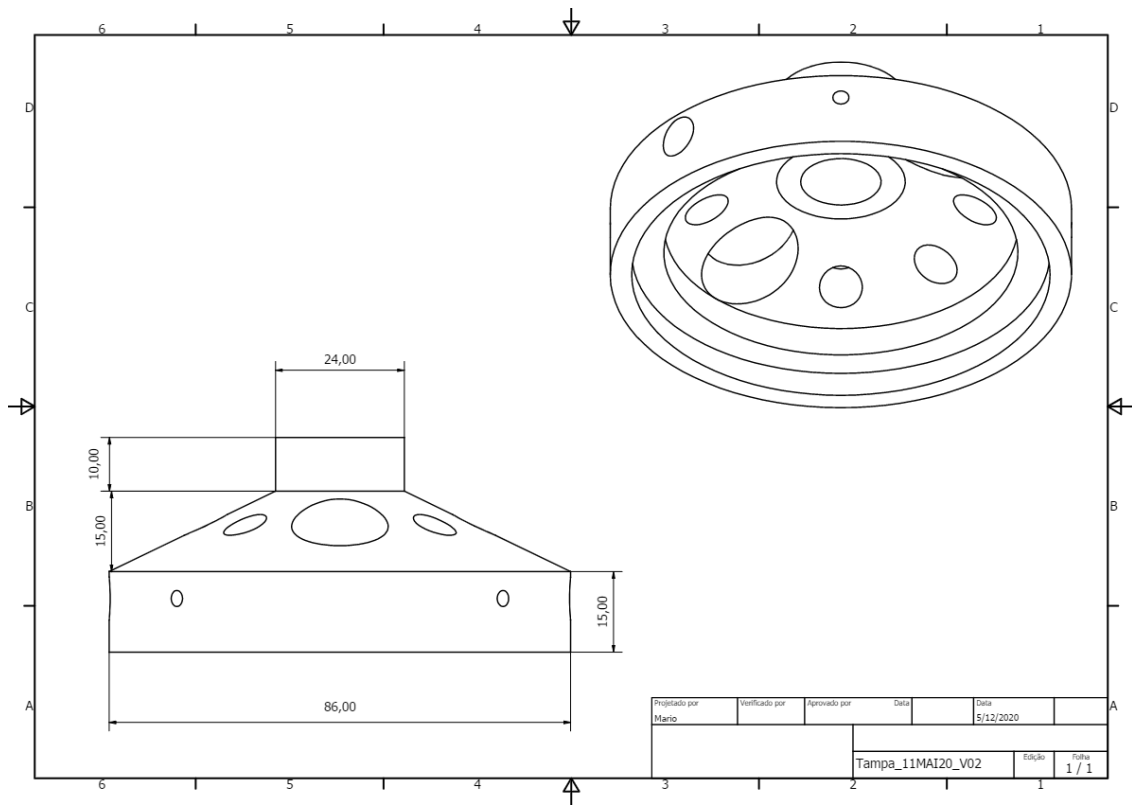
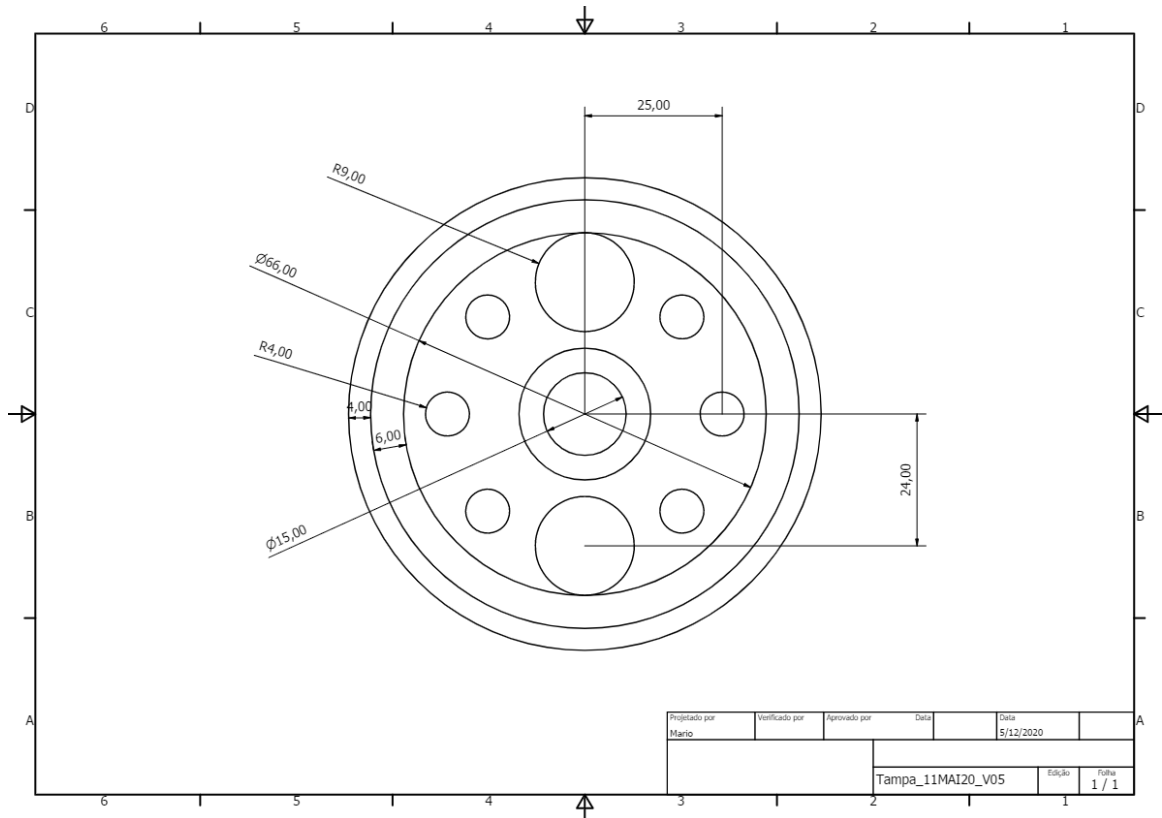


Fig. 34 - (a) Base, Vista da parte superior, lateral e inferior da câmara de torrefação.

Fonte: Próprio autor



Vista lateral da tampa da câmara de torrefação.



Vista da parte inferior da tampa da câmara de torrefação com as entradas para os sensores e entrada dos grãos.

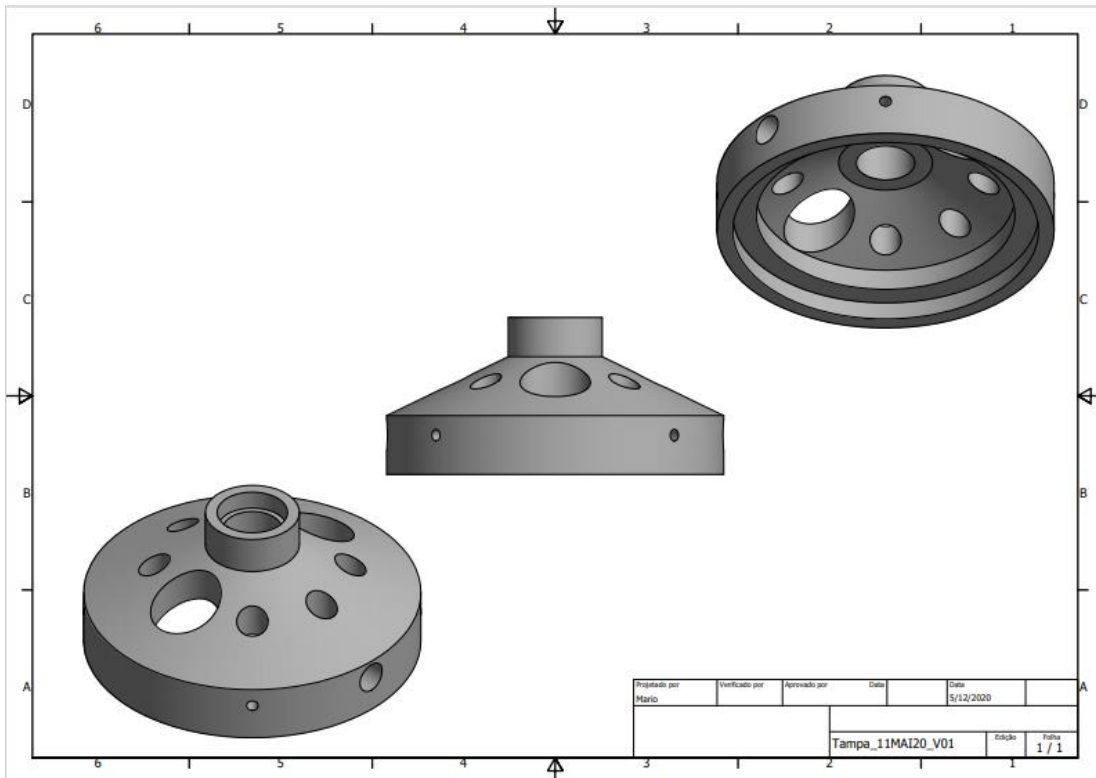


Fig. 34 - (b) Tampa, Vista da parte superior, lateral e inferior da tampa da câmara de torrefação.

Fonte: Próprio autor

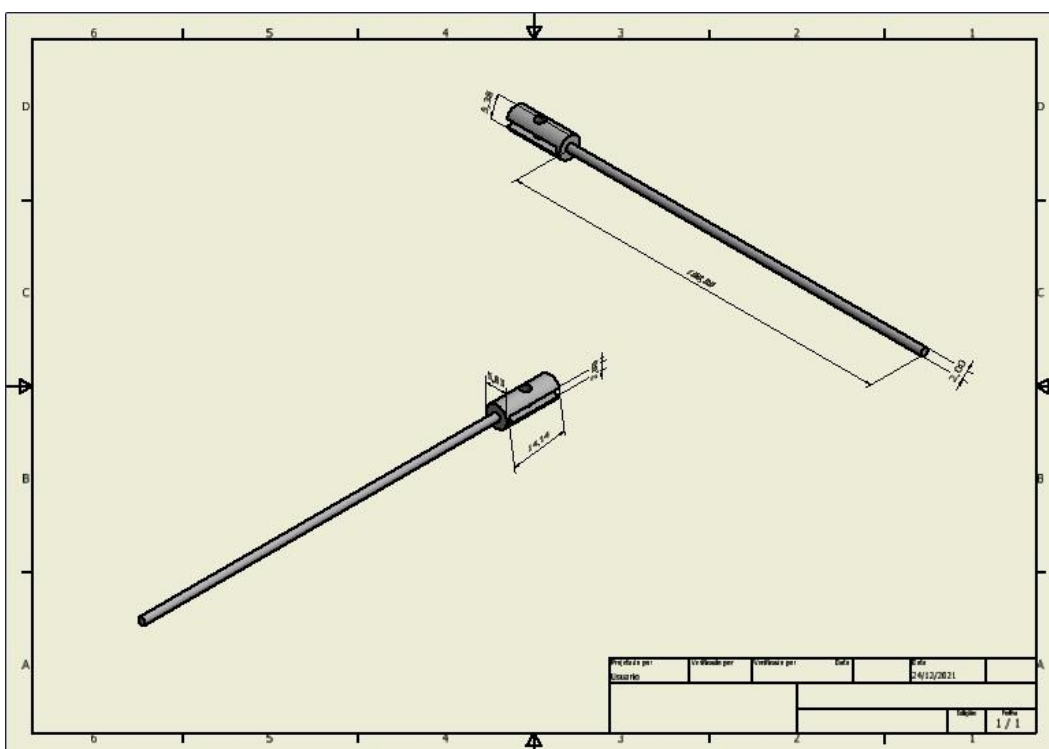


Fig. 34 - (c) Haste da Hélice, Vista da haste que é acoplada a pá que é responsável pela movimentação dos grãos dentro da câmara de torrefação.

