



DIVISIÓN DE ESTUDIOS POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Opción 1.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**DISEÑO DE UN ESPECTROFOTÓMETRO DE LONGITUDES DE
ONDAS DISCRETAS BASADO EN DIODOS LÁSER PARA LA
EVALUACIÓN DEL GRADO DE TOSTADO DE CAFÉ**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

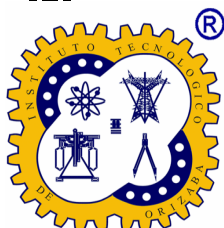
ING. ALAN APORTELA TRUJILLO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. GERARDO AGUILA RODRIGUEZ





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **26/marzo/2026**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. ALAN APORTELA TRUJILLO
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

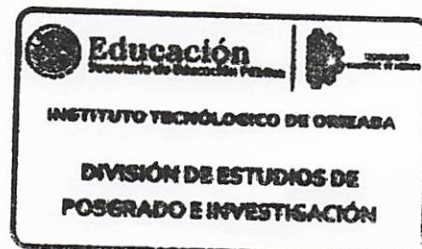
**"DISEÑO DE UN ESPECTROFOTÓMETRO DE LONGITUDES DE ONDAS DISCRETAS
BASADO EN DIODOS LÁSER PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE TOSTADO DE
CAFÉ".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excellencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

DR. OSCAR BÁEZ SENTÍES
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



OG-13-F06



2026
año de
**Margarita
Maza**





Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **23/marzo/2026**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. DR. OSCAR BÁEZ SENTÍES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

ALAN APORTELA TRUJILLO

La cual lleva el título de:

**“DISEÑO DE UN ESPECTROFOTÓMETRO DE LONGITUDES DE ONDAS DISCRETAS BASADO EN
DIODOS LÁSER PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE TOSTADO DE CAFÉ”**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR

SECRETARIO: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

VOCAL: DRA. BLANCA ESTELA GONZÁLEZ
SÁNCHEZ

VOCAL SUP.: DR. OSCAR OSVALDO SANDOVAL
GONZÁLEZ

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-18



2026
año de
**Margarita
Maza**



CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
JUSTIFICACIÓN	16
HIPÓTESIS	18
OBJETIVOS	19
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO	20
LIMITACIONES Y ALCANCES	21
ALCANCES	21
LIMITACIONES	21
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	23
1.1 Importancia del tostado del café	23
1.2 Métodos tradicionales para evaluar el tostado	24
1.3 Espectroscopia y óptica	25
1.4 Espectrofotómetros convencionales	26
1.5 Fuentes discretas (Láseres)	27
1.6 Instrumentación Electrónica	29
1.7 Brecha Tecnológica	30

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	32
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	40
3.1 Fundamentos de Radiación Electromagnética	40
3.2 Interacción Luz-Materia	41
3.3 Ley de Beer-Lambert	43
3.4 Espectroscopía visible y NIR.....	46
3.5 Elementos Ópticos de Control de Intensidad y Selección Espectral	47
3.6 Fundamentos del Láser.....	51
3.7 Propagación del haz láser en medios absorbentes.....	54
3.8 Fotodetección	55
3.9 Amplificador de Transimpedancia	58
3.10 Sistemas de Captura Óptica y Adquisición Digital.....	61
3.11 Fundamentos de Análisis Quimiométricos	67
3.12 Proceso Fisicoquímico del Tostado	68
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA	70
4.1 Integración y selección de componentes.....	73
4.2 Diseño y construcción del prototipo 1.....	75
4.3 Análisis de fallas del prototipo 1	82
4.4 Propuesta de diseño del prototipo 2.....	83
4.5 Diseño electrónico y diseño de la interfaz de medición	102
4.6 Diseño e integración del sensor óptico para la captura de imágenes	107
4.7 Metodología para la preparación de muestras.....	110

4.8 Fase de experimentación.....	118
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	124
5.1 Resultados del comportamiento de voltaje en función del grado de tostado	129
5.2 Resultados en el análisis del uso de material	133
CONCLUSIONES	136
RECOMENDACIONES.....	138
PRODUCTOS ACADÉMICOS	139
ANEXOS	140
.1 Código de adquisición en Arduino.....	140
.2 Código de processing (Interfaz)	140
.3 Código de python para la captura de imágenes.....	145
BIBLIOGRAFÍA	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Granos de café con diferentes grados de tostado.....	25
Figura 2.	Esquema de un espectrofotómetro.	27
Figura 3.	Fuente discreta (Láser).....	28
Figura 4.	Espectrofotómetro con instrumentación electrónica.	30
Figura 5.	Catación según la SCA (Speciality Coffee Association).....	33
Figura 6.	Flujo de trabajo general de técnicas espectroscópicas avanzadas para el análisis de alimentos.	34
Figura 7.	Espectroscopia UV/VIS e IR.....	36
Figura 8.	Ubicación de la región del infrarrojo cercano (Near-Infrared, NIR), comprendida aproximadamente entre 780 y 2500nm.	37
Figura 9.	El espectro electromagnético.....	41
Figura 10.	Absorción, Reflexión y Transmisión de la luz.	43
Figura 11.	Ley de Beer-Lambert atravesando una cuBeta de tamaño L	45
Figura 12.	Región visible.	46
Figura 13.	Diagrama de funcionamiento de espectroscopía NIR.	47
Figura 14.	Filtro de densidad neutra y su funcionamiento.....	49
Figura 15.	Filtro Longpass 550nm.....	50
Figura 16.	Gráfica de funcionamiento del Longpass.....	51
Figura 17.	Láseres y su haz de luz monocromática.	52
Figura 18.	Esquema de funcionamiento de un láser.....	54
Figura 19.	Fotodiodo BPW34.....	57
Figura 20.	Diagrama general de un circuito de Transimpedancia.	58
Figura 21.	Amplificador Operacional LM358.	60
Figura 22.	Esquema de Pines GPIO Raspberry Pi 4.	62
Figura 23.	Raspberry Pi 4.	63
Figura 24.	Cámara IR (Pi Cam IR).	65
Figura 25.	Arduino UNO y sus especificaciones.....	66
Figura 26.	Funcionamiento ilustrativo de un Optical Encoder.	74
Figura 27.	TSAL6100.....	74
Figura 28.	SFH4545.....	75
Figura 29.	CQY37N.....	75

Figura 30.	Vista superior del prototipo en Fusion360.	76
Figura 31.	Vista lateral.	77
Figura 32.	Prototipo en la etapa final de diseño.	77
Figura 33.	Diseño de la PCB para el control del Optical Encoder.	78
Figura 34.	Circuito impreso.	78
Figura 35.	Impresión 3D del prototipo 1 con problemas en la impresión.	79
Figura 36.	Prototipo 1 ensamblado.	80
Figura 37.	Prototipo 1 en funcionamiento.	81
Figura 38.	Resultado de la captura de imágenes con el prototipo 1.	81
Figura 39.	Prueba con diferente LED.	82
Figura 40.	Posicionamiento de la cámara prototipo 1.	83
Figura 41.	Láser verde 532 nm Clase III.	84
Figura 42.	Láser rojo 650 nm Clase III.	85
Figura 43.	Láser IR 808-1064 nm Clase III	86
Figura 44.	Láser descubierto en el cual se observa la lente expansiva.	87
Figura 45.	Diodo Láser en conjunto con la lente colimadora.	88
Figura 46.	Cristal monolítico que se retiró.	88
Figura 47.	Retiro exitoso del cristal Monolítico.	89
Figura 48.	Diseño de la base para láser.	90
Figura 49.	Medidas de la base alto.	90
Figura 50.	Medidas de la base largo.	91
Figura 51.	Base para los láseres que se implementaran en el diseño.	91
Figura 52.	Interacción de láser con diferentes medios.	92
Figura 53.	Interacción del láser a través de una infusión de café.	92
Figura 54.	Interacción de la infusión con difracción de luz blanca.	93
Figura 55.	Pruebas de distancia y funcionamiento del fotodiodo.	93
Figura 56.	Interacción del láser con alcohol isopropílico.	94
Figura 57.	Láser con la interacción del filtro LongPass.	95
Figura 58.	Combinación de elementos en pruebas de diseño.	95
Figura 59.	Base de láser acoplada al diseño.	97
Figura 60.	Vista área del prototipo.	98
Figura 61.	Medidas de altura.	99
Figura 62.	Medidas de largo.	99

Figura 63.	Medidas de ancho.....	100
Figura 64.	Diseño final.....	101
Figura 65.	Circuito en fases de prueba en protoboard.	103
Figura 66.	Esquemático del circuito integrado con los BPW32.....	104
Figura 67.	Diseño de la PCB.....	104
Figura 68.	Simulación 3D del circuito.....	105
Figura 69.	Circuito impreso transimpedancia.....	105
Figura 70.	Integración al prototipo.	106
Figura 71.	Interfaz gráfica.....	107
Figura 72.	Diseño de la cámara en Fusion360.....	108
Figura 73.	Base acoplada a la Raspberry pi 4 y la pi cam.	109
Figura 74.	Vista frontal de la Pi Cam.	109
Figura 75.	Acoplamiento de la Pi Cam con el espectrofotómetro.	110
Figura 76.	Balanza OHAUS.....	111
Figura 77.	Balanza con su sello de calibración.....	112
Figura 78.	Celdas de plástico y cuarzo.	112
Figura 79.	Medición en gramos del café.....	113
Figura 80.	Clasificación de grado de tostado Oscuro, Medio, Claro.	114
Figura 81.	Vaso de 237 ml a la temperatura de 94°.	115
Figura 82.	Preparación en prensa francesa.	116
Figura 83.	Infusiones de café tostado medio en las celdas de plástico y cuarzo.....	116
Figura 84.	Preparación de la dilución.....	117
Figura 85.	Aplicación de la dilución de limpieza.....	117
Figura 86.	Celdas limpias para su posterior uso.....	118
Figura 87.	Ejemplo de bitácora usada en una preparación.	119
Figura 88.	Gafas de protección OD5+.....	120
Figura 89.	Espectrofotómetro listo para la medición.....	121
Figura 90.	Tostado medio y su medición con el láser rojo.	122
Figura 91.	Medición de interacción directa del láser rojo en tostado medio.....	122
Figura 92.	Experimentación en proceso.....	123
Figura 93.	Tostado claro mediciones con láser verde.....	124
Figura 94.	Tostado medio mediciones con láser verde.	124
Figura 95.	Tostado oscuro mediciones con láser verde.....	125

Figura 96.	Tostado claro mediciones con láser rojo.....	125
Figura 97.	Tostado medio mediciones con láser rojo.	125
Figura 98.	Tostado oscuro mediciones con láser rojo.....	125
Figura 99.	Tostado claro mediciones con láser IR.....	126
Figura 100.	Tostado medio mediciones con láser IR.....	126
Figura 101.	Tostado oscuro mediciones con láser IR.	126
Figura 102.	Tostado oscuro mediciones con láser IR.	127
Figura 103.	Tostado oscuro mediciones con láser IR.	127
Figura 104.	Tostado oscuro mediciones con láser IR.	127
Figura 105.	Comparación visual de la transmitancia del láser verde y láser IR en distintos grados de tostado con celdas de cuarzo.....	128
Figura 106.	Comparación visual de la transmitancia del láser verde y láser IR en distintos grados de tostado con celdas de plástico.	128
Figura 107.	Comparación de reflectancia del tostado oscuro en cubetas de cuarzo y plástico.	129
Figura 108.	Gráfica de error de los tostados claro, medio y oscuro.....	130
Figura 109.	Voltaje promedio vs grado de tostado.	131
Figura 110.	Resultados de los diferentes grados de tueste con interacción de los láseres y sus diferentes longitudes de ond.....	132
Figura 111.	Tabla de análisis de materiales cuarzo y plástico.	134
Figura 112.	Comparación de la interacción de la luz en materiales de cuarzo y plástico.....	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Fases y actividades del desarrollo del sistema.....	71
Tabla 2.	Fases y actividades del desarrollo del sistema.....	72
Tabla 3.	Peso de la celda utilizada	113

RESUMEN

Esta tesis presenta el diseño de un espectrofotómetro de longitudes de onda discretas basadas en diodos láser para el análisis de infusiones de café. El objetivo principal de este sistema es superar la subjetividad de los métodos de evaluación sensorial tradicionales, proponiendo un sistema que, de validarse favorablemente, podría sentar las bases para el establecimiento de una metodología objetiva, precisa y reproducible que correlacione las propiedades ópticas del café con el grado y la calidad del tostado.

A diferencia de los sistemas convencionales que utilizan un monocromador con fuente de luz blanca, este trabajo implementa un conjunto de fuentes láser de emisión fija, se emplearon diodos láser comerciales como fuentes monocromáticas discretas (láseres infrarrojos IR, láser verde y láser rojo), seleccionados con el fin de interactuar con propiedades clave del café. Estas longitudes de onda discretas permiten sondear, de manera eficiente, los compuestos característicos que se forman o se degradan durante el proceso del tostado, como son los azúcares caramelizados y el contenido de agua, al igual que impurezas que surgen en el proceso de tostado.

La metodología se divide en cuatro etapas: 1) Recopilación de información sobre espectroscopia, óptica, la selección y justificación de las longitudes de onda de los láser. 2) Toma de decisiones sobre el diseño del sistema de medición, implementando el sistema óptico electrónico, que incluye configuración de los diodos láser, las celdas de muestra y el diseño del foto detector 3) Caracterización del sistema y la adquisición de datos mediante la medición de la atenuación lumínica (absorbancia, transmitancia y reflectancia) en muestras de café con distintos grados de tostado; y 4) el análisis y manufactura del diseño final, al igual que la correcta preparación de infusiones de café en ambientes controlados, al igual que sean reproducibles.

El principal enfoque del uso de láseres, los cuales, gracias a su alta intensidad, monocromaticidad y colimación, confieren al sistema una mayor sensibilidad, estabilidad y un diseño potencialmente más robusto y compacto en comparación con otros sistemas tradicionales. Como resultado de esta investigación, en caso de ser favorable, se propone el desarrollo de

una herramienta analítica para la industria cafetalera, sentando bases a un sistema de control de calidad rápido y objetivo del tostado del café.

Palabras clave: Espectrofotometría, diodos láser, infusiones de café, espectrofotómetro, grado de tostado, análisis óptico, control de calidad, longitud de onda, transmitancia y reflectancia.

ABSTRACT

This thesis presents the design of a discrete-wavelength spectrophotometer based on laser diodes for the analysis of coffee infusions. The main objective of this system is to overcome the subjectivity of traditional sensory evaluation methods, proposing a system that, if favorably validated, could lay the groundwork for establishing an objective, precise, and reproducible methodology that correlates the optical properties of coffee with its degree and quality of roasting.

Unlike conventional systems that use a monochromator with a white light source, this work employs a set of fixed-emission laser sources; commercial laser diodes were used as discrete monochromatic sources (IR, green, and red lasers), selected to interact with key properties of coffee. These discrete wavelengths allow for efficient probing of the characteristic compounds that form or degrade during the roasting process, such as caramelized sugars and water content, as well as impurities that arise during roasting.

The methodology is divided into four stages: 1) gathering information on spectroscopy, optics, and the selection and justification of laser wavelengths. 2) Decision-making on the design of the measurement system, implementing the optoelectronic system, including the configuration of the laser diodes, sample cells, and photo detector design; 3) System characterization and data acquisition by measuring light attenuation (absorbance, transmittance, and reflectance) in coffee samples with varying degrees of roast; and 4) analysis and fabrication of the final design, as well as the proper preparation of coffee infusions in controlled, reproducible environments.