Fonte: Próprio autor

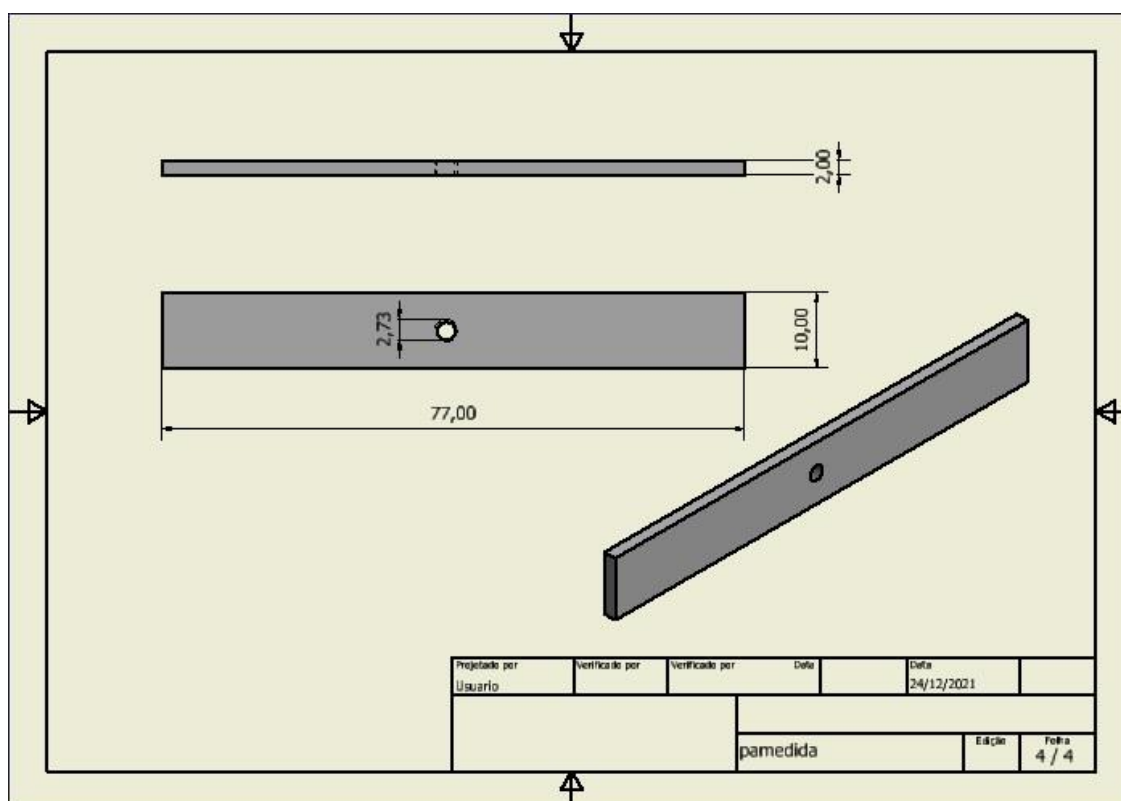


Fig. 34 - (d) Hélice, Vista lateral da pá que é responsável pela movimentação dos grãos de café.

Fonte: Próprio autor

2.1.15 Sistema de imagem digital

Para a aquisição da imagem digital foi utilizado uma sonda câmera inspeção Android Usb da marca Teslong (Fig. 35) com diâmetro da câmera de 7 milímetros, com 6 leds dispostos ao redor da lente para iluminar a área de inspeção, possuindo uma resolução de 640 x 480 e distancia focal de 4cm, com comprimento de 2 metros aproximadamente, no qual faz a aquisição da imagem digital em tempo real dos grãos de café dentro do torrador, a sonda fica acoplada em um suporte feito parte em teflon, parte em alumínio que se encontra na parte superior do torrador, o teflon é utilizado para diminuir a transferência de calor entre o torrador e o suporte. A sonda tira snapshots (fotos) durante o processo de torra no intervalo de 30 segundos, o que é definido via software e as imagens são salvas e processadas pelo software.



Fig. 35 - Sonda câmera Teslong

Fonte: Proprio autor

2.1.16 NIR

O DLP NIRscan Nano (Fig. 36 (a)) é um módulo de avaliação compacto operado por bateria (EVM) para soluções portáteis de espectroscopia no infravermelho próximo, o dispositivo apresenta um micro espelho digital DLP2010NIR (DMD). O EVM incorpora o DLP2010NIR DMD, uma rede de difração e um detector de elemento único para substituir os caros designs de detector baseado em matriz linear InGaAs. Apresentando um processador TI Tiva™ TM4C1297NCZAD. Este dispositivo será utilizado para fazer a varredura do espectro no infravermelho próximo pela qual a refletância emitida pelos grãos de café é mensurada por meio de um cabo de fibra óptica com diâmetro de 550 μm e 0,5 m de comprimento (Thorlabs, Inc.) (Fig. 36 (b)), que está acoplada na parte superior do torrador a uma distância de 2 cm da tampa da câmara de torra, para evitar danos a fibra pela elevada temperatura.

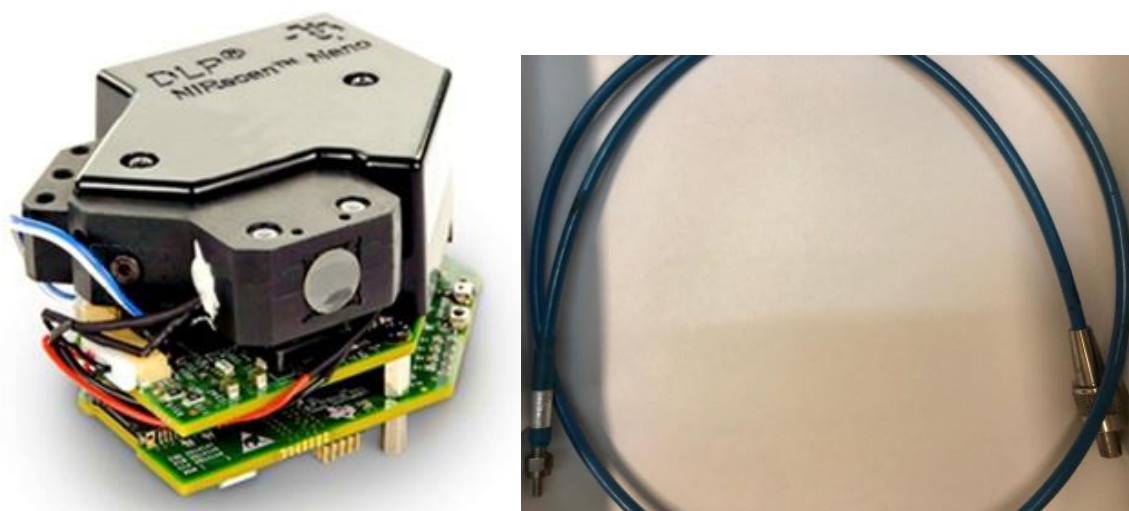


Fig. 36 - (a) DLP NIRscan Nano, **(b)** Fibra óptica

Fonte: Adaptado de [77].

2.1.17 SOFTWARE

O *software* ProCoffee V1.0 foi desenvolvido para o controle do sistema de torrefação sendo criado por Edson Roberto Santesso (Laboratório de Análítica Thomas Edison - LATE, Departamento de Química - UEL), que foi programado em linguagem Matlab 2016, compatível com *Windows*® 10 de 32 bits e 64 bits. O programa realiza o controle de todos os componentes presentes no equipamento, adquirindo dados da amostra de forma sistemática e prática. Sem contar que temos a criação da curva de temperatura, do histograma do canal de cor da imagem digital e a frequência sonora dos cracks. (Fig. 37).



Fig. 37 - Imagens do Software ProCoffee V1.0.

Fonte: próprio autor.

O programa apresenta mais de uma opção de comunicação serial, podendo comunicar-se com a placa arduino e outro equipamento, como a câmera. O *software* consegue recepcionar e transmitir os dados de forma livre, sendo possível o estudo de uma otimização de seus experimentos e os macrocomandos do torrador são comandos internos. Também permite a escolha as temperaturas inicial e final como também a duração da torra e o intervalo entre as fotos dispostas no *setpoint*, outra funcionalidade é a escolha dos canais, do tipo de média e do espaço de cores, plotando um histograma em tempo real referente ao canal e o espaço de cores escolhido.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Amostras e materiais

3.1.1 Amostras

Os grãos de café totalizando 7 amostras, que foram utilizados neste trabalho (Tabela 3) são da espécie *Coffea Arábica*, sendo adquiridos do Instituto Agronômico do Paraná (Iapar), campus Londrina-Pr.

Código	Nota SCAA	Procedência	Processo	Cultivar (informada pelo produtor)
1053	79,67	Mandaguari	Natural -N	IPR 100
1056	80,67	Mandaguari	N	IPR 106
1077	Riada	Cambira	N	Tupi/Iapar 59
1084	84,11	São Jerônimo da Serra	Cereja descascado -CD	Catuá amarelo
1090	82,41	Congoinhas	CD	Catuá amarelo
1096	81,05	Cornélio Procópio	CD	Iapar 58
1097	80,90	Ribeirão Claro	CD	Iapar 59

Tabela 3 – Amostras de café Arábica

3.1.2 Materiais e Equipamentos

Os materiais utilizados foram: béquer 50 mL (UNIGLAS®); balança analítica (Precisa® XT220A); sonda câmera inspeção Android Usb (TESLONG); DLP® NIRscan™ Nano EVM (TEXAS INSTRUMENTS); um cabo de fibra óptica de 0,5 m de comprimento (Thorlabs, Inc.); colorímetro Konica Minolta CR-400; moedor de grãos de café elétrico portátil, modelo PMCO1I (Philco).