The main focus of using lasers, which, thanks to their high intensity, monochromaticity, and collimation, provide the system with greater sensitivity, stability, and a potentially more robust and compact design compared to other traditional systems. As a result of this research, should it prove favorable, we propose developing analytical tools for the coffee industry, laying the groundwork for a rapid and objective quality control system for coffee roasting.

Keywords: Spectrophotometry, laser diode, coffee infusions, spectrophotometer, degree of roast, optical analysis, quality control, wavelength, transmittance, and reflectance.

INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial actualmente. De acuerdo con el reporte de National Coffee Data Trends 2024, aproximadamente el 67 % de los adultos en Estados Unidos informaron haber consumido café en el último día, el porcentaje más alto registrado en 20 años, lo que evidencia la intensa preferencia por esta bebida.

Desde el punto de vista económico, el mercado global de café actualmente presenta una magnitud significativa. Los estudios en los últimos años indican que el mercado mundial del café fue valorado alrededor de 269.27 millones de dólares (USD), con una tasa de crecimiento anual compuesta superior al 5 %. Este crecimiento ha sido principalmente impulsado por diversos factores, entre los cuales tenemos la innovación en productos, la expansión de cadenas cafeteras, el incremento de cafeterías y el aumento del consumo de cafés de alta especialidad.

En este contexto, la calidad del tostado representa un factor determinante en su calidad y su valor final en el mercado. Tradicionalmente, esta evaluación del grado de tostado ha dependido de métodos sensoriales basados en la experiencia del catador, los cuales son ampliamente utilizados, estos incorporan un componente subjetivo inherente a la percepción individual.

El presente trabajo resalta la necesidad de desarrollar métodos instrumentales específicos para medir la calidad del tostado del café de manera objetiva, cuantitativa y reproducible. Esto ha impulsado la exploración de técnicas instrumentales basadas en la interacción de la radiación con la materia. Dentro de este conjunto de herramientas, la espectroscopía, definida como el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética (luz) y la materia, analizando cómo las sustancias absorben, emiten o dispersan energía a diferentes longitudes de onda, lo cual se posiciona como una alternativa particularmente relevante para el análisis óptico de infusiones de café.

Este proyecto propone desarrollar e implementar un espectrofotómetro de longitudes de onda discretas basada con diodos láser. Estos diodos son elegidos cuidadosamente para interactuar con las propiedades químicas y físicas en infusiones de café. Con lo cual este proceso asimismo permite explorar y encontrar mediciones específicas, reproducibles y cuantitativas

en comparación con los métodos tradicionalmente sensoriales en los cuales se basan en la subjetividad del catador, al igual que otros sistemas basados en luz blanca y monocromadores. Finalmente, esperamos sentar las bases de un nuevo método y crear nuevas oportunidades de investigación en espectroscopia aplicada a productos alimenticios.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La determinación del grado y calidad del tueste del café hoy en día han dependido históricamente de métodos sensoriales tradicionales y empíricos. Entre los más utilizados se encuentran el análisis visual del color del grano, la identificación auditiva de los eventos conocidos como "primer y segundo crack", durante el proceso de tostado, la evaluación del aroma y la prueba de sabor mediante catación. Estos métodos han constituido la base del control de calidad en la industria cafetalera al igual que las personas que se dedican a la producción de café de manera artesanal. [1]

Estas técnicas permiten una evaluación cualitativa del producto, su aplicación está sujeta principalmente de la percepción humana, ya sea de un maestro tostador o de un catador especializado. Esta dependencia de criterios introduce una elevada variabilidad en los resultados, ya que factores como la experiencia del catador, la agudeza sensorial, la fatiga, la edad y las preferencias personales influyen directamente en el criterio de evaluación. Como consecuencia tenemos, que la consistencia entre evaluaciones se vea comprometida, incluso cuando se analizan muestras con condiciones similares.

Esto genera la problemática de la ausencia de métodos objetivos y estandarizados. En el cual tenemos en primer lugar, la reproducibilidad del proceso de tostado resulta limitada, ya que replicar un perfil de tueste idéntico entre distintos lotes es extremadamente difícil sin una métrica cuantitativa universal. En segundo lugar, la falta de datos numéricos confiables reduce la trazabilidad y el control de calidad del tueste, lo que afecta la uniformidad y el valor comercial del café. Finalmente esta situación representa una barrera para la estandarización de procesos y para la innovación tecnológica en la evaluación del tostado del café. [2]

Aunque existen instrumentos objetivos como los colorímetros, estos se limitan principalmente a medir el color de la superficie del grano, sin proporcionar información detallada sobre los cambios fisicoquímicos internos asociados al proceso del tostado. Esta limitación deja un vacío tecnológico, ya que la industria carece de una herramienta accesible que permita una evaluación objetiva, cuantitativa y reproducible de la calidad del tueste de café.

Con este contexto, la presente investigación propone el desarrollo de un espectrofotómetro de

longitudes de onda discretas basado en diodos láser. A diferencia de los sistemas tradicionales mencionados anteriormente, este enfoque permite la medición objetiva de propiedades ópticas del café mediante técnicas como transmitancia, reflectancia, así como un sensor de imagen, convirtiendo dichas propiedades en datos numéricos reproducibles. Estos datos pueden ser analizados como firmas o patrones espectrales asociados a distintos grados y calidades de tueste. [3]

La hipótesis central de este trabajo busca iniciar el camino hacia una nueva alternativa con los patrones espectrales obtenidos mediante el sistema propuesto y con esto poder correlacionarse de manera precisa y consistente con el grado y calidad del tueste del café, superando las limitaciones inherentes a la subjetividad humana y proporcionando a la industria cafetalera una herramienta de control de calidad más robusta y confiable.

JUSTIFICACIÓN

Esta investigación fue seleccionada como una posible solución a la necesidad de avanzar hacia metodologías objetivas, cuantitativas y reproducibles para la evaluación del grado y calidad del tueste del café, un proceso crítico que influye directamente en las propiedades sensoriales, la aceptación del producto y su valor comercial. Actualmente, la industria cafetalera depende en gran medida de métodos sensoriales y empíricos, los cuales, si bien son valiosos desde una perspectiva tradicional, presentan limitaciones inherentes asociadas a la subjetividad humana.

Con esto en mente, visto desde un punto de vista técnico y científico, la dependencia de la evaluación sensorial realizada por catadores o maestros tostadores introduce una alta variabilidad en los resultados, afectando la reproducibilidad del proceso y dificultando estandarizar de manera objetiva. Aunque existen instrumentos como los colorímetros que ofrecen objetividad, su análisis se limita al color superficial solamente, lo cual es una herramienta limitada, sin capturar información relevante sobre los cambios fisicoquímicos internos que ocurren durante el tostado.

Este trabajo se justifica al proponer el desarrollo de un sistema de medición alternativo basado en principios espectroscópicos, capaz de proporcionar información objetiva sobre las propiedades ópticas del café. El cual, mediante el análisis multiparamétrico en infusiones de café, aplicando técnicas como la transmitancia, reflectancia, al igual que un sensor de imagen, combinadas con el uso de fuentes láser de emisión fija, permiten un control preciso de las condiciones de medición, así como una mayor selectividad espectral en comparación con los sistemas tradicionales de banda ancha. Este enfoque contribuye al desarrollar de metodologías de medición más específicas y robustas.

Finalmente, esta investigación busca beneficiar a toda la cadena de valor, desde el tostador artesanal hasta el consumidor final, al proponer una herramienta accesible que permita la caracterización cuantitativa del tostado de manera reproducible. La implementación de este tipo de sistemas puede contribuir a mejorar el control de calidad, facilitar la estandarización de procesos y apoyar la toma de decisiones en entornos productivos; asimismo, el trabajo sienta bases para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de modelos de correlación

entre firmas espectrales y parámetros de calidad, fortaleciendo la integración entre la óptica, la instrumentación electrónica y la ciencia de los alimentos.

HIPÓTESIS

Es posible el desarrollo de un espectrofotómetro de longitudes de ondas discretas basado en diodos láser para la evaluación del grado de tostado de café complementando con un sensor de imagen (Pi Cam), capaz de medir de manera simultánea la transmitancia y la reflectancia en infusiones de café, de tal forma que los parámetros ópticos obtenidos nos permitan diferenciar y clasificar de manera objetiva y cuantitativa los niveles de tueste (claro, medio, oscuro), superando las limitaciones de métodos sensoriales tradicionales.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Diseñar y construir un espectrofotómetro de longitudes de ondas discretas basadas en diodos láser, integrado con un sistema de adquisición de imágenes, que mediante el análisis de señales de transmitancia y reflectancia en infusiones de café permita obtener parámetros ópticos objetivos y cuantitativos para la clasificación del grado del tostado de café.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la literatura científica relacionada con la espectroscopia, óptica y la calidad del café, así como identificar la selección de componentes que integran el sistema propuesto.
- Diseñar el sistema óptico y electrónico del espectrofotómetro, incluyendo la integración de diodos láser, fotodetectores y celdas de muestra.
- Construir e implementar el prototipo del sistema, incluyendo la manufactura de los circuitos, la programación de los microcontroladores y el desarrollo de la interfaz de visualización y adquisición de datos.
- Establecer un protocolo estandarizado para la preparación de infusiones de café, que garantice la reproducibilidad de las muestras bajo condiciones experimentales controladas.
- Adquirir y procesar las señales ópticas de transmitancia, reflectancia al igual que la información obtenida mediante el sensor de imagen, en infusiones de café elaboradas con granos de tostado claro, medio y oscuro.
- Analizar y validar nuestros resultados obtenidos, para poder determinar si existen diferencias cuantitativas entre los diferentes grados de tostado de café.

CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO

La presente tesis contribuye al conocimiento en el área de la electrónica aplicada a la física, específicamente en la instrumentación óptica para espectroscopia, mediante el desarrollo de un sistema de instrumentación electrónica para la caracterización óptica de infusiones de café.

A diferencia de enfoques tradicionales basados en la subjetividad del individuo, maestro cata-dor o colorímetros basados en el color superficial, este trabajo integra de manera sistemática mediciones ópticas de transmitancia, reflectancia, al igual que imágenes obtenidas a partir de un sistema de longitudes de onda discretas basado en diodos láser.

Una contribución relevante de esta investigación es el proceso y la demostración experimental de las propiedades ópticas de infusiones de café, con el cual poder analizar si existen varia-ciones cuantificables asociadas con el grado de tostado, permitiendo su clasificación objetiva en categorías de tueste claro, medio y oscuro. El uso combinado de un sensor de imagen, lo cual permite ampliar el panorama en los cambios con la interacción de la luz, de igual manera encontrar una caracterización, aportando una perspectiva complementaria en el análisis del café.

Adicionalmente, este trabajo aporta conocimiento metodológico al establecer un protocolo experimental reproducible para la preparación de infusiones y la adquisición de datos ópticos bajo condiciones controladas. Este protocolo, junto con la arquitectura del sistema desarrollado, puede ser utilizado como referencia para investigaciones posteriores, tanto en café como en otros productos alimenticios, fortaleciendo el uso de técnicas espectroscópicas discretas en aplicaciones de control de calidad, al igual que en el campo del desarrollo de nuevos prototipos, los cuales, combinados con la ingeniería, pueden alcanzar diseños con nuevos enfoques en esta misma industria.

Finalmente, esta investigación sienta las bases para investigaciones futuras, las cuales pueden ayudar al futuro de correlación entre firmas ópticas y parámetros de calidad del tostado, contri-buyendo a la transición de métodos sensoriales tradicionales subjetivos hacia herramientas instrumentales cuantitativas dentro de la industria cafetalera, entre diversas aplicaciones que se le pueden dar en futuras investigaciones.

LIMITACIONES Y ALCANCES

ALCANCES DEL PROYECTO

El proyecto abarca el diseño y experimentación de un espectrofotómetro de longitudes de ondas discretas basado en diodos láser para la evaluación del grado de tostado del café, incluyendo:

- El sistema se basa en diodos láser comerciales de bajo costo como fuente de radiación óptica en longitudes de onda discreta.
- El diseño de implementación del sistema de medición permite la obtención de señales de transmitancia y reflectancia en infusiones de café bajo una geometría óptica controlada.
- La implementación del sensor de imagen se hará con una PI CAM IR mediante el microcontrolador Raspberry Pi4, con el fin de adquirir información óptica con el fin de complementar las mediciones espectroscópicas.
- Se desarrollará una interfaz gráfica que permite la visualización y análisis preliminar de los datos ópticos adquiridos por el sistema.

LIMITACIONES

- El sistema propuesto se evalúa únicamente para la clasificación de infusiones de café correspondientes a grados de tueste claro, medio y oscuro, sin considerar niveles intermedios o perfiles específicos de tostado.
- La experimentación se realiza bajo condiciones ambientales controladas, por lo que los resultados obtenidos no se extrapolan directamente a entornos industriales.
- El estudio no contempla el uso de equipamiento profesional de laboratorio para la preparación de las infusiones, priorizando procedimientos reproducibles con recursos accesibles.
- La implementación del sistema emplea materiales y componentes de fácil acceso, tales

como celdas de vidrio y sensores comerciales, por lo que no se abordan aspectos relacionados con certificación industrial o desempeño a largo plazo.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

En este primer capítulo se presentan los antecedentes relacionados con la evaluación del grado de tostado de café y el uso de técnicas ópticas y espectroscópicas aplicadas al análisis de alimentos. Para ello, se revisan artículos científicos, libros, tesis y proyectos previos para el enriquecimiento teórico y evaluar los mismos que se desarrollaron anteriormente.

Asimismo, se abordan de manera general los fundamentos de la espectroscopia y la óptica como herramienta analítica, así como su aplicación en el estudio de procesos asociados al tostado del café. Con esto podemos identificar las limitaciones existentes que motivan el desarrollo de esta investigación.

1.1 Importancia del tostado del café

El proceso de tostado de café constituye una etapa fundamental dentro de la cadena productiva de este alimento, pues transforma los granos verdes con características física y químicas muy diferentes en un producto que desarrolla propiedades sensoriales deseables en la bebida final. Durante el tostado se producen cambios fisicoquímicos tanto en compuestos volátiles como no volátiles, que afectan directamente de compuestos aromáticos y de sabor que son percibidos durante la degustación, siendo esencial para definir la calidad organoléptica del café preparado. [4] La literatura científica señala que el grado de tostado influye en la composición química de los granos, modificando la presencia y concentración de azúcares, ácidos fenólicos, compuestos volátiles y otros precursores del aroma, lo cual se asocia estrechamente con atributos de calidad como dulzor, acidez, cuerpo y aroma. [5] Por ejemplo, durante el desarrollo térmico ocurren reacciones de Maillard, degradación de azúcares y formación de melanoidinas, que son responsables de aspectos tan importantes como el perfil aromático y el color característico del café tostado. [6]. Estudios comparativos también han demostrado que variaciones en el perfil de tostado (tiempo y temperatura) generan diferencias significativas tanto en la composición química como en las propiedades sensoriales del café tostado, lo cual destaca la importancia del control del proceso para lograr productos de alta calidad. [7]

1.2 Métodos tradicionales para evaluar el tostado

La evaluación del grado de tostado del café históricamente ha dependido de métodos sensoriales y empíricos, basados principalmente en la percepción humana y en mediciones físicas simples. Entre los métodos más comunes se encuentran la catación profesional, el análisis visual del color del grano y de la bebida, al igual que escalas descriptivas basadas en atributos sensoriales.