3.2 Planejamento

3.2.1 Torrefação do Café

Foi definido que a quantidade de café cru que será utilizada para a torra de cada amostra será de aproximadamente 40g, sendo executada em duplicata, também foi definido a curva de temperatura, a qual foi projetada para simular as torras mais comumente empregadas na indústria de café.

A curva de torra trabalha com faixas temperaturas entre 230 e 300°C, visando simular o perfil de temperatura que é utilizado em indústrias de torração de café, (apresentado no tópico torradores de café) sendo utilizado um tempo de aquecimento da câmara de torrefação de aproximadamente 13 minutos, partindo da temperatura ambiente até a temperatura de início de torra com um tempo de estabilização de 3 minutos, tendo um tempo total de aquecimento de 16 minutos.

A elevação gradual da temperatura, durante todo o processo de torra segue a média de 13,5°C por minuto, sendo feito todo o controle de temperatura através do PID, o tempo de torra a ser utilizado será de 25 minutos. Esse perfil de temperatura resulta em 14 torras, a Tabela 4 mostra a divisão das amostras para o perfil de temperatura escolhido, bem como as temperaturas de iniciais e finais e o seu tempo respectivo.

Código	Amostra (n=2)	Temperatura inicial de aquecimento (°C)	Tempo de aquecimento (min)	Curva de torra (Duplicata)		Tempo final de torra (min)	
				Tempo de estabilização temperatura (min)	Temperatura inicial de torra (°C)		Temperatura final de torra (°C)
1053	A	T. ambiente	16	3	230	300	25
1056	B	T. ambiente	16	3	230	300	25
1077	C	T. ambiente	16	3	230	300	25
1084	D	T. ambiente	16	3	230	300	25
1090	E	T. ambiente	16	3	230	300	25
1096	F	T. ambiente	16	3	230	300	25
1097	G	T. ambiente	16	3	230	300	25

Tabela 4 – Amostras de café com seu processo de torra
n = O número de repetições de cada amostra

O tempo de torra foi escolhido visando observar-se a formação do grau de torra e os cracks para as amostras. Para observar a evolução do perfil de torra durante o processo de torrefação, foi coletada pequenas quantidades de amostras em tempos específicos (5, 10, 15, 20 e 25 minutos).

3.2.2 Moagem

Após as amostras de café passarem pelo processo de torra, cada amostra é

pesada e separada em duas porções iguais, no qual uma delas é moída com um moedor de café elétrico (Fig. 38), por 40 segundos aproximadamente. No qual tanto a amostra em grão quanto a amostra moída (em pó) são armazenadas, para posterior análise.



Fig. 38 - Moedor de grãos de café elétrico

Fonte: Adaptado de [78].

3.2.3 Análise Colorimétrica

Com todas as amostras, em grão como as que já foram moídas previamente e armazenadas, foram encaminhadas para o Instituto Agrônomo do Paraná (Iapar), campus Londrina-Pr, onde passaram pela análise colorimétrica com a utilização de um colorímetro portátil Konica Minolta CR-400, previamente calibrado com padrão branco, no qual trabalha com o sistema de cores CIE LAB que é um padrão de cores que foi implementado pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 1986), e tem sido usado no mundo todo para medições de cores por ter uma distribuição uniforme.

A cor é descrita pelas coordenadas L^* , a^* e b^* a coordenada L^* representa a luminância, enquanto as coordenadas a^* e b^* representam a mudança de cor de vermelho para verde e amarelo para azul, respectivamente [48]. Na qual todas as amostras foram analisadas em duplicata.

3.2.4 Detecção dos Cracks

Para a detecção dos cracks do café durante o processo de torra será utilizado um captador de áudio (drive KY 038) no qual será acoplado do lado de fora da câmara

de torra a uma distância de aproximadamente 2cm, para realizar a gravação de áudio.

O captador de áudio é posicionado para otimizar a sensibilidade desejada, evitando danos por exposição ao calor. Os dados brutos de áudio obtidos serão salvos pelo software para posterior análise. Também será utilizado a placa de áudio do próprio notebook ideapad 330 para a captação do áudio dos cracks.

3.2.5 Análise por Espectroscopia no Infravermelho Próximo

Para a análise espectral durante o processo de torra utilizou-se um espectrômetro DLP NIRscan Nano (Texas Instruments) que trabalha em um intervalo de 900-1700. Inicialmente em conjunto com um cabo de fibra óptica de 0,5 m de comprimento (Thorlabs, Inc.), o qual foi acoplado a uma distância de 2cm da câmara de torra (conforme fig. 39), para a aquisição dos espectros de refletância.

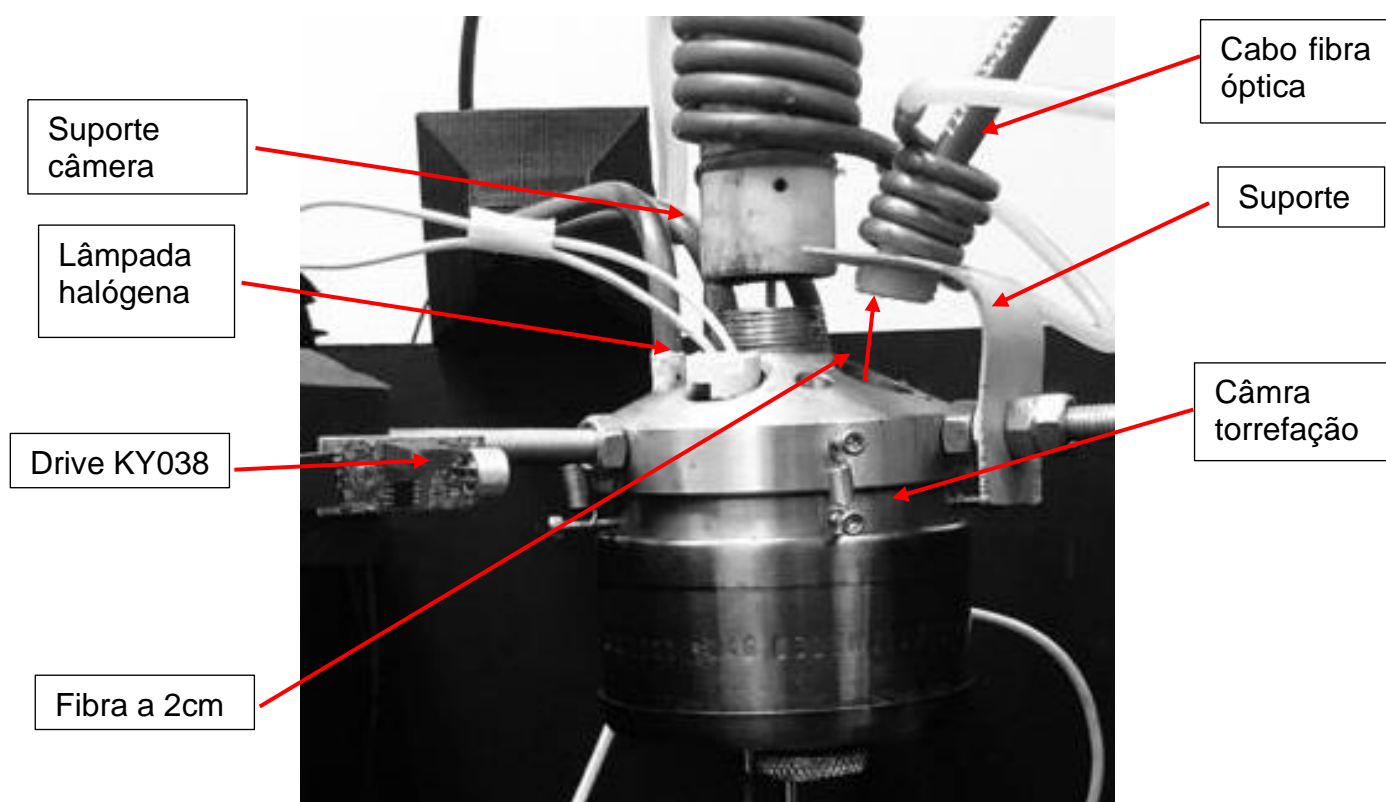


Fig. 39 - Esquema do torrador com todos os sensores acoplados

Fonte: Próprio autor

Antes de cada torra, é registrado o espectro de fundo (branco) dentro da câmara de torração de alumínio (câmara vazia). Para auxiliar na varredura espectral

foi utilizada uma lâmpada halogêna de 50W, posicionada em um ângulo de 45° ao cabo de fibra óptica, a varredura espectral dos grãos de café durante todo o processo de torra minuto a minuto.

Esta configuração difere da utilizada em estudos anteriores com NIR *in situ* na qual mantinham a sonda a 2mm da câmara de torração [52,79].

Este acréscimo na distância admitiu uma área maior da amostra a ser capturada pela sonda, o que resultará em melhora da média de inconsistências do café, no qual acarreta em uma necessidade de uma fonte de luz mais intensa.

Para a análise da evolução do perfil de torra, as amostras que foram coletadas em tempos diferentes foram analisadas utilizando-se uma cubeta de vidro, na qual foi posicionada diretamente no sensor de leitura do equipamento para a aquisição dos espectros NIR, utilizado o teflon com branco.

3.2.6 Análise Quimiométrica

Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o software GAMMA desenvolvido pelo professor Dr. Evandro Bona da (UTFPR) campus Campo Mourão. Os espectros foram submetidos a pré-tratamento de alisamento, e posteriormente realizou a ACP e PLSR nos dados com o intuito de avaliar se os grupos amostrais podem ser discriminados entre si por suas características espectrais.

CAPÍTULO 4 – RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Análise do Áudio

Há uma diferença na frequência dos cracks que é perceptível (audível), no qual o segundo crack tem uma frequência maior que o primeiro crack. O potencial para a determinação automática do evento, faz parte o primeiro e segundo crack é de interesse, porém o método onde utiliza-se o sensor KY-038 não se mostrou capaz, apresentando apenas ruído, não sendo possível discriminar a frequência que ocorrem os dois eventos. Já com a utilização da placa de áudio do notebook foi capaz de determinar os eventos de crack, isso se dá pela robustez da placa de áudio frente ao sensor KY-038, sendo capaz de captar uma maior amplitude sonora por minuto.

A análise dos dados se deu através *software* AudioCrack (Fig. 40), desenvolvido por Edson Roberto Santesso (Laboratório de Análítica Thomas Edison - LATE, Departamento de Química - UEL), programado em linguagem Matlab 2016, compatível com *Windows*® 10 de 32 bits e 64 bits. A amplitude de corte que foi utilizada para se definir os eventos de crack foi de 0.05, foram identificados 19 eventos de crack com amplitudes diferentes (Fig. 41), assim conseguimos correlacionar no espectro sonoro os eventos de crack como proposto por Yergenson e Aston, 2020 [80].

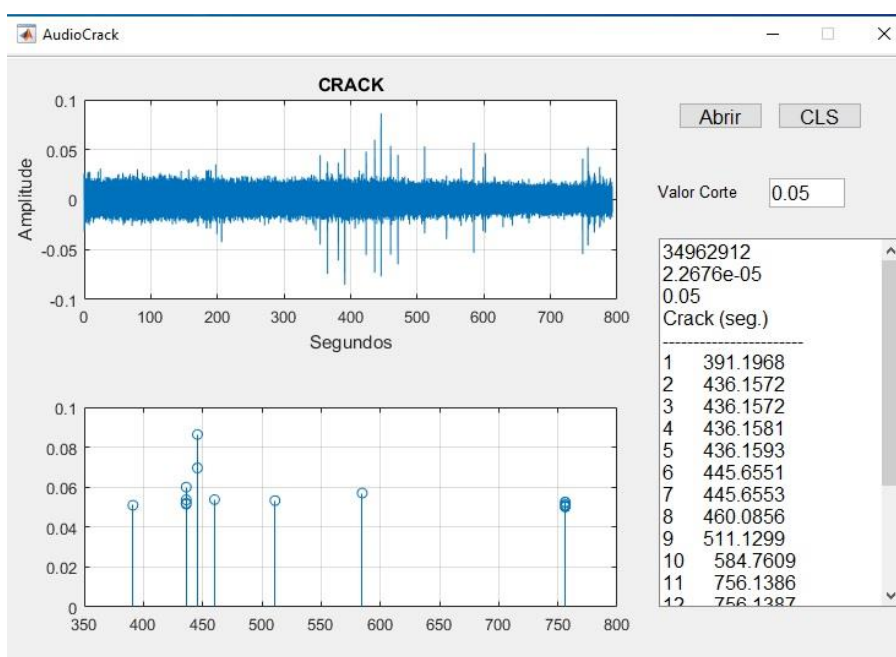


Fig. 40 – *Software* AudioCrack.

Fonte: próprio autor

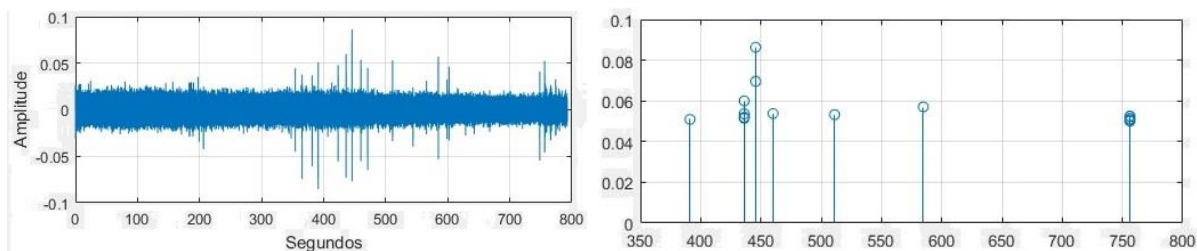


Fig. 41 – (a) Espectro de áudio (b) Picos do crack

Fonte: próprio autor

4.2 Torrefação

A Fig. 42 mostra o perfil da curva de torra que foi aplicado para a torra do conjunto amostral, onde inicialmente temos um decréscimo da temperatura nos primeiros minutos de torra devido a entrada do grão verde na câmara de torrefação.

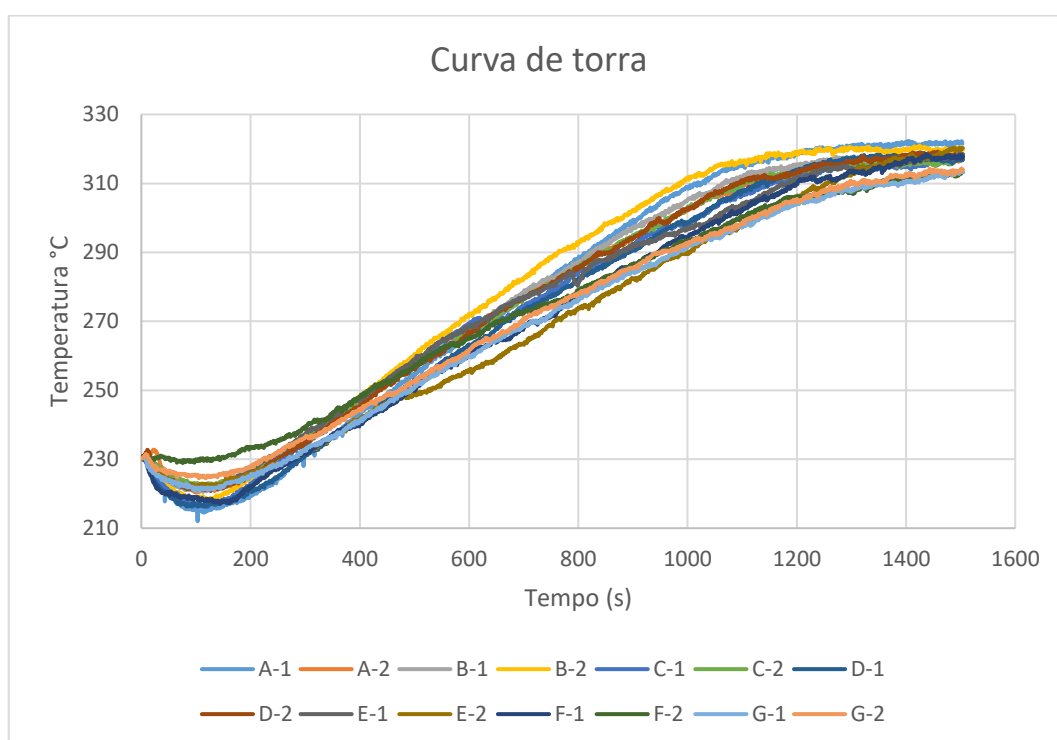


Fig. 42 – Curva de temperatura X tempo

Durante a evolução da curva de torra foram coletadas pequenas quantidades de amostras nos tempos definidos no tópico da metodologia experimental (Tabela 5), moídas e armazenadas (Fig. 43a e 43b).

Amostras	Tempo (min)	Temperatura (°C)
A-G	5	231.25
A-G	10	263.25
A-G	15	286.75
A-G	20	310.50
A-G	25	317.00

Tabela 5 – Amostras de café em tempos específicos



Fig. 43a – Amostras torradas em diferentes tempos

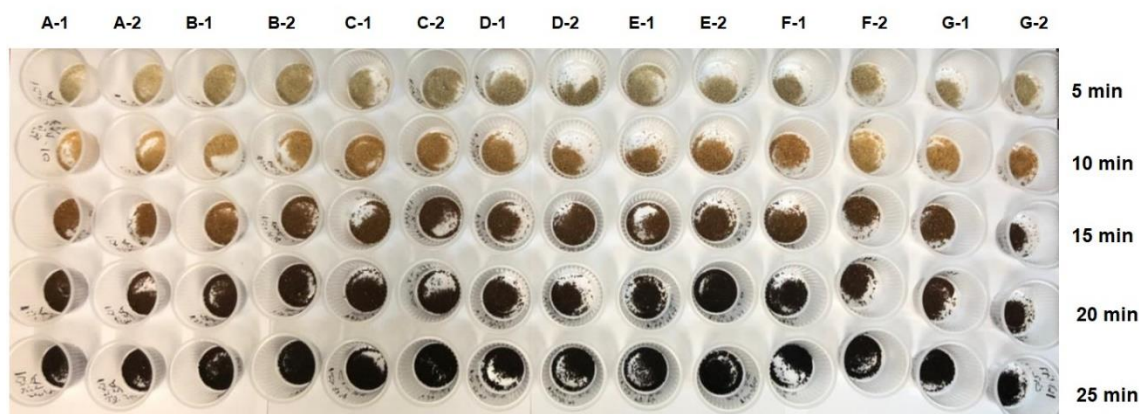


Fig. 43b – Amostras torradas e moidas em diferentes tempos

Fonte: Proprio autor

O processo de torra desencadeia uma série de mudanças químicas e físicas nos grãos verdes, o grau de torra é frequentemente medido utilizando-se a perda de massa ou a cor. A perda de massa decorre da desidratação (perda de umidade) e de uma fração de material orgânico volatilizado ao longo da pirolise dos grãos de café [22]. São apresentadas as tabelas referentes aos resultados de perda de massa para a média das réplicas (Tabelas 6).

Curva de torra					
Amostra (n=2)	Tempo total de torra (min)	Temperatura final de torra (°C)	massa inicial grão verde (g)	massa final grão torrado (g)	Perda de massa grão torrado (%)
A1	25	321,50	40,08	31,27	21,98
A2	25	317,00	40,20	32,36	19,50
B1	25	318,50	40,08	31,75	20,78
B2	25	319,75	40,10	31,15	22,32
C1	25	318,00	40,35	31,70	21,44
C2	25	317,00	40,12	30,45	24,10
D1	25	317,00	40,04	31,30	21,83
D2	25	318,50	40,13	31,12	22,45
E1	25	317,75	40,21	29,93	25,57
E2	25	320,25	40,10	28,80	28,18
F1	25	317,75	40,22	29,69	26,18
F2	25	313,25	40,05	30,47	23,92
G1	25	313,25	40,11	30,89	22,99
G2	25	314,00	40,17	30,85	23,20

Tabela 6: Percentual de perda de massa do grão de café torrado.
n = O número de repetições de cada amostra

Segundo Schenker e Rothgeb [34] o cálculo de perda de massa é uma das maneiras de se determinar o grau de torra (Equação 1), no qual quanto maior o valor do percentual de perda de massa mais escura será a torra.

$$\text{Equação 1} \quad \Delta m = \frac{m_{\text{verde}} - m_{\text{torrado}}}{m_{\text{verde}}} \times 100$$

O Δm é o percentual de perda de massa do café torrado, m_{verde} é a massa dos grãos de café verde (kg) e m_{torrado} é a massa dos grãos de café torrado (kg).