El método de catación (coffee cupping) es uno de los procedimientos más reconocidos en la industria del café. Consiste en la evaluación sensorial de la bebida por parte de un panel de catadores entrenados, quienes clasifican atributos tales como aroma, sabor, cuerpo, acidez, amargor y aftertaste en función de estándares establecidos. Este método es ampliamente utilizado por asociaciones de café y tostadores como herramienta para juzgar calidad y definir grados de tostado, aunque está sujeto a variabilidad debido a factores humanos y condiciones de evaluación. [8]

Además de la catación, el análisis visual del color es utilizado tradicionalmente para estimar el grado de tostado. Algunos estudios validan la relación entre parámetros de color de los granos tostados con perfiles de tostado y atributos sensoriales, empleando escalas estandarizadas de color o instrumentación simple para medir la tonalidad de la superficie del grano [9]. Aunque estas mediciones aportan información útil, no capturan cambios internos significativos del grano ni proporcionan una evaluación cuantitativa completa del proceso de tueste.

Otro enfoque tradicional combina las mediciones físico-químicas básicas, como pérdida de masa, densidad y contenido de humedad, que se correlacionan con el nivel de desarrollo del grano durante el tueste. Estos métodos suelen usarse en laboratorios como indicadores indirectos del grado de tostado junto con el análisis sensorial, pero carecen de especificidad y requieren interpretación experta para relacionarse con atributos sensoriales finales. [10]

En general, aunque los métodos tradicionales han proporcionado una base para evaluar el tostado del café, su dependencia de la percepción humana y de mediciones indirectas limita su objetividad, reproducibilidad y capacidad para capturar información integral del proceso térmico, lo que motiva al desarrollo de técnicas más cuantitativas y objetivas. [11]

En la Figura 1 se aprecian la diferencia de color dependiendo del tostado, claro, medio y oscuro.



Figura 1: Granos de café con diferentes grados de tostado.

1.3 Espectroscopia y óptica

La espectroscopia es una técnica analítica basada en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, lo que permite obtener información sobre la composición química y las propiedades físicas de una muestra sin destruirla. Estas interacciones como absorciones, dispersión y emisión de energía dependen de características intrínsecas de las moléculas analizadas y son fundamentales para comprender fenómenos ópticos en una amplia gama de disciplinas científicas y tecnológicas, incluyendo la física, la química y las ciencias de los alimentos. La espectroscopia óptica, en particular, abarca métodos que utilizan regiones del espectro que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo y la fluorescencia, brindando (huellas) espectrales que pueden ser utilizadas como indicadores de calidad y composición.

En la industria alimentaria, las técnicas espectroscópicas se han consolidado como herramientas potentes para el análisis no destructivo y de alta velocidad, permitiendo evaluar características de productos alimenticios sin necesidad de procesos químicos complejos o largos periodos de preparación de muestras. Por ejemplo, la espectroscopia UV-Visible explora la absorción de luz en las regiones ultravioleta y visible para cuantificar compuestos específicos o pigmentos, lo cual resulta útil en la determinación de parámetros como el contenido

de colorantes o antioxidantes en frutas y bebidas. La espectroscopia infrarroja (IR) y su variante de transformada de Fourier (FTIR) aprovechan las vibraciones moleculares inducidas por radiación infrarroja para identificar grupos funciones presentes en alimentos, ofreciendo información sobre composición y cambios relacionados con procesos físicos-químicos. [12]

Además, técnicas como la espectroscopía de fluorescencia buscan la luz emitida por moléculas tras ser excitadas, lo cual proporciona datos altamente selectivos sobre compuestos presentes en matrices complejas; esta capacidad ha sido utilizada para analizar presencia de contaminantes, adulteraciones o cambios inducidos por procesamiento térmico en productos alimentarios. La combinación de métodos espectroscópicos con herramientas de análisis multivariante y quimiometría ha permitido caracterizar de manera cuantitativa parámetros de calidad y autenticidad, reduciendo la dependencia de evaluaciones sensoriales y métodos destructivos tradicionales. [13]

1.4 Espectrofotómetros convencionales

Un espectrofotómetro convencional está compuesto por varios elementos fundamentales: una fuente de radiación de amplio espectro, un sistema de selección de longitud de onda (monocromador), un compartimiento de muestra y un detector óptico. Las fuentes de luz más comunes incluyen lámparas de deuterio para la región ultravioleta y lámparas de tungsteno-halógeno para la región visible e infrarroja cercano. Estas fuentes generan un espectro continuo que posteriormente es filtrado por el monocromador para aislar longitudes de ondas específicas.

En la Figura 2 se muestra un esquema general de los componentes principales de un espectrofotómetro convencional.

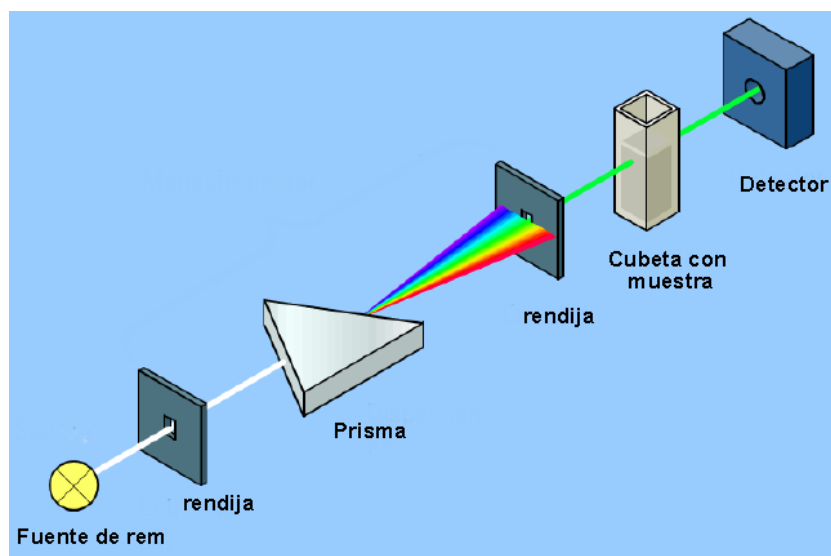


Figura 2: Esquema de un espectrofotómetro.

El monocromador es un componente clave en los espectrofotómetros tradicionales y suele estar basado en rejillas de difracción o prismas ópticos. Su función es dispersar la luz incidente y seleccionar una longitud de onda estrecha mediante rendijas mecánicas. Aunque este mecanismo permite un barrido espectral preciso, introduce complejidad mecánica, incrementa el tamaño del sistema y puede afectar la estabilidad y velocidad de adquisición de datos, especialmente en aplicaciones que requieran mediciones rápidas o portátiles. [14]

En cuanto a la detección, los espectrofotómetros convencionales emplean dispositivos como fotodiodos, tubos fotomultiplicadores o arreglos CCD, dependiendo de la región espectral y la sensibilidad requerida. Estos detectores convierten la radiación óptica transmitida o reflejada por la muestra en señales eléctricas proporcionales a la intensidad luminosa, permitiendo el cálculo de parámetros ópticos mediante leyes fundamentales como la ley de Beer-Lambert. [12]

1.5 Fuentes discretas (Láseres)

El desarrollo de fuentes ópticas basadas en diodos láser ha tenido un impacto significativo en la instrumentación espectroscópica moderna, particularmente en aplicaciones donde se requiere alta estabilidad espectral, elevada intensidad luminosa y diseños compactos. A diferencia de las fuentes de banda ancha empleadas en los espectrofotómetros tradicionales, los diodos

láser emiten radiación altamente monocromática, con anchos de línea espectral muy estrechos, lo que permite realizar mediciones selectivas sin necesidad de monocromadores ópticos complejos.

Los diodos láser se caracterizan por su alta eficiencia energética, tamaño reducido y facilidad de integración electrónica, lo que los convierte en candidatos idóneos para sistemas de medición específicos y portátiles. Además, su emisión colimada y direccional mejora la relación señal-ruido en aplicaciones espectroscópicas, permitiendo una interacción más controlada entre la radiación y la muestra analizada. [15] Diversos estudios han demostrado que los sistemas espectroscópicos basados en fuentes discretas pueden ofrecer resultados comparables a los de sistemas convencionales de banda ancha cuando se combinan con técnicas de análisis multivariante. En aplicaciones de control de calidad, esta estrategia permite desarrollar dispositivos más robustos, económicos y fácilmente reproducibles, sin sacrificar sensibilidad ni precisión en la medición. [12] Asimismo, el uso de diodos láser facilita la integración con sensores ópticos adicionales, como fotodetectores y sistemas de adquisición de imágenes, ampliando las capacidades analíticas del sistema. [16]

En la Figura 3 se observa la interacción de un láser con un medio y su comportamiento.

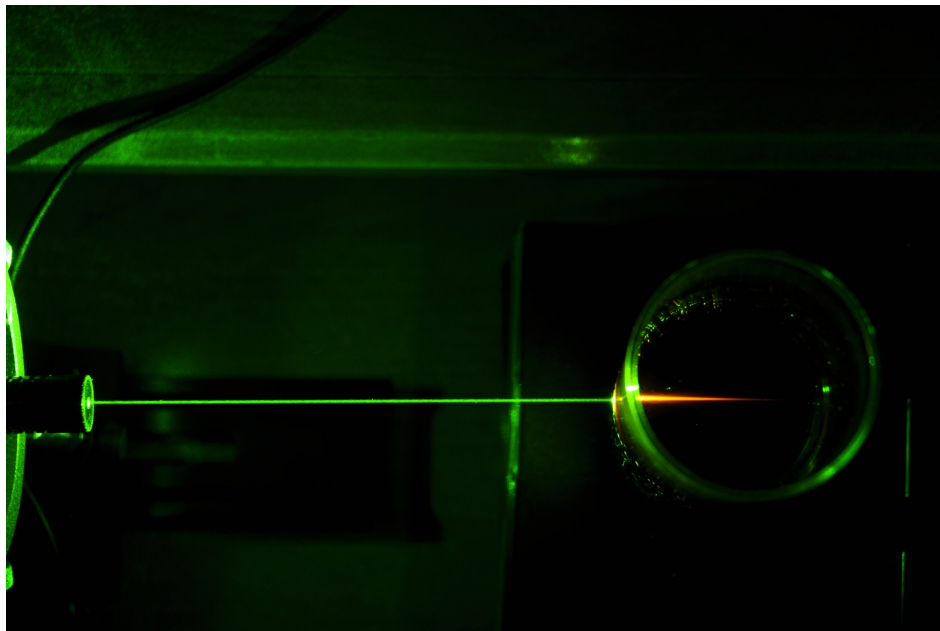


Figura 3: Fuente discreta (Láser).

1.6 Instrumentación Electrónica

La instrumentación electrónica desempeña un papel fundamental en el desarrollo de sistemas de medición óptica y espectroscópica, ya que permite la conversión, acondicionamiento y adquisición de señales eléctricas derivadas de fenómenos físicos asociados a la interacción luz-materia. En este tipo de sistemas, la señal óptica detectada debe ser transformada en una señal eléctrica proporcional, procesable y reproducible, lo que requiere el uso de dispositivos electrónicos diseñados específicamente para aplicaciones de alta sensibilidad y bajo nivel de ruido. [17]

En sistemas espectrofotométricos, los fotodetectores constituyen uno de los elementos electrónicos clave. Dispositivos como fotodiodos, fototransistores y fotodiodos de avalancha convierten la radiación óptica incidente en corriente eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico. La selección del fotodetector depende de factores como la región espectral de operación, la sensibilidad requerida y la velocidad de respuesta del sistema [15]. Estas corrientes suelen ser de muy baja magnitud, por lo que requieren circuitos de acondicionamiento adecuados para su correcta medición el cual es una etapa crítica dentro de la instrumentación electrónica, ya que permite amplificar, filtrar y adaptar la señal proveniente del sensor a los niveles requeridos por los sistemas de adquisición. En aplicaciones ópticas, es común el uso de amplificadores de transimpedancia para convertir corrientes foto generadas en señales de voltaje, minimizando el ruido y preservando la integridad de la información medida. El diseño de estas etapas influye directamente en parámetros como la relación señal-ruido, el rango dinámico y la estabilidad del sistema [18].

En la siguiente Figura 4 veremos un espectrofotómetro con su instrumentación electrónica, la cual incluye una cámara para la visualización de muestras.

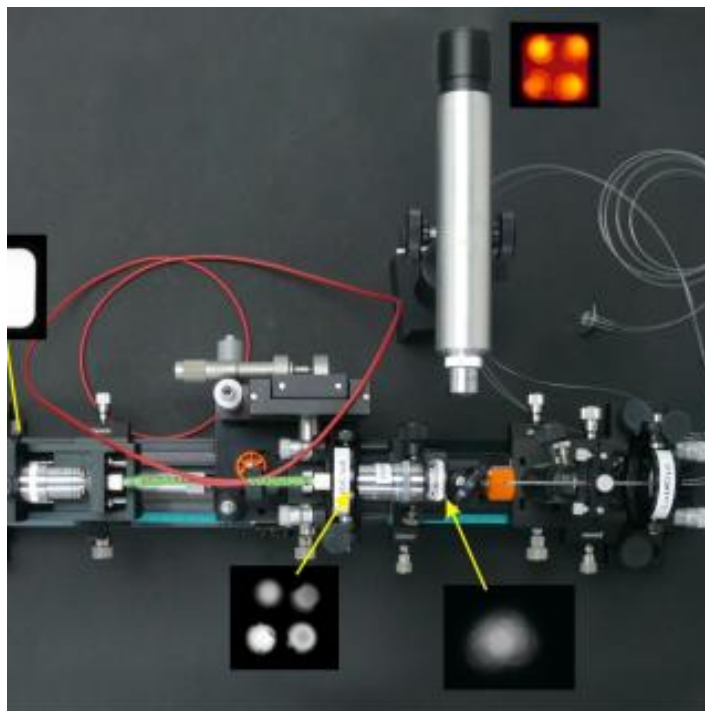


Figura 4: Espectrofotómetro con instrumentación electrónica.

La adquisición y digitalización de señales se realiza generalmente mediante convertidores analógico-digitales (ADC) integrados en microcontroladores o sistemas embebidos. Estos dispositivos permiten muestrear las señales acondicionadas y almacenarlas o procesarlas digitalmente para su posterior análisis. La resolución del ADC, la frecuencia de muestreo y la sincronización con los elementos ópticos son factores determinantes en la precisión y repetibilidad de las mediciones [19]. En sistemas modernos, la instrumentación electrónica suele integrarse con plataformas programables que facilitan la automatización del proceso de medición y la visualización de resultados.

1.7 Brecha Tecnológica

Con lo mencionado anteriormente de los antecedentes relacionados con la evaluación del tostado del café y el uso de técnicas ópticas y espectroscópicas, se identifica una brecha tecnológica entre los métodos tradicionales de evaluación y las soluciones instrumentales actualmente disponibles. Tenemos presente que los métodos sensoriales tradicionales de

evaluación siguen siendo ampliamente utilizados en la industria cafetalera; sin embargo, la dependencia de la subjetividad humana introduce subjetividad y limita la reproducibilidad de los resultados. Por otro lado, tenemos los instrumentos ópticos convencionales, como los espectrofotómetros de banda ancha, los cuales ofrecen mediciones objetivas, pero su elevado costo, complejidad operativa y baja portabilidad restringen su implementación fuera del entorno de laboratorios especializados.