4.3 Análise colorimétrica

A análise colorimétrica tem como objetivo determinar condições de torra, as amostras foram analisadas com a utilização de um colorímetro portátil Konica Minolta CR-400 (Fig. 44). No qual os valores de L^* foram usados para determinar o grau de torra.



Fig. 44 - Colorímetro Konica Minolta CR-400

Fonte: Proprio autor

A tabela 7 mostra os resultados da cor das amostras de café torrado no tempo de 25 minutos, comparando os valores de L* definidos pelo sistema de imagem digital do torrador e do colorímetro.

Amostra (n=2)	Tempo total de torra (min)	Temperatura final de torra (°C)	Imagem Digital			Colorímetro		
			L*	a*	b*	L*	a*	b*
A1	25	321,50	48,18	10,8	-8,91	21,67	6,13	4,30
A2	25	317,00	48,95	9,80	-9,91	23,53	6,89	6,28
B1	25	318,50	51,80	11,69	-10,15	22,98	6,46	5,22
B2	25	319,75	52,30	10,06	-9,15	21,32	5,86	3,61
C1	25	318,00	47,80	11,50	-9,84	21,52	6,62	4,35
C2	25	317,00	47,01	9,90	-9,84	20,42	4,93	2,18
D1	25	317,00	45,05	12,00	-10,31	21,00	5,84	3,42
D2	25	318,50	44,65	10,88	-10,31	20,53	5,28	2,58
E1	25	317,75	41,43	9,35	-10,88	20,19	4,69	1,81
E2	25	320,25	41,10	9,35	-10,88	20,01	3,28	0,31
F1	25	317,75	38,91	8,18	-10,10	19,85	4,28	1,40
F2	25	313,25	37,69	8,18	-10,10	19,87	4,53	1,64
G1	25	313,25	40,78	11,05	-11,28	19,82	5,46	2,78
G2	25	314,00	41,50	11,65	-11,28	18,76	4,96	2,24

Tabela 7 Valores dos canais de cor utilizando a imagem digital e colorímetro do café torrado

As coordenadas de cor do canal L^* a^* e b^* das amostras sofrem grande influência da temperatura e do tempo de torra. A coordenada de cor do canal L^* representa a luminância numa escala de banco-preto que é de 0 a 100, a amostra sendo mais clara o valor de L^* será mais próximo a 100. A coordenada a^* representa uma mudança de cor de vermelho-verde, e o aumento de a^* representa um aumento da coloração avermelhada, já a coordenada b^* representa uma mudança de cor de amarelo-azul, e o aumento de b^* representa um aumento da coloração amarela [48,81].

Analisando a Tabela 7, vemos que a coordenada L^* quando é utilizado o método de imagem digital não apresenta decaimento de seus valores e com valores altos quando comparado com o método utilizando o colorímetro.

Essa grande disparidade se deu em decorrência da metodologia que foi empregada para a captura da imagem digital, na qual sofre influência da refletância oriunda das paredes da câmara de torra, pela intensidade da fonte luminosa utilizada e pelo vapor proveniente do processo e torrefação que se acumula na lente da câmara. Uma possibilidade para melhorar a captura da imagem digital seria a mudança de posição da câmara de torrefação de vertical para horizontal.

Observando os valores da coordenada L^* para as amostras analisadas com o colorímetro vemos uma tendência de decaimento de seus valores, o que também é observado por [82,83]. Isso se deve pela alta temperatura em que esta curva trabalha, no qual acentua a desidratação do grão.

4.4 Análise por Espectroscopia no Infravermelho Próximo

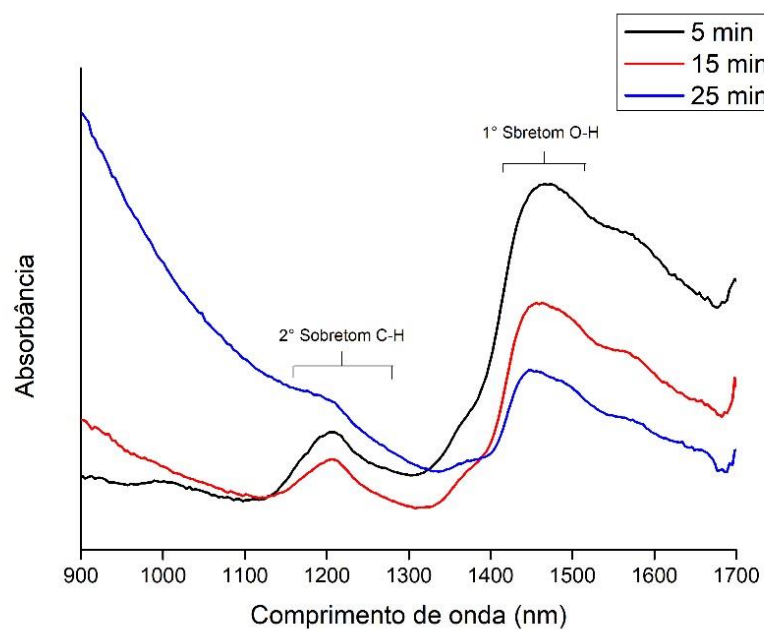
A varredura espectral utilizando o cabo de fibra óptica conectado ao NIR não se mostrou satisfatória, não sendo possível identificar a formação do espectro de absorbância. Este fato se deve a configuração utilizada explicada no tópico 2.5 da metodologia experimental, no qual, para a varredura espectral durante o processo de torra foi utilizado o método com a cubeta de vidro.

4.4.1 Diferença espectral do grão torrado

Os espectros da amostra A1 de café arábica analisados utilizando o nanoNir como na Fig. 45 (a e b), exibindo as bandas espectrais na região de 900-1700 nm,

apresentando a 1° e 2° sobretom.

a)



b)

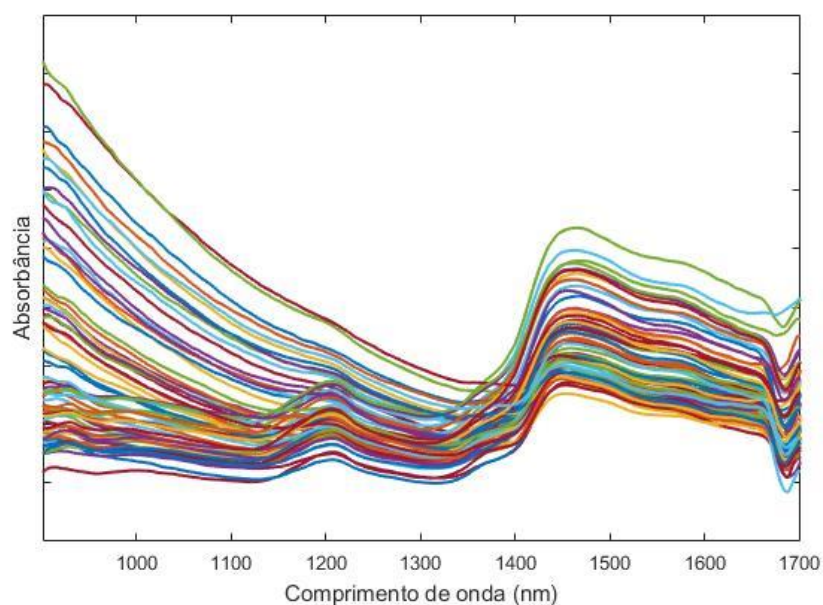


Fig. 45. Espectros nanoNir **(a)** café arábica nos tempos de torra em 5, 15 e 25 minutos e **(b)** espectros nanoNir com pré-processamento alisamento Savitzky-Golay nos tempos de 5, 10, 15, 20 e 25 minutos.

Os espectros foram plotados sem nenhum tratamento prévio como na Fig. 45(a), na qual apresentou a banda na região de 1150-1250 nm corresponde ao

segundo sobretudo do grupo funcional CH, CH₂ e CH₃ (proteínas, lipídios, carboidratos, cafeína e ácidos orgânicos) é observado o decaimento desta banda no decorrer do processo de torra devido ao aumento do binômio tempo-temperatura. Enquanto a região de 1350-1540 nm corresponde ao primeiro sobretudo RN-H (proteínas) e do grupo funcional OH (água e ácidos), correspondente ao aumento do binômio tempo-temperatura ocorre a perda de água na amostra [84,85].

A linha de base dos espectros nanoNIR tiveram a sua variação corrigida através do pré-processamento com o alisamento utilizando o algoritmo de Savistizky-Golay com janela de 7 pontos e ordem de polinômio 3, como mostrado na Fig. 45(b) as regiões espectrais de 1350-1540 nm e 1150-1250 contribuem nas diferenças entre os tempos de 5, 10, 15, 20 e 25 minutos de torra [84,86].

4.4.2 Análise Quimiométrica

4.4.2.1 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais ACP foi utilizada com o intuito de verificar se as amostras diferem entre si através de suas características espectrais. O pré-tratamento testado foi: alisamento por Savistki-Golay, por apresentar uma maior contribuição para a diferenciação espectral do café.

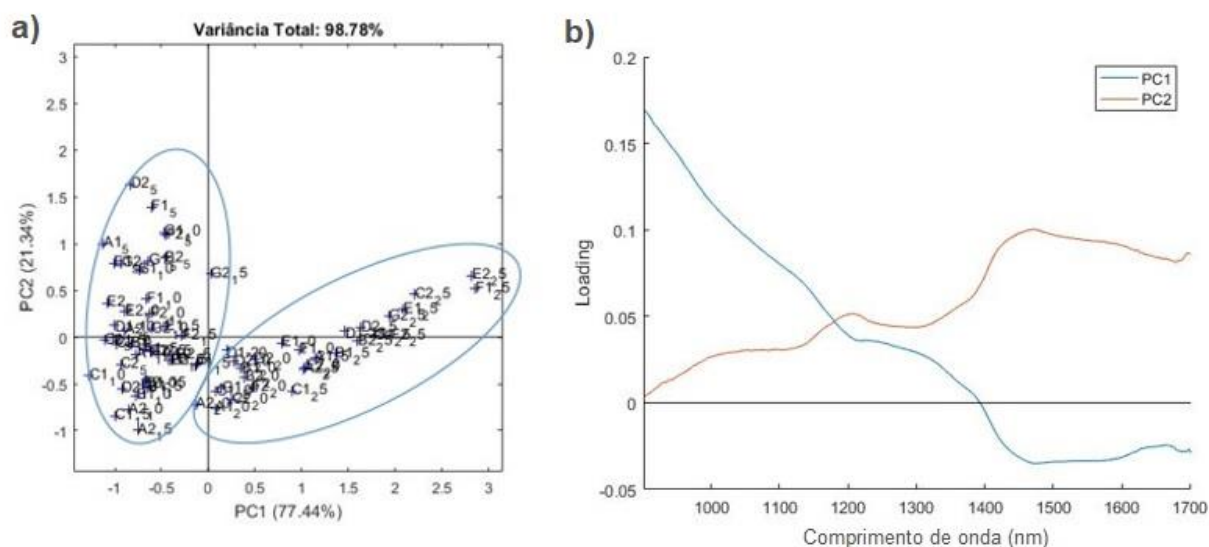


Fig. 46 ACP (a) scores da PC1 X PC2, (b) Loadings da PC1 X PC2

Analisando os *scores* da ACP apresentada na Fig. 46a obtém-se 98.78% da variância total e é explicada pelas primeiras duas PCs: PC1 X PC2, foi encontrada uma diferença entre os *scores* das amostras com tempos de 5, 10 e 15 minutos e tempos de 20 e 25 minutos na primeira componente principal (PC1), mostrando uma tendência de separação das amostras com graus de torra mais escuros (20 e 25 minutos) na direção do quadrante positivo da PC1, ou seja, $PC1 > 0$ [84]. As amostras com graus de torra mais claros (5, 10 e 15 minutos) encontra-se na direção do quadrante negativo da PC1, ou seja, $PC1 < 0$.

Segundo o gráfico de *loadings* (fig. 46b), a diferença se dá principalmente pela contribuição das bandas espectrais do primeiro e segundo sobretom, detectadas nas amostras, presentes nas regiões do espectro nanoNIR que são responsáveis pela variância dos dados a qual estão localizadas nas regiões de 1350-1540 nm para a PC1 e 1150-1250 para a PC2.

A Fig. 47 ilustra o dendrograma do HCA com similaridade de 1.4 (com variação de 0 a 2.5), apresentando a formação de três *clusters*, no qual são separados do menor ao maior pelo binômio tempo-temperatura. O primeiro *cluster* de coloração azul localizado a esquerda é referente as amostras com tempo de torra de 5, 10 e 15 minutos, não apresentando diferença espectral por estarem passando da etapa de secagem e entrando na etapa da reação de Maillard, o segundo e o terceiro *clusters* de coloração vermelho e preto localizados a direita já se encontram na etapa de caramelização. O segundo *cluster* com tempo de 20 minutos e o terceiro *cluster* com tempo de 25 minutos se diferem espectralmente devido a ocorrência do crack nos últimos minutos de torra.

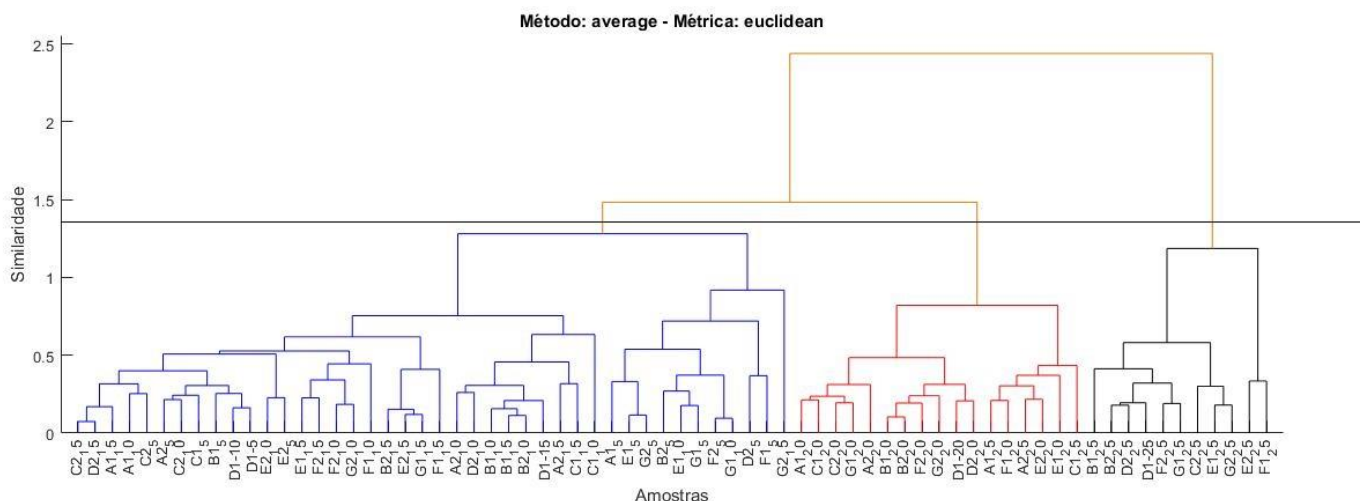


Fig. 47 Dendrograma utilizando a distância euclidiana

Azul: 5, 10, 15 minutos; vermelho:

4.4.2.2 Regressão por mínimos quadrados parciais

A análise da ACP apresentou resultados satisfatórios o que indica que os dados espectrais têm o suficiente de informação para realização de modelos de discriminação. Assim sendo, o modelo de regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) foi construído usando os dados submetidos ao pré-tratamento.

O modelo de calibração multivariada utilizando a regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) foi construído para quantificar os valores de L^* em amostras de café arábica em seu ponto final de torra, utilizando os espectros NIR pré-processados nos tempos finais de torra (25 minutos) comparados com os valores de referência (colorímetro).

O primeiro modelo PLSR construído para o NIR (Fig. 48), apresentou 8 variáveis latentes (VL), com valores de calibração RMSEC e R^2 de 1.2279 e 0.9069 e com valores de calibração cruzada de RMSECV 2.7149 e R^2 0.6147. O segundo modelo PLSR construído para os dados dos espectros NIR mais imagem digital (Fig. 49), foi com 7 variáveis latentes, onde foi observado valores de calibração RMSEC e R^2 de 1.6536 e 0.8312 e valores de calibração cruzada de RMSECV 2.6559 e R^2 0.6027 respectivamente, esses parâmetros apontam que os métodos apresentam uma boa sensibilidade para a detecção dos valores de L^*

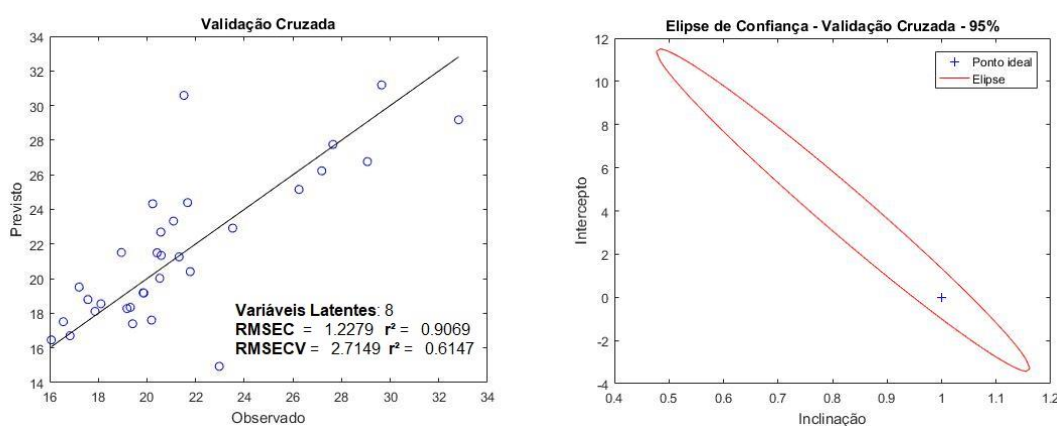


Fig. 48 – Correlação entre os valores previstos e os de referência para o NIR.

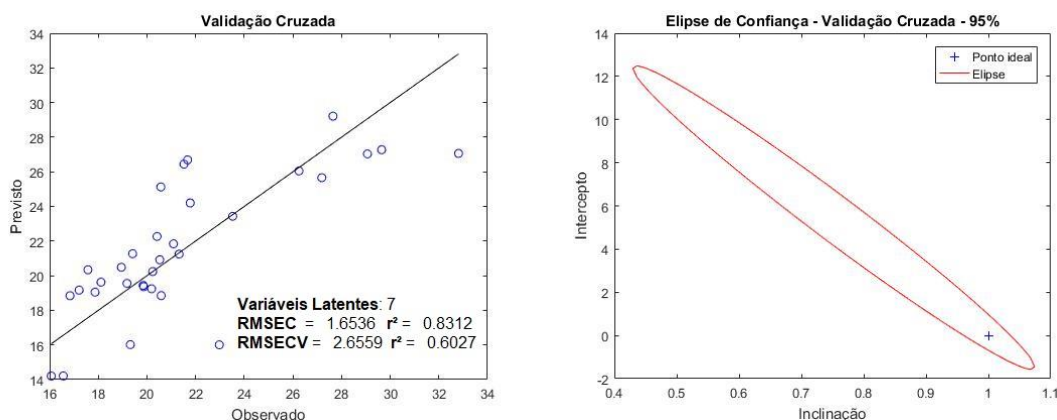


Fig. 49 - Correlação entre os valores previstos e os de referência para o NIR e imagem digital.

Os dois modelos PLSR construídos forneceram os valores de predição de L^* (Tabela 8 e 9), ao qual foram confrontados com os valores de referência definido por uma linha de corte do coeficiente de variação (CV) de 5, evidenciando que a maioria das amostras foram capazes de ser preditas quando comparadas com os valores de referência Tabela 8 e 9, o que ressalta a boa sensibilidade dos métodos empregados para a detecção de L^* .