En este contexto, podemos identificar la necesidad de desarrollar un sistema de medición que combine la objetividad de las técnicas espectroscópicas con la simplicidad y accesibilidad que requiere la industria cafetalera. La ausencia de un espectrofotómetro basado en longitudes de onda discretas, capaz de medir de forma simultánea parámetros como transmitancia y reflectancia, al igual que señales ópticas complementarias. Contribuye a la brecha tecnológica que tenemos hoy en día, lo cual motiva esta investigación; sumando a esto permitirá avanzar hacia metodologías de evaluación del tostado del café más objetivas, cuantitativas y reproducibles.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

A continuación, se analizarán las principales investigaciones que circunscriben en el estado del arte de este proyecto.

En la evaluación del grado de tostado del café ha sido históricamente un proceso basado en métodos sensoriales y empíricos, ampliamente aceptados en la industria cafetalera. Entre otros métodos destacan la catación profesional, el análisis visual del color del grano y la identificación auditiva de eventos durante el tostado, como primer y segundo “crack”. No obstante, diversos autores señalan que, si bien estos métodos permiten caracterizar la calidad sensorial del producto, su dependencia del juicio humano introduce variabilidad y limita la reproducibilidad de los resultados.

catación, estandarizada por organismos como la Specialty Coffee Association (SCA), se basa en la evaluación sensorial de atributos como aroma, sabor, acidez, cuerpo y posgusto mediante paneles de catadores entrenados. Aunque este método proporciona información valiosa sobre la percepción del consumidor, estudios previos han señalado que factores como la experiencia del evaluador, la fatiga sensorial y las condiciones ambientales influyen en los resultados obtenidos [20]. Esta dependencia del juicio humano limita la reproducibilidad de los resultados y dificulta la comparación objetiva entre los distintos lotes o procesos de tostados. A continuación en la imagen siguiente 5 se muestra como se hace la catación por la SCA.



Figura 5: Catación según la SCA (Speciality Coffee Association).

Diversos estudios han demostrado que variaciones en el perfil de tostado, tiempo y temperatura generan cambios significativos en la composición química del café y, por ende, en su calidad sensorial. Estos cambios afectan tanto a los compuestos volátiles como a los no volátiles, lo que refuerza la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar de manera objetiva el grado de tostado [21].

Con esto mencionado, el control preciso del tostado se vuelve esencial para garantizar la consistencia del producto final, particularmente en cafés de especialidad.

En alimentos y bebidas, el análisis clásico la Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC), la Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS) suele ser preciso, pero también lento y costoso y destructivo. En cambio, muchas técnicas espectroscópicas permiten mediciones rápidas, no destructivas, con mínima preparación de muestra e incluso en línea (en planta), siempre que se integren con quimiometría/ aprendizaje automático para interpretar señales complejas.

Estas mediciones se centran en cada matriz alimentaria (leche, café, vino, miel, aceites, especias, harinas, etc.). Todo esto produce una huella espectral asociada a composición química (agua, grasas, proteínas, azúcares, compuestos fenólicos, etc.).

También a una estructura física (tamaño de partícula, dispersión, turbidez, empaques), unas transformaciones (tostado, fermentación, oxidación, envejecimiento, adulteración) [22].

Este esquema permite contextualizar las metodologías utilizadas, las técnicas espectroscópicas permiten la caracterización de matrices alimentarias mediante distintos enfoques analíticos. En la figura 6 se presenta un esquema general del flujo de trabajo empleado en este tipo de análisis, incluyendo las etapas de adquisición espectral y procesamiento quimiométrico.

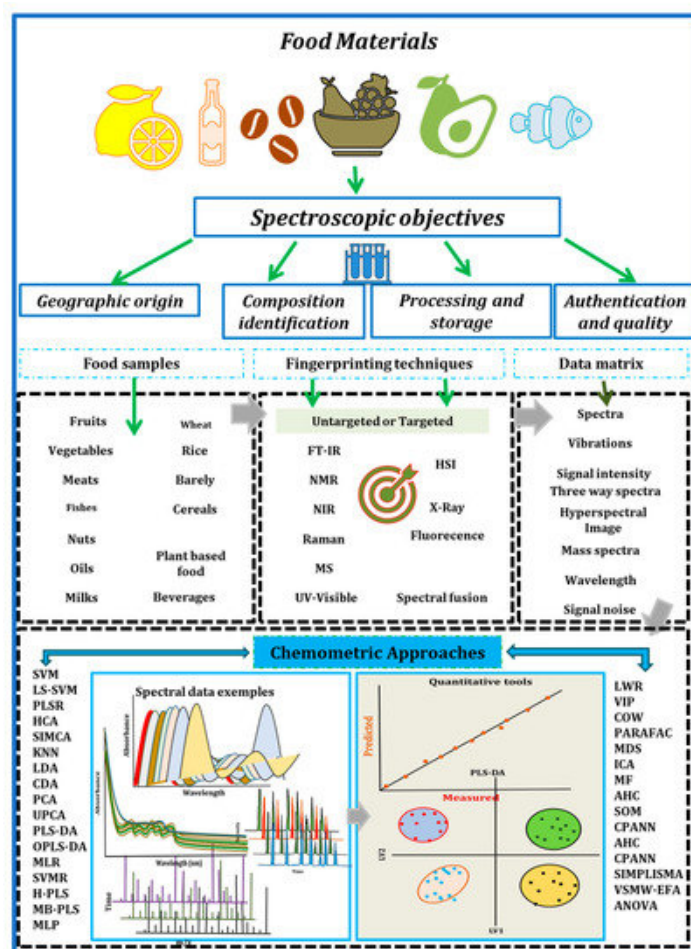


Figura 6: Flujo de trabajo general de técnicas espectroscópicas avanzadas para el análisis de alimentos.

S

En la espectroscopía UV-Visible (UV-Vis) aplicada a bebidas de café ha emergido como una herramienta analítica rápida, no destructiva y cuantitativa para caracterizar el efecto del tostado sobre compuestos extraíbles.

Durante el tostado, se degradan compuestos fenólicos como los ácidos clorogénicos y se gene-

ran productos derivados de reacciones de Maillard y caramelización, entre ellos melanoidinas, responsables del color oscuro característico del café tostado. Estos cambios se reflejan directamente en el espectro UV-Vis de la bebida. En la región ultravioleta (aproximadamente 250-360 nm) predominan las señales asociadas a compuestos fenólicos y productos intermedios de reacción, mientras que en la región visible, particularmente alrededor de 420 nm, se observa la absorbancia característica de compuestos pardeados de alto peso molecular. [23].

En el análisis de bebidas de café, es importante considerar que el espectro UV-Vis no depende exclusivamente del grado de tostado, sino también de las condiciones de extracción. Factores como la temperatura del agua, el tiempo de contacto, la relación café-agua y la molienda influyen en la concentración de compuestos solubles presentes en la infusión. Se ha demostrado que tanto el nivel de tostado como la temperatura de preparación afectan significativamente el color y las características ópticas de la bebida. [24].

Por ello, cualquier modelo espectrofotométrico orientado a evaluar el tostado debe contemplar un protocolo experimental estandarizado que garantice la reproducibilidad y minimice la variabilidad asociada a la preparación.

A diferencia de los espectrofotómetros comerciales de barrido continuo, que registran el espectro completo en un rango amplio de longitudes de onda, investigaciones recientes sugieren que la información más relevante para caracterizar el tostado se concentra en regiones específicas del espectro. Esto abre la posibilidad de utilizar sistemas de medición basados en longitudes de onda discretas seleccionadas estratégicamente; en estos casos se seleccionaron las bandas centradas en 280 nm, 360 nm y 420 nm, las cuales se usaron para capturar información representativa de productos tempranos, intermedios y avanzados [25]. En la Figura 7 siguiente observaremos el esquema de funcionamiento de un sistema de Espectroscopía UV/VIS e IR.

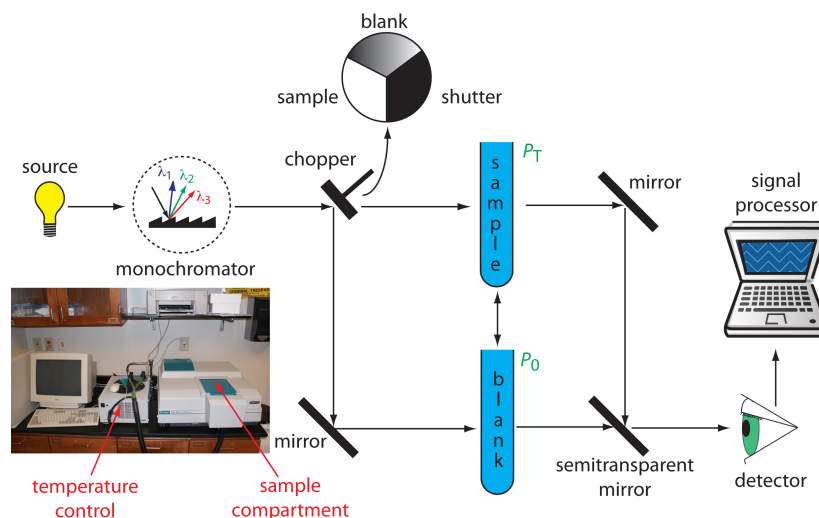


Figura 7: Espectroscopia UV/VIS e IR

En los espectrofotómetros UV-Vis convencionales de laboratorio constituyen la plataforma estándar para mediciones cuantitativas de absorbancia/transmitancia debido a su arquitectura óptica estable (fuentes UV/Vis, monocromador o arreglo de diodos y detectores sensibles) y a la existencia de prácticas de verificación metrológica. De manera general, estos equipos se clasifican en configuraciones de haz simple y doble haz; esta última reduce el efecto de deriva instrumental al incorporar un canal de referencia, favoreciendo aplicaciones donde se requiere estabilidad y reproducibilidad. El desempeño analítico se describe y evalúa mediante parámetros como exactitud de longitud de onda, ancho de banda espectral, exactitud fotométrica y luz parásita, los cuales condicionan la confiabilidad de resultados, especialmente en la región UV. En laboratorios regulados y de alta trazabilidad, la adecuación de instrumento se verifica mediante estándares y guías como ASTM E275 el cual es una práctica estandar que define los procedimientos para describir y medir el desempeño de espectrofotómetros de ultravioleta (UV) y visible al igual de criterios de calificación descritos en USP(857), apoyándose en materiales de referencia certificados [26].

En NIR para predecir el color de tostado y parámetros clave(en granos/molido), aplican NIR con selección de variables y PLS para predecir color de tostado(roasting color) y otros parámetros(además de cafeína). Este tipo de trabajo es importante porque demuestra que el grado de tostado puede molderse como variable cuantitativa a partir de regiones espectrales

relevantes, no solo por inspección visual [27].

En NIR para estimar atributos sensoriales de la bebida(vinculo tostado = taza) construyen modelos quimiométricos(PLS) para predecir puntuaciones sensoriales de la bebida(acidez,amargor,cuerpo,etc) usando espectros NIR de cafés tostados, además de identificar regiones espectrales relacionadas con compuestos relevantes [28].

En la siguiente imagen veremos el espectro electromagnético el cual comprende de un amplio rango de longitudes de onda, desde la región de los rayos x hasta las microondas. Cada región se caracteriza por un intervalo específico de energía y frecuencia, lo cual determina su interacción con la materia. Dentro de este espectro, la región del infrarrojo cercano (Near-Infrared, NIR) se encuentran ubicada entre el visible y el infrarrojo medio, abarcando aproximadamente longitudes de onda entre 780 nm y 2500 nm. En la 8 se muestra la región del NIR dentro del espectro electromagnético.

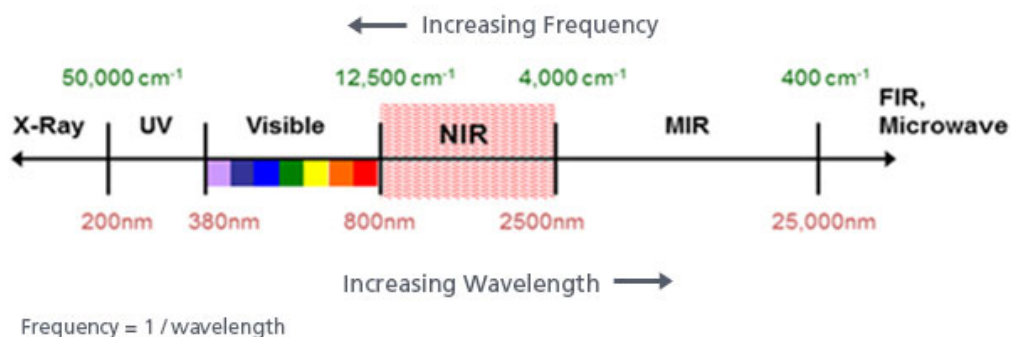


Figura 8: Ubicación de la región del infrarrojo cercano (Near-Infrared, NIR), comprendida aproximadamente entre 780 y 2500nm.

La región NIR se sitúa inmediatamente después de la visible y se caracteriza por un incremento en la longitud de onda y una disminución en la frecuencia respecto a este.

Un enfoque reciente en la monitorización cuantitativa del tostado del café es el uso combinado de NIR y Raman. En este estudio se usaron ambas técnicas espectroscópicas durante el proceso de tostado para analizar variables importantes relacionadas con los cambios químicos que causa el calor. Esto, mediante el empleo de análisis quimiométrico multivariado, particularmente regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), se logró correlacionar las señales espectrales

con parámetros representativos del desarrollo del tostado, evidenciando que la información óptica contiene suficiente contenido químico para describir la evolución del proceso de manera cuantitativa. El uso combinado de NIR y Raman permitió capturar tanto información global de la matriz (característica del NIR) como señales más específicas relacionadas con vibraciones moleculares particulares (propias del Raman), incrementando la capacidad predictiva de los modelos. Los resultados demostraron que la espectroscopía, integrada con herramientas estadísticas adecuadas, puede emplearse no solo para clasificar niveles de tostado, sino también para estimar de manera continua variables asociadas a la transformación química del grano [29].

En enfoques de bebidas de café, se han reportado arquitecturas ópticas compactas basadas en fuentes discretas, incluyendo el diodo láser de 405 nm para combinar mediciones de absorción visible, dispersión inducida por láser y fluorescencia con fines de fingerprinting de la bebida, lo que demuestra la variabilidad de instrumentación portátil en café utilizando longitudes de onda discretas. Sin embargo, la cuantificación del grado de tostado en infusiones se ha abordado con mayor frecuencia mediante marcadores espectrofotométricos discretos (regiones UV asociadas a fenoles y bandas visibles asociadas a pardeamiento), y se ha demostrado que el tostado impacta significativamente propiedades ópticas de la bebida, como el color, siempre que se controle la variabilidad del método de extracción [30].