Amostras	L^* colorímetro	L^* previsto + DP	CV
A-1	21,67	23,08 ±0,99	4,44
A-2	23,53	23,08 ±0,32	1,36
B-1	22,98	19,78 ±2,26	10,56
B-2	21,32	21,76 ±0,31	1,44
C-1	21,52	22,66 ±0,80	3,64
C-2	20,42	20,92 ±0,36	1,73
D-1	21,09	21,69 ±0,42	1,98
D-2	20,53	19,92 ±0,43	2,11
E-1	20,19	18,45 ±1,23	6,37
E-2	19,18	18,45 ±0,52	2,74
F-1	19,85	19,50 ±0,24	1,22
F-2	19,87	19,50 ±0,26	1,31
G-1	20,59	21,45 ±0,61	2,91
G-2	20,24	22,87 ±1,86	8,63

Tabela 8 – valores previstos pelo modelo PLSNIR

Amostras	L* colorímetro	L* previsto + DP	CV
A-1	21,67	25,06 ±2,39	10,25
A-2	23,53	23,65 ±0,09	0,38
B-1	22,98	19,04±2,78	13,25
B-2	21,32	21,25±0,05	0,23
C-1	21,52	21,38±0,10	0,45
C-2	20,42	21,34±0,65	3,14
D-1	21,09	21,86±0,54	2,53
D-2	20,53	20,74±0,15	0,75
E-1	20,19	19,66±0,38	1,89
E-2	19,18	19,64±0,33	1,68
F-1	19,85	19,37±0,34	1,71
F-2	19,87	19,31±0,40	2,03
G-1	20,59	20,17±0,29	1,45
G-2	20,24	20,50±0,19	0,91

Tabela 9 – valores previstos pelo modelo PLSNIRCâmera

A fim de quantificar as pontuações dos cafés arábicas, foi construído outro modelo de calibração multivariada pelo método no qual utilizou os espectros NIR pré-processados nos tempos de torra de 5, 10, 15, 20 e 25 minutos comparados com os valores de referência a nota SCAA, (Fig. 50), no qual apresentou 8 variáveis latentes, com valores de calibração RMSEC 0.1322 e R^2 0.9914 e valores de calibração cruzada de RMSECV 0.8552 e R^2 0.6472, esses parâmetros apontam que os métodos apresentam uma boa sensibilidade para a detecção da pontuação do café.

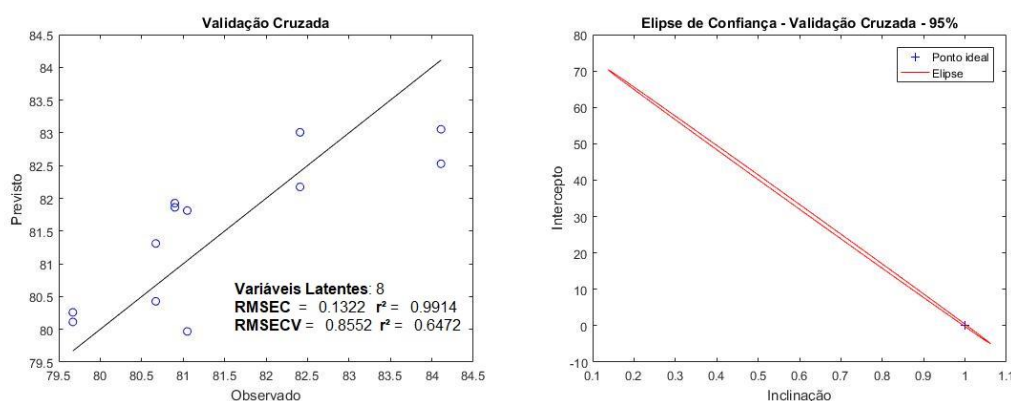


Fig. 50 – Correlação entre os valores previstos e os de referência para o NIR.

O modelo PLSR forneceu os valores de predição da pontuação do café (Tabela 10), ao qual foi confrontada com os valores de referência definindo uma linha de corte do coeficiente de variação (CV) de 5, apresentando boa sensibilidade para o método empregando a detecção da nota SCAA. A amostra C foi retirada do modelo pois a

mesma não possuía nota SCAA.

Amostras	Nota SCAA	Nota prevista + DP	CV
A-1	79,67	79,60 ±0,05	0,06
A-2	79,67	79,80 ±0,09	0,11
B-1	80,67	80,52 ±0,11	0,13
B-2	80,67	80,84 ±0,12	0,15
D-1	84,11	84,16 ±0,04	0,04
D-2	84,11	84,05 ±0,04	0,05
E-1	82,41	82,47 ±0,04	0,05
E-2	82,41	82,30 ±0,08	0,10
F-1	81,05	81,18 ±0,09	0,11
F-2	81,05	80,76 ±0,20	0,25
G-1	80,90	80,93 ±0,02	0,03
G-2	80,90	81,02 ±0,08	0,10

Tabela 10 – valores previstos pelo modelo PLSNIR

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de torrefação desenvolvido, para acompanhamento do processo de torra de grãos de café, apresenta montagem simples e de baixo custo. O método utilizando os valores brutos da imagem digital gerado pelo sistema ao serem comparados com valores de referência não apresentaram uma boa correlação. Porém ao analisarmos os modelos PLSR construídos para a predição de L^* e quantificação das pontuações do café, observamos uma boa sensibilidade para todos os métodos construídos. Dessa forma, avaliamos que o equipamento desenvolvido é uma importante ferramenta para melhor entendimento do processo de torra de café.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CAFÉ - ABIC, Origem do Café, (2020). <https://www.abic.com.br/?s=origem+do+cafe> (accessed September 10, 2020).
- [2] C.J. Pimenta, C.L. Angélico, S.M. Chalfoun, Challenges in coffee quality: Cultural, chemical and microbiological aspects, *Cienc. e Agrotecnologia*. 42 (2018) 337–349. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018424000118>.
- [3] B. Cheng, A. Furtado, H.E. Smyth, R.J. Henry, Influence of genotype and environment on coffee quality, *Trends Food Sci. Technol.* 57 (2016) 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.003>.
- [4] J. Baggenstoss, L. Poisson, R. Kaegi, R. Perren, F. Escher, Roasting and aroma formation: Effect of initial moisture content and steam treatment, *J. Agric. Food Chem.* 56 (2008) 5847–5851. <https://doi.org/10.1021/jf8003288>.
- [5] P.D. Oliveira, F.M. Borém, E.P. Isquierdo, G. da S. Giomo, R.R. de Lima, R.A. Cardoso, Aspectos fisiológicos de grãos de café, processados e secados de diferentes métodos, associados à qualidade sensorial, *Coffee Sci.* 8 (2013) 211–220.
- [6] M.C. Cid, M.P. de Peña, Coffee: Analysis and Composition, *Encycl. Food Heal.* (2015) 225–231. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00185-9>.
- [7] F.D.C. PIRES, Métodos instrumentais alternativos para a predição da cor do café torrado, 2019. <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/38010>.
- [8] ÍNDOLE, ÍNDOLE. In: DICIO, Dicionário Online de Português, (2020).
- [9] J.G. Santos, A. R. dos, & Bizari, Automação de cozedor na usina de açúcar e álcool, (2013). revista.unilins.edu.br/index.php/cognitio/article/view/94.
- [10] Garcia, Learning Image Processing with OpenCV, 2015. <https://www.packtpub.com/application-development/learning-image->

processing-opencv.

- [11] Szeliski Richard, Computer vision, Comput. Sci. Handbook, Second Ed. (2010) 43-1-43–23. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.35926>.
- [12] H.M. QUEIROZ, J. E. R. de; GOMES, Introdução ao Processamento Digital de Imagens, Dokl. Math. 56 (2001) 661–663. <https://doi.org/10.1070/sm1997v188n02abeh000203>.
- [13] S.V. dos S. Barros, G.I.B. de Muniz, J.L.M. de Matos, Colorimetric characterization of three wood species from the Amazon forest, Cerne. 20 (2014) 337–342. <https://doi.org/10.1590/01047760201420031421>.
- [14] L.E. Rodriguez-Saona, M.E. Allendorf, Use of FTIR for rapid authentication and detection of adulteration of food., Annu. Rev. Food Sci. Technol. 2 (2011) 467–483. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022510-133750>.
- [15] ELIAS, Umidade de colheita, métodos de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de grãos de trigo (cv. 'Embrapa 16'), (2009) 25–30.
- [16] A. Milttelmann, J.B. de Miranda-Filho, G.J.M.M. de Lima, C. Hara-Klein, R.M. da Silva, R.T. Tanaka, Análise Dialélica Do Teor De Óleo Em Milho, Rev. Bras. Agrociência. 12 (2006) 139–146. <file:///C:/Users/m243724/Downloads/4509-12481-1-PB.pdf>.
- [17] R.G. Brereton, Introduction to multivariate calibration in analytical chemistry, Analyst. 125 (2000) 2125–2154. <https://doi.org/10.1039/b003805i>.
- [18] P. Gemperline, F. Group, to CHEMOMETRICS Edited by, 2006.
- [19] S. Wold, M. Sjöström, L. Eriksson, PLS-regression: A basic tool of chemometrics, Chemom. Intell. Lab. Syst. 58 (2001) 109–130. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1).

- [20] ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ - OIC, Relatório sobre o mercado do café, (2019). <https://www.ico.org/> (accessed August 24, 2019).
- [21] Salazar, calidad de coffea arabica bajo sombra de Erythrina poeppigiana a diferentes elevaciones en Costa Rica, (2000).
- [22] D.S. Leme, Torra De Cafés Especiais E Integração De Informações No Processo De Análise Sensorial Lavras – Mg, 2016.
- [23] R.C. Alves, F. Rodrigues, M. Antónia Nunes, A.F. Vinha, M.B.P.P. Oliveira, State of the art in coffee processing by-products, Elsevier Inc., 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00001-3>.
- [24] F.M. Borém, E.R. Marques, E. Alves, Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells, Biosyst. Eng. 99 (2008) 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.027>.
- [25] EMBRAPA, MANUAL DO CAFÉ: Colheita e Preparo, Emater-Mg. (2016) 52. http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/livro_colheita_preparo.pdf.
- [26] EMBRAPA, CAFE PREPARO, SECAGEM, (2015).
- [27] V. Belchior, B.G. Botelho, L.S. Oliveira, A.S. Franca, Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Spectroscopy (ATR-FTIR) and chemometrics for discrimination of espresso coffees with different sensory characteristics, Food Chem. 273 (2019) 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.026>.
- [28] N. Caporaso, M.B. Whitworth, C. Cui, I.D. Fisk, Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS, Food Res. Int. 108 (2018) 628–640. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.077>.
- [29] J.S. Cho, H.J. Bae, B.K. Cho, K.D. Moon, Qualitative properties of roasting