Un estudio reciente ha explorado la interacción entre radiación láser y líquidos como una herramienta para caracterizar propiedades ópticas y fisicoquímicas de diferentes sustancias. Estos demostraron la radiación de líquidos mediante pulsos láser puede generar variaciones locales de temperatura que modifican el índice de refracción del medio, produciendo patrones de difracción característicos que pueden capturarse mediante cámaras digitales y analizarse mediante procesamiento de imágenes. Dichos patrones se consideran como una firma óptica del líquido analizado permitiendo diferenciar entre distintos compuestos o mezclas. [31]

En conjunto, con los trabajos relacionados, demuestran que el grado de tostado puede evaluarse de manera cuantitativa mediante espectroscopía y herramientas de quimiometría al igual de tener el potencial para combinar estas fuentes láser con sistemas de captura de imagen para analizar propiedades ópticas de líquidos. Esto permite la predicción de variables de proceso,

parámetros fisicoquímicos y sensoriales (color, parámetros fisicoquímicos), atributos de taza, proporciones de mezcla o incluso familias de compuestos volátiles asociados al desarrollo aromático del tostado. Los estudios con NIR han demostrado que pueden predecir el color y las características sensoriales al seleccionar zonas espectrales importantes. Por otro lado, las técnicas de MIR, Raman e imagen hiperespectral han permitido desarrollar modelos más detallados, aunque requieren instrumentos más complejos.

No obstante, del análisis de la literatura se desprende que la mayoría de estos desarrollos se fundamentan en instrumentación de amplio rango espectral o en sistemas de alta complejidad, lo que implica mayores costos y menor portabilidad. Con lo siguiente, la exploración de estrategias basadas en longitudes de ondas discretas mediante diodos láser representa una alternativa técnicamente viable para la identificación de marcadores ópticos asociados al tostado. Esto tiene el potencial de simplificar la arquitectura instrumental sin comprometer la capacidad discriminativa. Esto es posible siempre que se establezcan protocolos experimentales reproducibles y criterios rigurosos para la validación de los modelos y resultados.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Fundamentos de Radiación Electromagnética

La radiación electromagnética constituye la base física de los fenómenos espectroscópicos y describe la propagación de energía a través del espacio en forma de ondas compuestas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes, mutuamente perpendiculares y perpendiculares a la dirección de propagación. De acuerdo con la teoría electromagnética clásica desarrollada por Maxwell, estas ondas se propagan en el vacío con una velocidad constante $c \approx 3 \times 10^8$ m/s [15].

Desde el punto de vista cuántico, la radiación electromagnética puede describirse también como un flujo de fotones, donde cada fotón transporta una cantidad discreta de energía. La energía de un fotón está relacionada con su frecuencia ν mediante la expresión de Planck:

$$E = h\nu \quad (3.1)$$

donde h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} J · s). Dado que la frecuencia y la longitud de onda λ están relacionadas por:

$$c = \lambda \nu \quad (3.2)$$

La energía puede expresarse también como:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.3)$$

Esta relación muestra que la energía es inversamente proporcional a la longitud de onda. Por lo tanto, radiaciones de menor longitud de onda poseen mayor energía.

El espectro electromagnético abarca un amplio rango de longitudes de onda, desde rayos gamma hasta ondas de radio. En aplicaciones espectroscópicas para análisis de alimentos y bebidas, las regiones de interés se encuentran principalmente en el ultravioleta (UV), visible (Vis) e infrarrojo cercano (NIR). La región UV-Visible (aproximadamente 200–800 nm) está

asociada principalmente a transiciones electrónicas en moléculas orgánicas, mientras que la región NIR (aproximadamente 800–2500 nm) se relaciona con sobretonos y combinaciones vibracionales [12].

En la siguiente imagen 9 se observa el espectro electromagnético al igual que la fuente de radiación y su respectivo uso en la vida cotidiana, en esta misma imagen tenemos su relación en frecuencia y en energía.

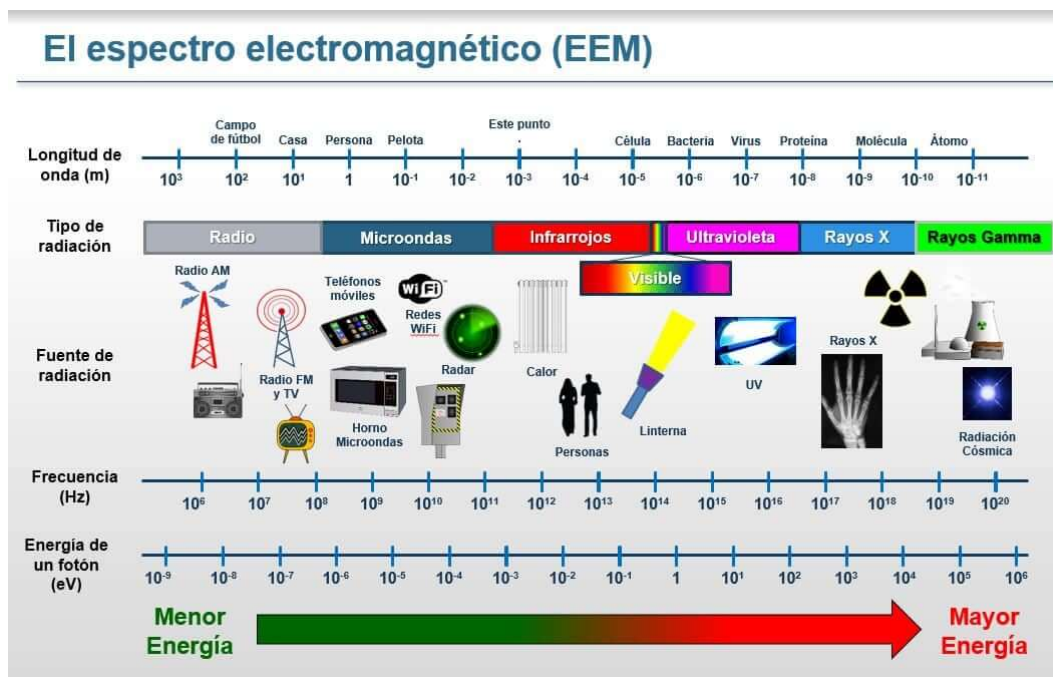


Figura 9: El espectro electromagnético.

3.2 Interacción Luz-Materia

Cuando la radiación electromagnética incide sobre un material, pueden ocurrir diversos fenómenos físicos dependiendo de la naturaleza de la radiación y de las propiedades ópticas del medio. Entre los procesos más relevantes en espectroscopía de absorción se encuentran la absorción, la transmisión, la reflexión y la dispersión [15].

Un medio homogéneo se define como aquel cuyas propiedades físicas y ópticas permanecen constantes en todo su volumen, de modo que parámetros como el índice de refracción y el coeficiente de absorción no dependen de la posición espacial. Esta condición es un supuesto

fundamental para la validez de la Ley de Beer-Lambert, ya que garantiza que la atenuación de la radiación a lo largo del trayecto óptico siga un comportamiento exponencial ideal.

En un medio homogéneo ideal, la intensidad de la radiación transmitida disminuye conforme la luz atraviesa el material debido a la absorción por parte de las especies químicas presentes, este proceso puede describirse mediante la ley de atenuación exponencial:

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (3.4)$$

donde I_0 es la intensidad incidente, I intensidad transmitida, α el coeficiente de absorción y l la longitud del medio o trayectoria óptica.

En medios líquidos complejos, como las infusiones de café, además de la absorción, pueden presentarse fenómenos de dispersión. La dispersión puede clasificarse en dispersión de Rayleigh, cuando las partículas son mucho menores que la longitud de onda incidente, y dispersión de Mie, cuando las partículas son comparables o mayores que dicha longitud de onda. Estos defectos pueden modificar la intensidad detectada y provocar desviaciones respecto al comportamiento ideal de absorción pura [13].

En espectroscopía UV-Visible, la absorción de radiación se debe principalmente a transiciones electrónicas entre niveles energéticos moleculares. En compuestos orgánicos con sistemas conjugados, como aquellos generados durante el tostado del café, estas transiciones electrónicas producen bandas de absorción características en la región visible, asociadas al color observado con la bebida [16].

Para fines instrumentales, el fenómeno de absorción se cuantifica mediante la definición de absorbancia:

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (3.5)$$

Esta magnitud permite relacionar la atenuación de la radiación con la concentración de especies absorbentes presentes en la muestra, constituyendo al fundamento matemático del análisis espectrofotométrico.

En la imagen siguiente 10 observaremos de forma ilustrativa la interacción de la luz con un medio, absorción, transmisión y reflexión.

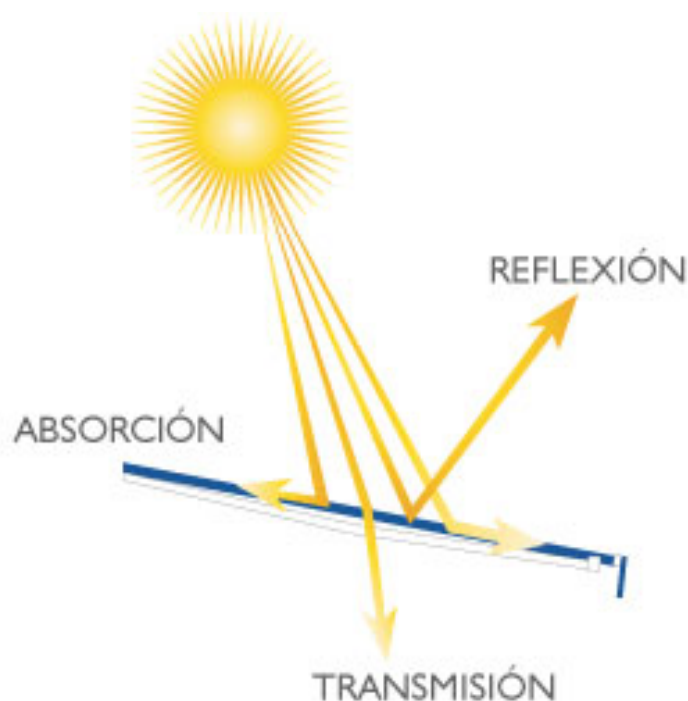


Figura 10: Absorción, Reflexión y Transmisión de la luz.

En el diseño de sistemas basados en fuentes láser de longitud de onda discreta, la interacción luz-materia adquiere particular relevancia debido a que la radiación es esencialmente monocromática, lo que favorece el cumplimiento de los supuestos teóricos asociados a la absorción selectiva y permite simplificar el modelo óptico del sistema de medición.

3.3 Ley de Beer-Lambert

La cuantificación espectrofotométrica de especies químicas en solución se fundamenta en la Ley de Beer-Lambert, la cual describe la relación entre la atenuación de la radiación electromagnética y la concentración del analito presente en el medio absorbente. Esta ley combina los principios establecidos independientemente por Beer y Lambert, integrando la dependencia de la intensidad transmitida con la longitud del trayecto óptico y la concentración de la especie absorbente [32].

Desde un punto de vista físico, la disminución de intensidad al atravesar un medio homogéneo puede expresarse como:

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (3.6)$$

donde I_0 es la intensidad incidente, I la intensidad transmitida, α el coeficiente de absorción, definida como:

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (3.7)$$

Al relacionar esta expresión con el modelo exponencial anterior, se obtiene la forma más utilizada de la Ley de Beer-Lambert:

$$A = \varepsilon(\lambda) cl \quad (3.8)$$

donde: $\varepsilon(\lambda)$ es la absorptividad molar a una longitud de onda específica, C es la concentración analito, l es la longitud del trayecto óptico.

En la siguiente Figura 11 observamos la relación de la Ley de Beer-Lambert con un medio (cubeta) el cual podemos observar la aplicación de las formulas que se presentaron anteriormente.

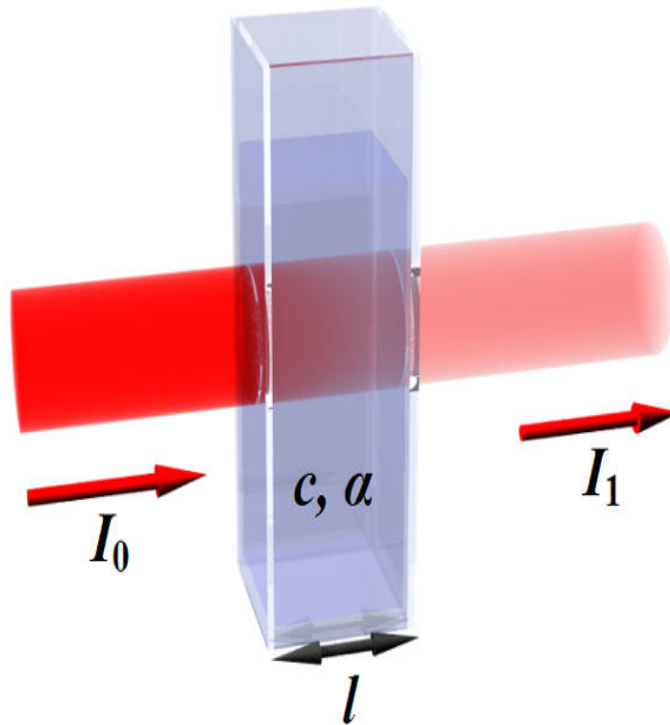


Figura 11: Ley de Beer-Lambert atravesando una cuBeta de tamaño L .

Esta relación establece una proporcionalidad lineal entre absorbancia y concentración, siempre que se cumplan ciertos supuestos:

1. Radiación monocromática.
2. Medio homogéneo y ópticamente claro.
3. Ausencia significativa de dispersión.
4. Concentraciones dentro del rango lineal del detector.

En matrices complejas como las infusiones de café, pueden presentarse desviaciones debido a fenómenos de dispersión por partículas coloidales, interacciones intermoleculares o saturación del detector. Por ello, en aplicaciones experimentales se requiere controlar factores como filtrado, dilución y estabilidad instrumental para preservar la linealidad [33].

En sistemas basados en diodos láser de longitud de onda discreta, la naturaleza esencialmente

monocromática de la fuente favorece el cumplimiento de los supuestos teóricos de la Ley de Beer–Lambert, simplificando el modelo matemático y reduciendo errores asociados al ancho espectral de fuentes de banda ancha.

3.4 Espectroscopía visible y NIR

La espectroscopía en las regiones Visible (400-800 nm) e Infrarrojo Cercano (NIR, 800-2500 nm) se fundamenta en distintos mecanismos de interacción entre radiación y materia. En la región visible, la absorción se debe principalmente a transiciones electrónicas entre niveles energéticos moleculares. Moléculas con sistemas conjugados, enlaces dobles alternados o estructuras aromáticas presentan bandas de absorción en esta región, lo que explica la coloración observable en diversas sustancias orgánicas [32]. En la Figura 12 observaremos la región del espectro visible, el cual es de los 400 nm a los 700nm, al igual observamos que su longitud de onda va de menor a mayor tamaño, dependiendo del color.

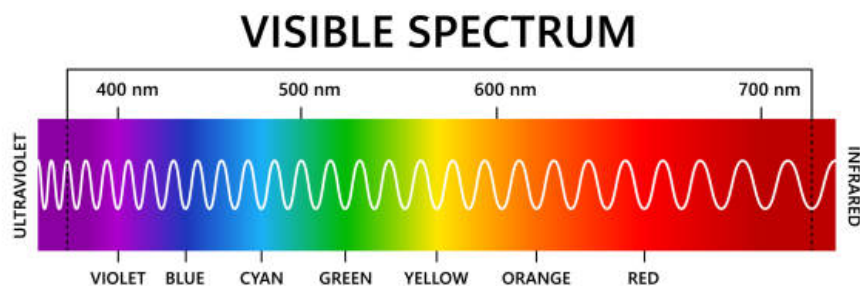


Figura 12: Región visible.

En el caso del café tostado, la formación de melanoidinas durante las reacciones de Maillard genera estructuras poliméricas con sistemas conjugados que absorben en la región visible, produciendo tonalidades que varía con el grado de tostado.

En la parte de espectroscopía NIR está asociada principalmente a sobretonos y combinaciones de vibraciones moleculares, especialmente de enlaces C-H, O-H Y N-H. Aunque las bandas NIR son más anchas y menos intensas que las del infrarrojo medio, su principal ventaja radica

en la capacidad de penetración en matrices complejas y en su aplicabilidad para análisis no destructivos [34].

En el ámbito de alimentos y bebidas, la espectroscopía visible y NIR se han consolidado como una herramienta rápida y no destructiva para evaluar calidad, autenticidad y cambios inducidos por procesos térmicos. Diversos estudios han demostrado su utilidad, para correlacionar firmas espectrales con parámetros fisicoquímicos y sensoriales mediante análisis multivariante [35]. En la Figura 13 observamos un diagrama general de como funciona la espectroscopía NIR al igual que sus partes que integran el sistema de medición.

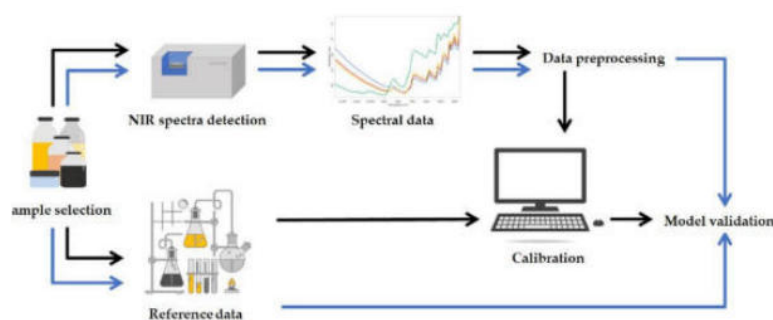


Figura 13: Diagrama de funcionamiento de espectroscopía NIR.

El contexto relacionado con la presente investigación, la selección de longitudes de onda discretas en la región visible responde a la presencia de compuestos cromóforos formados durante el tostado, los cuales modifican la absorbancia de la infusión de manera dependiente del nivel de desarrollo térmico. Esta estrategia permite simplificar la instrumentación respecto a sistemas de barrido continuo, enfocándonos principalmente en la sensibilidad hacia los cambios químicos e imágenes ópticas

3.5 Elementos Ópticos de Control de Intensidad y Selección Espectral

En sistemas ópticos basados en fuentes láser discretas, el control de la intensidad luminosa y la selección espectral constituyen etapas fundamentales para garantizar estabilidad, linealidad y precisión en la medición. Para tal fin, se emplean comúnmente filtros ópticos diseñados para modificar la potencia transmitida o restringir el rango espectral incidente sobre el detector

[15,36].

Los filtros de densidad Neutra (ND) Un filtro de densidad neutra(Neutral Density, ND) es un elemento óptico diseñado para atenuar la intensidad luminosa sin alterar significativamente la distribución espectral de la radiación incidente. A diferencia de los filtros de absorción selectiva, los filtros ND presentan una transmitancia aproximadamente constante en un amplio rango de longitudes de onda.

La atenuación introducida por un filtro ND se expresa en términos de densidad óptica (Optical Density, OD)m definida como:

$$OD = -\log_{10}(T)$$

donde T es la transmitancia del filtro. Despejando:

$$T = 10^{-OD}$$

La potencia óptica transmitida puede entonces moldearse como:

$$P_{out} = T P_{in}$$

donde: P_{in} es la potencia incidente. P_{out} es la potencia transmitida.

El uso de filtros ND es particularmente relevante en sistemas láser, donde la alta coherencia y densidad de potencia pueden provocar del detector o desviaciones del régimen lineal del sistema electrónico. La reducción controlada de intensidad permite mantener la operación dentro del rango dinámico óptimo del fotodiodo y del amplificador de transimpedancia.

En la siguiente Figura 14 observamos el funcionamiento de este filtro, el cual se observa cómo la transmisión de la luz disminuye progresivamente conforme aumenta la densidad del filtro.



Figura 14: Filtro de densidad neutra y su funcionamiento.

Los filtros de Paso Largo (Long-Pass) son elementos ópticos que transmite longitudes de onda mayores que una longitud de corte λ_c y bloquea las menores. Idealmente su funcionamiento de transmitancia espectral puede expresarse como:

$$T(\lambda) = \begin{cases} 0, & \lambda < \lambda_c \\ 1, & \lambda > \lambda_c \end{cases}$$

En la práctica, la transición no es abrupta si no progresiva, caracterizada por una pendiente espectral finita y una región de transición.

Los filtros de paso largo pueden fabricarse mediante:

- Recubrimientos dieléctricos multicapa (interferencia óptica),
- Materiales absorbentes selectivos.

Su función principal en sistemas espectroscópicos es:

- Eliminar la radiación parásita.

- Reducir interferencia espectral no deseada.
- Mejorar la relación señal-ruido.

En configuraciones con múltiples fuentes discretas, la incorporación de filtros de corte espectral permite limitar la detección a regiones específicas del espectro, reduciendo contribuciones de luz ambiental o reflexiones internas no deseadas.

En este proyecto se utilizó el filtro pasa bajas (Longpass 550nm) El cual es un cristal óptico naranja que nos da un paso largo de 550 nm. El cual se muestra en la siguiente figura.

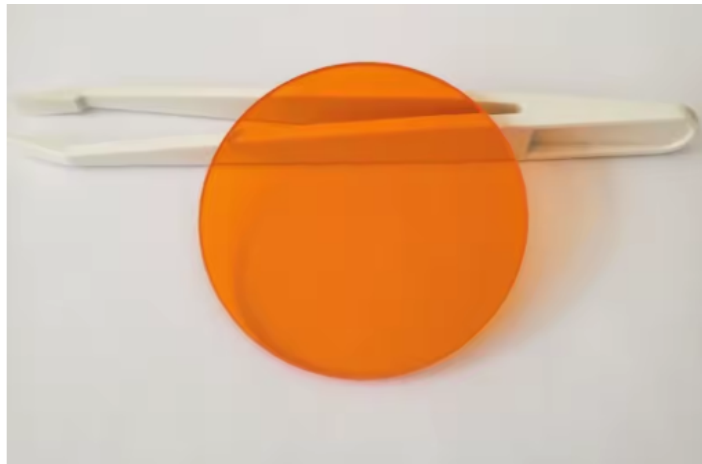


Figura 15: Filtro Longpass 550nm.

En lo cual en su hoja de datos, tenemos su principio de funcionamiento el cual permite un corte en los 550 nm. A continuación se muestra en la siguiente figura [16](#) el comportamiento del filtro LongPass con la gráfica de medición proporcionada por su fabricante.

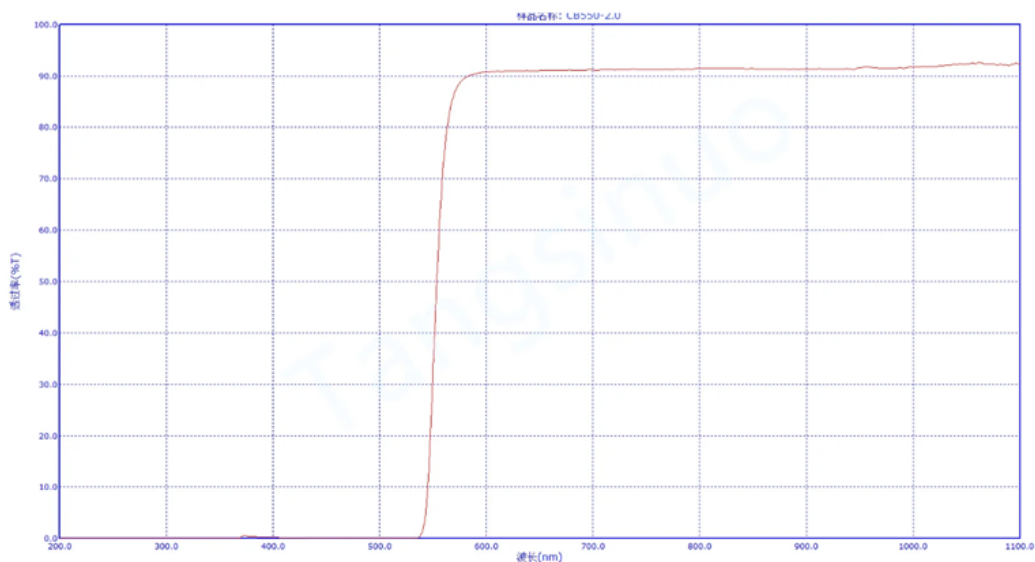


Figura 16: Gráfica de funcionamiento del Longpass

En este trabajo este filtro Longpass LP550 se situó entre la muestra y el fotodetector en configuración de 90° para eliminar selectivamente la radiación de excitación a 532 nm mientras la transmitancia la fluorescencia emitida a longitudes de onda superiores a 550nm con esto asegurando que la señal detectada correspondiera únicamente a emisión fluorescente para su correcta medición

En un esquema más simple el filtro antes de la muestra → No hay excitación → Cero fluorescencia → El sensor solamente mide ruido.

Filtro DESPUÉS de la muestra: El láser excita el café → Hay fluorescencia → El filtro bloquea el láser residual → Sensor mide solo fluorescencia.

3.6 Fundamentos del Láser

La palabra LÁSER por sus siglas en inglés proviene del acrónimo Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation y se describe como una herramienta o dispositivo capaz de generar radiación electromagnética coherente mediante el fenómeno de emisión estimulada, propuesto teóricamente por Einstein en 1917. A diferencia de las fuentes ópticas convencionales de banda ancha, los láseres producen radiación altamente monocromática,

coherente y direccional [15].

Algunas características del láser son: intensidad alta, puede atravesar extensas distancias como un delgado hilo luminoso de un solo color(monocromática) y la luz que emite el instrumento es coherente, es decir, los fotones salen de la fuente de luz en fase continua [37]. En la Figura 17 observaremos diferentes láseres con distintas longitudes de onda, al igual que con diferente potencia lo cual hace ver a unos mas intensos en su haz que otros.

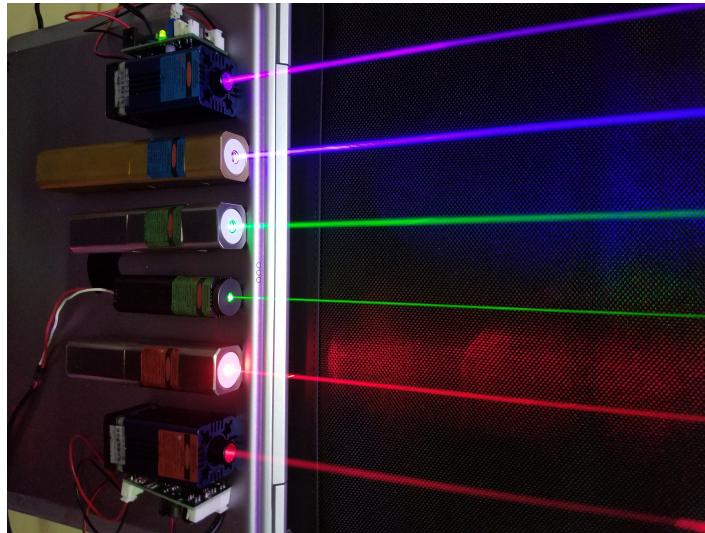


Figura 17: Láseres y su haz de luz monocromática.

El principio físico del funcionamiento del láser se basa en tres procesos fundamentales en la interacción radiación-materia:

1. Absorción: un fotón incidente eleva un electrón desde un nivel energético inferior E_1 a uno superior E_2 .
2. Emisión espontánea: el electrón excitado regresa al estado base emitiendo un fotón en dirección y fase aleatoria.
3. Emisión estimulada: un fotón incidente la transición del electrón excitado, generando un segundo fotón con:
 - Igual energía,

- Misma fase,
- Misma dirección,
- Misma frecuencia.

Esta emisión estimulada es el mecanismo que permite la amplificación coherente de la radiación.

Para que este proceso domine sobre la absorción es necesario alcanzar una inversión de población, condición en la cual el número de partículas en el estado excitado es mayor que en el estado fundamental:

$$N_2 > N_1$$

Esta condición se logra mediante el mecanismo de bombeo (óptico o eléctrico). En los diodos láser utilizados en esta investigación, en el bombeo se realiza eléctricamente mediante la inyección de corriente en una unión de semiconductor tipo p-n.

El sistema láser incluye además una cavidad resonante óptica, generalmente formada por dos espejos paralelos, que permite la retroalimentación de la radiación y favorece la amplificación selectiva de modos longitudinales específicos.

La principales características de la radiación láser son:

- Alta monocromaticidad (ancho espectral estrecho)
- Alta coherencia temporal y espacial
- Alta direccionalidad (baja divergencia angular)
- Alta densidad de potencia

En la Figura 18 observamos el funcionamiento interno de un láser para la concentración de la luz y su emisión estimulada. Con lo cual tenemos los espejos internos, los medios de energía, espejos reflectores y su posterior salida de láser.

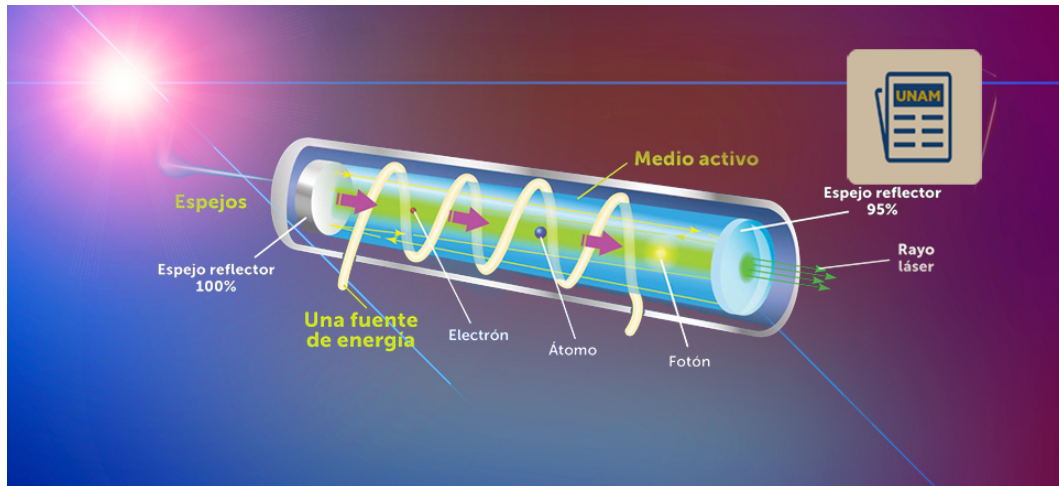


Figura 18: Esquema de funcionamiento de un láser.

Estas propiedades resultan ventajosas en aplicaciones espectroscópicas basadas en longitudes de onda discretas, ya que eliminan la necesidad de monocromadores mecánicos y mejoran la relación señal-ruido del sistema de medición [15].

3.7 Propagación del haz láser en medios absorbentes

La propagación de un haz láser en un medio material pueden describirse considerando tanto su perfil espacial como los fenómenos de absorción y dispersión que ocurren durante la interacción con la muestra.