- defect beans and development of its classification methods by hyperspectral imaging technology, *Food Chem.* 220 (2017) 505–509. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.189>.
- [30] R.J. Clarke, COFFEE | Roast and Ground, *Encycl. Food Sci. Nutr.* (2003) 1487–1493. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227055-x/00269-8>.
- [31] A.P. Craig, B.G. Botelho, L.S. Oliveira, A.S. Franca, Mid infrared spectroscopy and chemometrics as tools for the classification of roasted coffees by cup quality, *Food Chem.* 245 (2018) 1052–1061. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.066>.
- [32] M. Gabriel-Guzmán, V.M. Rivera, Y. Cocotle-Ronzón, S. García-Díaz, E. Hernandez-Martinez, Fractality in coffee bean surface for roasting process, *Chaos, Solitons and Fractals.* 99 (2017) 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.03.056>.
- [33] X. Wang, L.T. Lim, Physicochemical Characteristics of Roasted Coffee, *Coffee Heal. Dis. Prev.* (2015) 247–254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00027-9>.
- [34] S. Schenker, T. Rothgeb, The Roast-Creating the Beans' Signature, *Cr. Sci. Coffee.* (2017) 245–271. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00011-6>.
- [35] Camargo industrial, No Title, (2021). https://www.camargoindustrial.com.br/comprar-maquinas-usadas/?c=Comprar+Torradores+industriais_DPER (accessed December 23, 2021).
- [36] PROBAT, No Title, (2021). <https://probatleogap.com.br/produtos/torradores/laboratorio/torradores-de-prova/> (accessed December 24, 2021).
- [37] CARMOMAQ, C, (2021). <https://www.carmomaq.com.br/produtos/torrador-de->

- prova-tradicional/ (accessed December 23, 2021).
- [38] probat leogap, No Title, (2021).
<https://probatleogap.com.br/produtos/torradores/laboratorio/torradores-de-prova/> (accessed December 24, 2021).
- [39] J.R. Silva, Otimização do processo de torração do café pelo monitoramento de parâmetros e propriedades físicas e sensoriais, (2008) 72.
- [40] C.R. CAMPOS, Magister Scientiae, 2016.
<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2242E/A2242E.PDF>.
- [41] M.H.F. OETTERER, Marília; REGITANO-D'ARCE, Marisa Aparecida Bismara; SPOTO, Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos, 2006.
- [42] K.L. FENNEMA, O. R.; DAMODARAN, S.; PARKIN, Química de Alimentos de Fennema, 4° ed, 2010.
- [43] M. von Blittersdorff, C. Klatt, The Grind-Particles and Particularities, Cr. Sci. Coffee. (2017) 311–328. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00013-X>.
- [44] SPECIALITY COFFEE ASSOCIATION OF AMERICA, Cupping, (2019).
http://scaa.org/index.php?goto=whatis_cupping.asp (accessed July 15, 2019).
- [45] D. Wu, D.W. Sun, Colour measurements by computer vision for food quality control - A review, Trends Food Sci. Technol. 29 (2013) 5–20.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.08.004>.
- [46] Earthlings coffee, No Title, (2022). <https://earthlings-coffee.com/blog-of-earthlings/2018/3/7/testing-our-roast-with-agtron-august-21-2014> (accessed January 5, 2022).
- [47] gerenciamento de cor, No Title, (2021).
<https://gerenciamentodecor.wordpress.com/2016/%0A03/04/dimensoes-e->

espacos-de-cor/%0A (accessed December 23, 2021).

- [48] D.S. Leme, S.A. da Silva, B.H.G. Barbosa, F.M. Borém, R.G.F.A. Pereira, Recognition of coffee roasting degree using a computer vision system, *Comput. Electron. Agric.* 156 (2019) 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.029>.
- [49] C. Pasquini, Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications, *J. Braz. Chem. Soc.* 14 (2003) 198–219. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200006>.
- [50] Y. Roggo, P. Chalus, L. Maurer, C. Lema-Martinez, A. Edmond, N. Jent, A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical technologies, *J. Pharm. Biomed. Anal.* 44 (2007) 683–700. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2007.03.023>.
- [51] P.C. Corrêa, G.H.H. de Oliveira, A.P.L.R. de Oliveira, G.A. Vargas-Elías, F.L. Santos, F.M. Baptestini, Preservation of roasted and ground coffee during storage, *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 20 (2016) 581–587. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662016000600581&lang=pt.
- [52] T.A. Catelani, J.R. Santos, R.N.M.J. Páscoa, L. Pezza, H.R. Pezza, J.A. Lopes, Real-time monitoring of a coffee roasting process with near infrared spectroscopy using multivariate statistical analysis: A feasibility study, *Talanta.* 179 (2018) 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.11.010>.
- [53] R.F. Teófilo, J.P.A. Martins, M.M.C. Ferreira, Sorting variables by using informative vectors as a strategy for feature selection in multivariate regression, *J. Chemom.* 23 (2009) 32–48. <https://doi.org/10.1002/cem.1192>.
- [54] M.M.C. Ferreira, A.M. Antunes, M.S. Melgo, P.L.O. Volpe, Chemometrics i: Multivariate calibration, a tutorial, *Quim. Nova.* 22 (1999) 724–731. <https://doi.org/10.1590/s0100-40421999000500016>.

- [55] R.G. Brereton, *Chemometrics Data Analysis for the Laboratory and Chemical Plant*, 2003.
- [56] PAUL GELADI*^a and BRUCE R. KOWALSKI, PARTIAL LEAST-SQUARES REGRESSION: A TUTORIAL, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 10 (1986) 1–17.
- [57] J.A. Westerhuis, E.J.J. van Velzen, H.C.J. Hoefsloot, A.K. Smilde, Multivariate paired data analysis: Multilevel PLS-DA versus OPLS-DA, *Metabolomics*. 6 (2010) 119–128. <https://doi.org/10.1007/s11306-009-0185-z>.
- [58] B.M.A. Carvalho, *Detecção de soro de queijo em leite por espectrofotometria no infravermelho médio*, 2007.
- [59] F.F. SOTELO, *Aplicação da espectroscopia de Infravermelho Próximo na caracterização de petróleo. Simulação de uma unidade de destilação atmosférica*, 2006.
- [60] M.F. Ferrão, C.W. Carvalho, E.I. Müller, C.U. Davanzo, Determinação simultânea dos teores de cinza e proteína em farinha de trigo empregando NIR-PLS e DRIFT-PLS, *Ciência e Tecnol. Aliment.* 24 (2004) 333–340. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612004000300005>.
- [61] F.M. PIMENTEL, B.B. NETO, CALIBRAÇÃO: UMA REVISÃO PARA QUÍMICOS ANALÍTICOS, (1995) 268–277.
- [62] K.L. Yam, S.E. Papadakis, A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces, *J. Food Eng.* 61 (2004) 137–142. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00195-X).
- [63] F. Pedreschi, J. León, D. Mery, P. Moyano, Development of a computer vision system to measure the color of potato chips, *Food Res. Int.* 39 (2006) 1092–1098. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.009>.
- [64] A. V. Canez, G.M. Simas, H.D.S. Conceição, I.P. Maurell, J.D. Fraga, Mariana

- P. Fernandes, M.R.C. Franco, Matheus C. Corrêa, R. Barwaldt, R.N. Rodrigues , Uma proposta de arquitetura móvel baseada em visão computacional para pessoas com deficiência visual , (2020) 918–927. <https://doi.org/10.5753/sbcup.2017.3315>.
- [65] V. ALVARENGA, DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EM FLUXO AUTOMÁTICO, UEL, 2019.
- [66] ARDUINO, No Titl, (2020). <https://www.arduino.cc> (accessed September 17, 2020).
- [67] L. Carro, F.R. Wagner, Sistemas Computacionais Embarcados, XXII Jornadas Atualização Em Informática - JAI. (2003) Capítulo 2.
- [68] M. EVANS, J. NOBLE, J. HOCHENBAUM, Martin Evans Jordan Hochenbaum, Novatec, 2013.
- [69] Embarcados, No Title, (2019). <https://www.embarcados.com.br> (accessed July 15, 2019).
- [70] Xprojetos, No Title, (2019). <http://xprojetos.net/arduino-esp32-e-esp8266-comparacao/> (accessed September 20, 2019).
- [71] Filipeflop, No Title, (2019). <https://www.filipeflop.com/blog/control-modulo-rele-arduino/> (accessed September 20, 2019).
- [72] RSrobotica, No Title, (2019). <https://www.rsrobotica.com.br/controlador-de-velocidade-motor-dc-6v-12v-24v-28v-3a-pwm> (accessed September 23, 2019).
- [73] Protosupplies, No Title, (2019). <https://protosupplies.com/product/max6675-thermocouple-temperature-module/> (accessed September 23, 2019).
- [74] Aliexpress, No Title, (2019). <https://pt.aliexpress.com/item/32715635302.html> (accessed September 24, 2019).

- [75] Bau da Eletronica, No Title, (2019). <http://blog.baudaeletronica.com.br/driver-tb6600-com-arduino/> (accessed September 25, 2019).
- [76] Amazon, No Title, (2019).
- [77] Texas Instruments, No Title, (2019). <https://www.ti.com/tool/DLPNIRNANOEVN>. (accessed December 27, 2019).
- [78] Eletrum, No Title, (2022). <https://www.eletrum.com.br/moedor-de-cafe-philco-grano-aroma-pmc01l-inox-220v/p?idsku=140130427> (accessed January 23, 2022).
- [79] J.R. Santos, O. Viegas, R.N.M.J. Páscoa, I.M.P.L.V.O. Ferreira, A.O.S.S. Rangel, J.A. Lopes, In-line monitoring of the coffee roasting process with near infrared spectroscopy: Measurement of sucrose and colour, *Food Chem.* 208 (2016) 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.114>.
- [80] N. Yergenson, D.E. Aston, Monitoring coffee roasting cracks and predicting with in situ near-infrared spectroscopy, *J. Food Process Eng.* 43 (2020) 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13305>.
- [81] E.A. Bonfatti Júnior, E.C. Lengowski, Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira, *Pesqui. Florest. Bras.* 38 (2018). <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201601394>.
- [82] C. Somporn, A. Kamtuo, P. Theerakulpisut, S. Siriamornpun, Effects of roasting degree on radical scavenging activity, phenolics and volatile compounds of Arabica coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor), *Int. J. Food Sci. Technol.* 46 (2011) 2287–2296. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02748.x>.
- [83] D.I.A. Reis, *Torrado E Moído Com Cascas De Café E Milho Por Espectroscopia* No, (2012).
- [84] R.M. Correia, F. Tosato, E. Domingos, R.R.T. Rodrigues, L.F.M. Aquino, P.R.

- Figueiras, V. Lacerda, W. Romão, Portable near infrared spectroscopy applied to quality control of Brazilian coffee, *Talanta*. 176 (2018) 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.009>.
- [85] M.N.B. Manuel, A.C. da Silva, G.S. Lopes, L.P.D. Ribeiro, One-class classification of special agroforestry Brazilian coffee using NIR spectrometry and chemometric tools, *Food Chem.* 366 (2022) 130480. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130480>.
- [86] M.R. Baqueta, A. Coqueiro, P.H. Março, P. Valderrama, Multivariate classification for the direct determination of cup profile in coffee blends via handheld near-infrared spectroscopy, *Talanta*. 222 (2021) 121526. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121526>.