En la mayoría de los sistemas ópticos prácticos, el haz emitido por un láser presenta un perfil aproximadamente gaussiano, cuya distribución de intensidad transversal se expresa como:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right)$$

donde:

- r es la coordenada radial,
- w es el radio del haz (radio a $1/e^2$),

- I_0 es la intensidad máxima en el eje central.

A medida que el haz se propaga, experimenta una ligera divergencia angular determinada por:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Donde w_0 es el radio del haz en la cintura (waist) y λ la longitud de onda [38].

Cuando el haz atraviesa un medio absorbente homogéneo, la intensidad decae exponencialmente según:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

donde: z es la distancia recorrida dentro del medio, α es el coeficiente de absorción lineal.

En el caso específico de infusiones de café, la atenuación no depende únicamente de la absorción molecular, sino que pueda verse afectada por dispersión inducida por partículas coloidales. Sin embargo, el uso de radiación láser monocromática permite reducir la incertidumbre asociada al ancho espectral de fuentes de banda ancha, favoreciendo una modelación más precisa de la interacción óptica.

Además debido a la alta direccionalidad del haz láser, la geometría óptica del sistema (alineación fuente-muestra-detector) influye directamente en la estabilidad de la señal medida, lo que hace necesario un control mecánico adecuado del trayecto óptico.

En sistemas espectrofotométricos basados en diodos láser discretos, la propagación controlada del haz a través de una celda de vidrio de longitud óptica conocida permite aplicar directamente el modelo de Beer-Lambert bajo condiciones cercanas al comportamiento ideal [38].

3.8 Fotodetección

La fotodetección constituye la etapa de conversión de la señal óptica en una señal eléctrica medible, permitiendo cuantificar la radiación transmitida o reflejada por la muestra. En sistemas espectrofotométricos, el detector debe presentar alta sensibilidad, bajo ruido y respuesta espectral compatible con la longitud de onda de operación 15.

El dispositivo más común en instrumentación óptica es el fotodiodo, el cual se opera bajo el principio del efecto fotoeléctrico. Cuando un fotón con energía suficiente incide sobre el material semiconductor, se genera un par electrón-hueco. Si el dispositivo se encuentra polarizado en inversa, el campo eléctrico interno separa estas cargas, produciendo una corriente proporcional a la potencia óptica incidente.

La relación entre la corriente fotogenerada I_{ph} y la potencia óptica incidente P_{out} se expresa como:

$$I_{ph} = R(\lambda) P_{opt}$$

donde :

- $R(\lambda)$ es la responsividad espectral del detector (A/W),
- λ es la longitud de onda de operación.

La responsividad depende del material semiconductor y de la eficiencia cuántica n , definida como la fracción de fotones incidentes que generan pares electrón-hueco. La relación teórica puede expresarse como:

$$R(\lambda) = \frac{\eta q}{h\nu}$$

donde :

- q es la carga elemental,
- h la constante de Plank,
- ν la frecuencia de la radiación.

En aplicaciones como la medición de infusiones de café mediante láseres discretos, la selección del fotodiodo debe considerar:

- Compatibilidad espectral con las longitudes de onda empleadas.
- Bajo ruido de corriente oscura.

- Estabilidad térmica.
- Respuesta lineal en el rango dinámico de operación.

El comportamiento lineal es importante para darle validez del modelo basado en la Ley de Beer-Lambert [15].

Con lo anterior se eligió el fotodiodo BPW34 (silicon PIN) dado que utiliza diodos láser comerciales dentro del visible/NIR, se seleccionó un fotodiodo PIN con sensibilidad espectral compatible y un área activa suficiente para el acoplamiento óptico. En la Figura 19 observamos el fotodiodo BPW34.



Figura 19: Fotodiodo BPW34.

Es un fotodiodo tipo PIN sensible a radiación visible y NIR, con un rango espectral típico reportado de 430 a 1100 nm y un área fotosensible de aproximadamente de 7.5 mm^2 , lo cual favorece la captación de la luz y reduce requerimientos estrictos de alineación óptica en arreglos compactos [39]. Además el BPW34 presenta un ángulo de media sensibilidad amplio ($\pm 65^\circ$), lo que incrementa tolerancias mecánicas del sistema óptico.

Para la instrumentación electrónica el datasheet reporta una corriente de oscuridad típica baja (orden de nA bajo condiciones de prueba) y capacitancias de unión que dependen del sesgo

inverso, variables que influyen directamente en el diseño del amplificador de transimpedancia (TIA), el ancho de banda y el ruido del sistema.

3.9 Amplificador de Transimpedancia

La corriente fotogenerada por el fotodiodo suele ser de muy baja magnitud (microamperios o nanoamperios), por lo que requiere un circuito de acondicionamiento que permita su conversión a una señal de voltaje utilizable. El circuito más empleado en este tipo de aplicaciones es el amplificador de transimpedancia (TIA), el cual convierte en voltaje mediante una resistencia de retroalimentación [18]. En la siguiente Figura 20 veremos el diagrama general del circuito de transimpedancia.

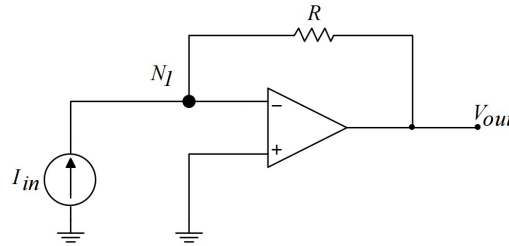


Figura 20: Diagrama general de un circuito de Transimpedancia.

El esquema básico consiste en un amplificador operacional configurado en modo inversor, donde el fotodiodo se conecta a una entrada inversora. La relación de salida viene dada por:

$$V_{out} = -I_{ph}R_f$$

donde:

- R_f es la resistencia de retroalimentación,
- I_{ph} es la corriente fotogenerada.

Este diseño presenta varias ventajas:

- Conversión lineal corriente-voltaje.

- Alta sensibilidad.
- AAmplio rango dinámico.
- Bajo efecto de la capacitancia en el fotodiodo.

El ruido total determina la relación señal-ruido(SNR) del sistema, parámetro crítico en la medición de pequeñas variaciones de absorbancia asociadas a diferencias en el grado de tostado.

En sistemas basados en fuentes láser discretas, el uso de TIA adecuadamente, maximiza la sensibilidad del sistema, garantizando estabilidad y repetibilidad en la adquisición de datos.

En nuestro caso para el TIA, se hizo la implementación mediante amplificadores operacionales configurados en modo inversor. Entre las características deseables del amplificador se encuentran

- Bajo voltaje de offset,
- Baja corriente de polarización de entrada,
- Estabilidad con alimentación simple,
- Operación en bajo consumo.

El LM358 es un amplificador operacional de propósito general ampliamente utilizado en sus aplicaciones de instrumentación debido a su capacidad de operar con fuente simple (simple supply) y su compatibilidad con niveles lógicos típicos de sistemas embebidos.

En configuración de transimpedancia, el fotodiodo se conecta a la entrada inversora del amplificador, mientras que la resistencia de retroalimentación R_f determina la ganancia corriente-voltaje:

$$V_{out} = -I_{ph}R_f \quad (3.9)$$

La selección de R_f depende de la magnitud esperada de la corriente fotogenerada. Si el fotodiodo produce corrientes del orden de microamperios, resistencias en el rango de kilo

ohmios a megaphomios permiten obtener niveles de voltaje adecuados para la etapa de digitalización [40].

Sin embargo, el desempeño del circuito está limitado por factores como:

- Ancho de banda del amplificador,
- Ruido térmico asociado a Rf ,
- Corriente de polarización del operacional,
- Capacitancia del fotodiodo.

En la Figura 21 veremos el diagrama del LM358, al igual que su PINOUT para su correcto uso.

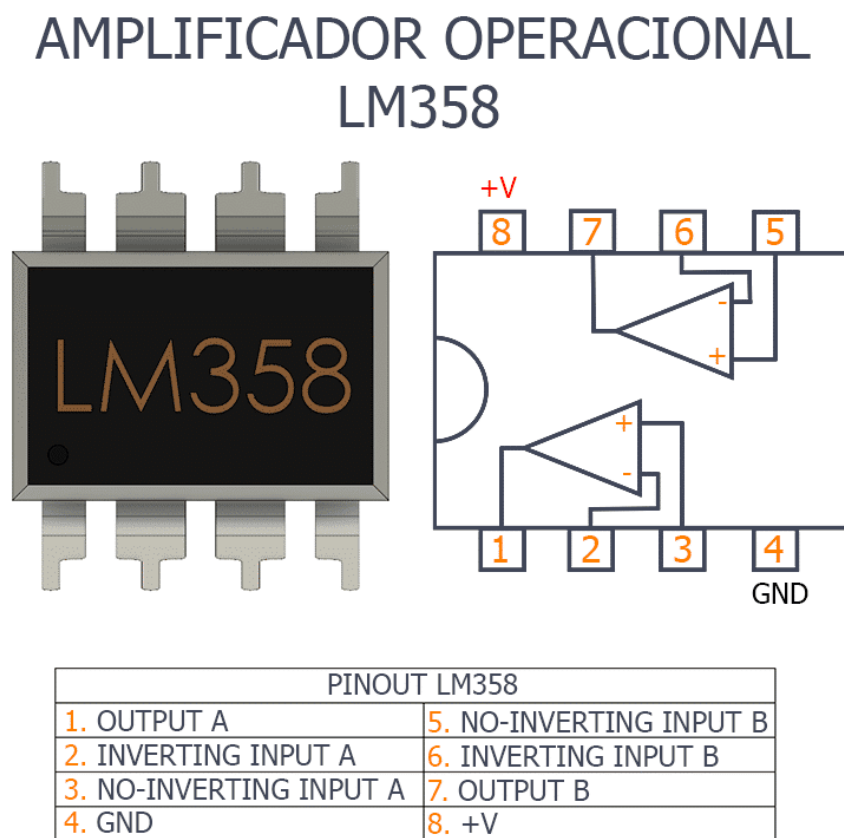


Figura 21: Amplificador Operacional LM358.

En aplicaciones de medición óptica de baja frecuencia, como la presente en evaluaciones de grado de tostado, el ancho de banda requerido es reducido, lo que permite emplear amplificadores operacionales de propósito general sin comprometer la estabilidad del sistema.

3.10 Sistemas de Captura Óptica y Adquisición Digital

En sistemas modernos de instrumentación óptica, la medición no se limita únicamente a la conversión analógica de la señal luminosa, sino que incorpora etapas de adquisición, digitalización y procesamiento computacional. Los sistemas embebidos desempeñan un papel fundamental al integrar capacidades de control, almacenamiento y análisis de datos dentro de una plataforma compacta.

Un sistema embebido se define como un sistema computacional dedicado, diseñado para ejecutar funciones específicas dentro de un sistema mayor. A diferencia de una computadora de propósito general, un sistema embebido está optimizado para tareas concretas, como adquisición de datos, control de dispositivos y procesamiento digital de señales [41].

La Raspberry Pi como plataforma de adquisición, es una herramienta muy útil en estos aspectos de sistemas embebidos, debido a que es una computadora de placa única (Single Board Computer, SBC) basada en arquitectura ARM, que integra procesador, memoria RAM, interfaces de comunicación y sistema operativo en una plataforma compacta y de bajo consumo energético. A diferencia de los microcontroladores tradicionales, la Raspberry Pi ejecuta un sistema operativo basado en Linux, lo que permite:

- Procesamiento de datos en tiempo real.
- Implementación de algoritmos quimiométricos.
- Interfaz gráfica de usuario.
- Almacenamiento estructurado de datos experimentales.

Entre sus interfaces relevantes para instrumentación óptica destacan:

- GPIO (General Purpose Input/Output)

- I2C
- SPI
- CSI(Camera Serial Interface)

En la Figura 22 observaremos el esquema de pines de GPIO de la Raspberry Pi 4.

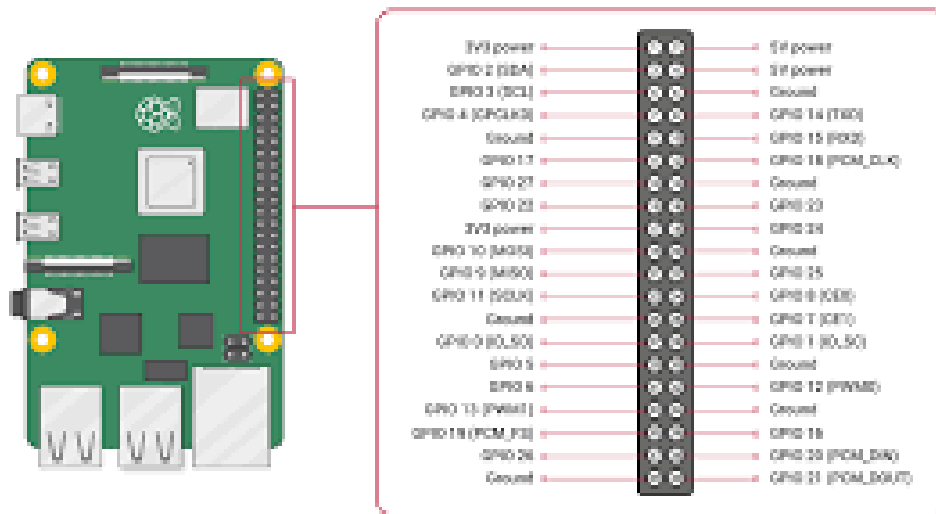


Figura 22: Esquema de Pines GPIO Raspberry Pi 4.

La interfaz CSI nos permite la conexión directa con módulos de cámara compatibles, facilitando la adquisición digital de imágenes con alta velocidad de transferencia. En el sistema desarrollado, la Raspberry Pi actúa como unidad central de adquisición y procesamiento, recibiendo datos provenientes de sensores ópticos y ejecutando algoritmos de análisis multivariable [42].

En este sistema se implementa la Raspberry PI 4, la cual sus especificaciones técnicas son:

Unidad Central de Procesamiento (CPU): Cuatro núcleos ARM Cortex-A72 de 64 bits, integrados en el Sistema en un Chip (SoC) Broadcom BCM2711. La frecuencia de reloj base es de 1.5 GHz, aunque revisiones posteriores del chip (stepping C0) alcanzan los 1.8 GHz.

Esta configuración ofrece un rendimiento computacional entre 2 y 4 veces superior al de la

Raspberry Pi 3B+. Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU): VideoCore VI operando a 500 MHz. Es compatible con las API gráficas OpenGL ES 3.x y Vulkan 1.2, e integra capacidades avanzadas de decodificación de video por hardware, incluyendo H.265 (4K a 60 fps) y H.264 (1080p a 60 fps). Memoria (RAM): Utiliza memoria LPDDR4 SDRAM a una velocidad de hasta 3.2 GHz.

Se comercializa en variantes de 1 GB, 2 GB, 4 GB y 8 GB, lo que permite seleccionar el modelo adecuado según la complejidad de la aplicación. A diferencia de modelos anteriores, la asignación de memoria para la GPU es dinámica.

Almacenamiento Principal: Una ranura para tarjeta MicroSD para el sistema operativo y el almacenamiento de datos.

También cuenta con dos puertos USB 3.0 y dos puertos USB 2.0.

En su salida de video y multimedia cuenta con dos puertos micro-HDMI, capaces de manejar dos monitores en configuraciones extendidas o espejeadas, al igual soporta una resolución en 4K a 60 fps en un monitor o dos monitores a 4K 30Hz.

En cuestión de dimensiones, mantiene el factor de forma compacto clásico, con unas dimensiones aproximadas de 85.6 mm x 56.5mm. En la siguiente imagen [23](#) observaremos una Raspberry Pi 4, la cual se usará para este proyecto.



Figura 23: Raspberry Pi 4.

En la parte del sensor CMOS Y Cámara Raspberry Pi (Pi Cam) La cámara Raspberry Pi (Pi

Cam) emplea un sensor CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) como elemento fotosensible. Los sensores CMOS funcionan mediante una matriz bidimensional de píxeles, donde cada píxel contiene un fotodiodo que convierte la radiación luminosa incidente en carga eléctrica [43]. Cuando la haz incide sobre el sensor, los fotones generan pares electrón-hueco en cada píxel. La carga acumulada es posteriormente convertida a un valor digital mediante convertidores analógico-digitales integrados en el sensor.

La intensidad luminosa capturada puede representarse como una matriz:

$$I(x, y)$$

donde x y y representan las coordenadas espaciales del píxel.

En sensores a color, se emplea un filtro tipo Bayer que permite obtener componentes RGB. Matemáticamente la imagen puede representarse como:

$$I(x, y) = [R(x, y), G(x, y), B(x, y)]$$

En aplicaciones espectroscópicas discretas, la información puede simplificarse extrayendo:

- Intensidad promedio de una región de interés (ROI),
- Histogramas de intensidad,
- Conversión a escala de grises

La señal resultante puede expresarse como:

$$D = f(P_{\text{opt}})$$

donde D es el valor digital del píxel y P_{opt} la potencia óptica incidente [44]. En la siguiente Figura 24 se mostrará la Pi Cam IR, el cual viene acompañada de dos diodos para iluminación, el cual nosotros no vamos a ocupar ya que solamente ocupamos que capture las imágenes con el respectivo filtro que tiene integrado.

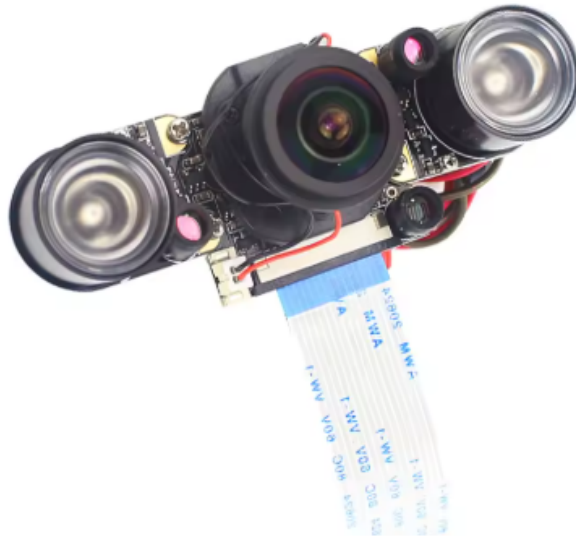


Figura 24: Cámara IR (Pi Cam IR).

La incorporación de un sistema de captura basado en cámara introduce una etapa adicional al modelo clásico de fotodetección, con el cual del mismo modo permite tener posibles relaciones entre las mediciones con los sensores y las imágenes obtenidas.

En este mismo proyecto se utilizó otra plataforma de adquisición basada en Arduino UNO, esta se empleó como unidad de adquisición de datos. El Arduino UNO es una plataforma de hardware abierto basada en el microcontrolador ATmega328P, que integra entradas analógicas con convertidor analógico-digital(ADC) de 10 bits y frecuencia de muestreo configurable [45]. En la siguiente Figura 25 se muestra el Arduino Uno con sus respectivos Pinout, especificaciones y sus configuraciones.

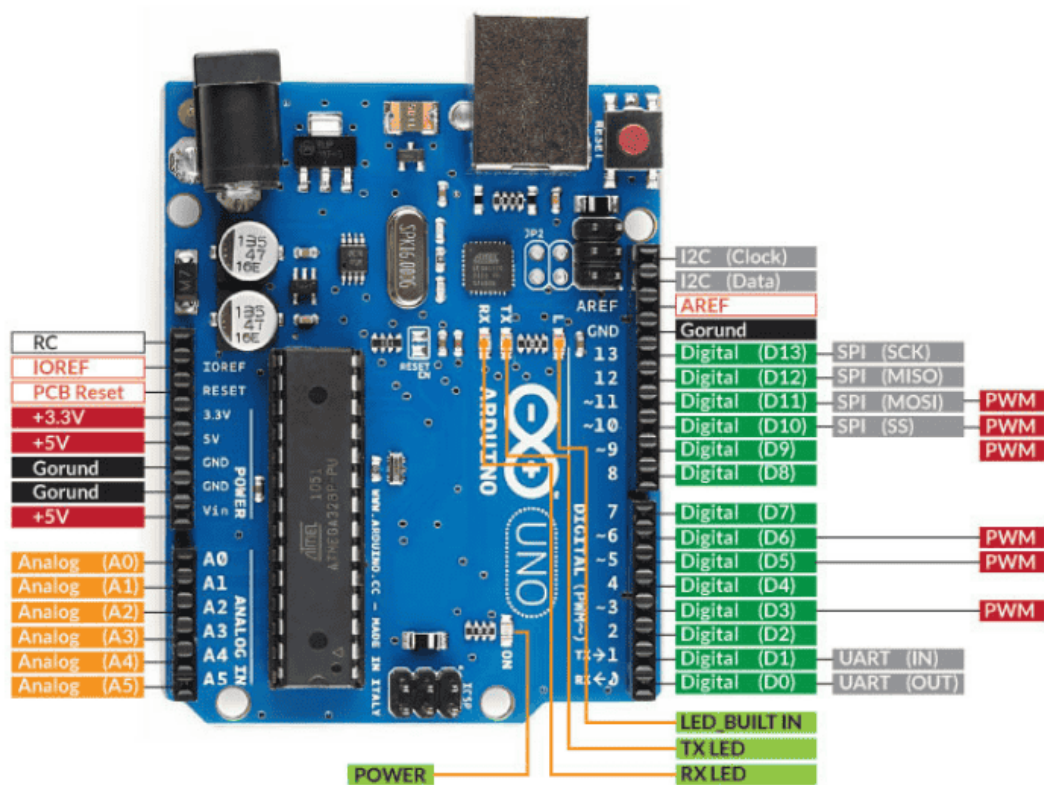


Figura 25: Arduino UNO y sus especificaciones.

El fotodiodo BPW34 genera una corriente proporcional a la potencia óptica incidente. Dado que el Arduino no puede medir directamente corriente, fue necesario implementar una etapa previa de conversión mediante un amplificador de transimpedancia, transformando la corriente fotogenerada en un voltaje compatible con el rango de entrada analógica (0-5 V).

La señal digitalizada por el ADC puede expresarse como:

$$D = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times 1023 \quad (3.10)$$

donde

- V_{in} es el voltaje proveniente del TIA,
- V_{ref} es el voltaje de referencia del ADC,

- 1023 corresponde a la resolución de 10 bits.

Para la visualización y almacenamiento de datos, el Arduino transmitía la información vía comunicación serial (UART) hacia un entorno de procesamiento en computadora, utilizando el software Processing. Este entorno permitió:

- Visualización en tiempo óptimo de la señal.
- Almacenamiento estructurado de datos.
- Implementación preliminar de análisis gráfico.

Sin embargo, esta arquitectura presentaba limitaciones:

- Resolución limitada del ADC (10 bits).
- Dependencia de una computadora externa.
- Capacidad reducida de procesamiento local.
- Limitada implementación de algoritmos multivariados complejos.

3.11 Fundamentos de Análisis Quimiométricos

La quimiometría es el conjunto de métodos matemáticos y estadísticos aplicados al análisis de datos químicos complejos, particularmente aquellos derivados de técnicas espectroscópicas. En sistemas de medición óptica, como el espectrofotómetro desarrollado en esta investigación, las señales obtenidas en distintas longitudes de onda constituyen un conjunto multivariante que requiere herramientas analíticas para extraer información relevante [22, 46]. En términos generales, si el sistema utiliza n longitudes de onda discretas, cada muestra puede representarse como un vector:

$$x = [A_1, A_2, \dots, A_n]$$

donde A_i corresponde a la absorbancia medida en la longitud de onda λ_i

Al analizar múltiples muestras, se construye una matriz de datos:

$$X_{m \times n}$$

donde m es el número de muestras y n el número de variables espectrales.

Hay técnicas de espectroscopía aplicada en alimentos las cuales las mas utilizadas son: Analisis de Componentes Principales (PCA). El PCA es un método no supervisado que reduce la dimensionalidad del conjunto de datos transformando las variables originales en combinaciones lineales denominadas componentes principales.

Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS) Cuando el objetivo es predecir una variable dependiente (por ejemplo, nivel de tostado o parámetro fisicoquímico), se emplea PLS, que modela la relación entre la matriz espectral X y una variable respuesta Y :

$$y = Xb + \varepsilon$$

donde: b es el vector de coeficientes, E residual.

Estas técnicas permiten correlacionar mediciones ópticas discretas con atributos del tostado, incluso cuando las relaciones no son estrictamente lineales.

3.12 Proceso Fisicoquímico del Tostado

El tostado del café es un proceso térmico complejo que induce transformaciones químicas y estructurales profundas en el grano verde. Durante el calentamiento (aproximadamente entre 180 °C y 240 °C), ocurren múltiples reacciones simultáneas que modifican la composición molecular del grano [23, 47].

Entre los procesos más relevantes destacan:

- Reacciones de Millard, que son interacciones de azúcares reductores y aminoácidos que generan compuestos intermedios y polímeros complejos, denominados melanoidinas, responsables del color marrón característico.
- Caramelización, Descomposición térmica de azúcares, contribuyendo al desarrollo de color y aroma.

- Degradación de ácidos clorogénicos, Estos compuestos fenólicos disminuyen con el incremento del tostado, afectando la acidez y el perfil antioxidante.
- Formación de compuestos volátiles, Se generan aldehídos, cetonas, pirazinas y otros compuestos responsables del aroma.

Desde un punto de vista óptico, el aumento del grado de tostado implica:

Mayor formación de cromóforos. Incremento de estructuras conjugadas. Modificación de espectro de absorción en la región visible. Esto explica por qué la absorbancia de la infusión varía sistemáticamente con el nivel de desarrollo térmico, permitiendo su evaluación mediante técnicas espectrofotométricas.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología empleada para el desarrollo del proyecto, así como su desarrollo.

El propósito de este proyecto es la evaluación del grado de tostado del café diseñando un espectrofotómetro de longitudes de ondas discretas basado en diodos láser. Para alcanzar el objetivo principal se estableció una serie de etapas metodológicas, las cuales se describen la siguiente tabla:

Fases	Actividades
Recopilación de información	Búsqueda de información acerca de espectroscopia y óptica.
	Búsqueda de información acerca de la evaluación del tostado de café y evaluaciones con técnicas espectroscópicas
Integración y selección de los componentes	Búsqueda de componentes ópticos, mecánicos, electrónicos en el mercado que se puedan integrar al diseño
	Buscar diodos láseres monocromáticos fiables para hacer uso en nuestro sistema
Diseño y construcción del prototipo 1	Diseño del chasis en software de diseño.
	Manufacturar el prototipo.
	Integración de los componentes electrónicos, ópticos, mecánicos para probar su funcionamiento.
Análisis de fallas del prototipo 1	Hacer pruebas con el prototipo 1.
	Evaluación del diseño y resultados para su posterior análisis de resultados y determinar si fueron resultados favorables.
	Análisis y hacer retroalimentación de mejoras en el próximo diseño al igual que su selección de componentes a mejorar.
Propuesta de diseño del prototipo 2	Diseño del chasis y dimensiones del prototipo con herramientas CAD.
	Selección de fuentes emisoras de luz.
	Pruebas del diseño contra la radiación IR

Tabla 1: Fases y actividades del desarrollo del sistema.

Fases	Actividades
Diseño electrónico y diseño de la interfaz de medición	Integración del fotodiodo de medición con el circuito de Transimpedancia.
	Integración del Arduino UNO para su lectura de datos y visualización en una interfaz gráfica.
	Pruebas de funcionamiento.
Diseño e integración del sensor óptico para la captura de imágenes	Desarrollo de la interfaz para la captura de imágenes.
	Diseño de base para su correcto funcionamiento y posicionamiento de la Pi Cam.
	Pruebas de funcionamiento e integración al prototipo.
Metodología para la preparación de muestras	Seleccionar los recipientes de medición.
	Clasificar los tostados claro, medio, oscuro.
	Hacer los cálculos para los volúmenes de dilución y su preparación.
Fase de experimentación	Uso de equipo de protección para la experimentación.
	Toma de muestras y preparación.
	Etapas de medición con los tres láseres verde, rojo e IR al igual que su respectiva captura de imágenes.
Obtención de resultados y su posterior análisis e interpretación	Guardar los resultados en voltaje al igual que las imágenes obtenidas.
	Ordenar y clasificar los resultados.
	Análisis estadístico para obtener conclusiones,

Tabla 2: Fases y actividades del desarrollo del sistema.

Como bien se mencionó anteriormente, en lo que fueron los capítulos de Estado del Arte, pudimos saber por la literatura que es posible el desarrollo de nuestro espectrofotómetro de longitudes de onda discretas basado en diodos láser para la evaluación del grado de tostado de café con técnicas de espectroscopía y óptica, combinado con la electrónica podemos tener un producto funcional.

Con lo anteriormente mencionado, se presentará la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de este proyecto, incluyendo los prototipos que no funcionaron, pero que cabe destacar dieron parámetros para saber cómo llegar a un producto final, el cual fuera funcional con las herramientas a nuestro alcance.

4.1 Integración y selección de componentes

En este primer prototipo se planteó el desarrollo de un espectrofotómetro, basado en diodos emisores de luz infrarroja (LEDs IR). El sistema fue concebido de manera que los emisores se posicionaran en una posición lineal permitiendo incidir en un punto el cual con ayuda de un Optical Encoder permitiría modular el haz luminoso mediante la generación de pulsos, con esto se tendría menos energía a la muestra, para posteriormente con el sensor óptico se realizaría la captura de imágenes de las infusiones para su posterior análisis. Las muestras serían colocada en una celda o cubeta de cuarzo. En la Figura 26 se muestra ilustrativa mente el funcionamiento del Optical Encoder, con el cual basamos el funcionamiento de este primer prototipo.

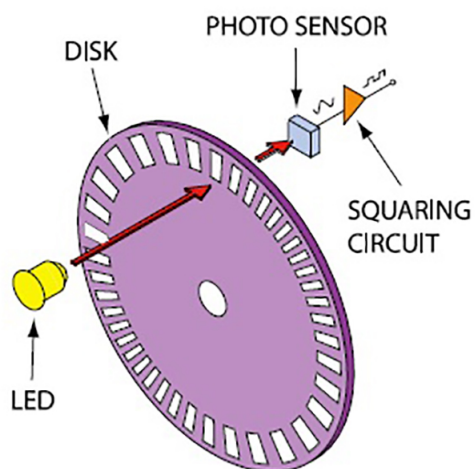


Figura 26: Funcionamiento ilustrativo de un Optical Encoder.

Con este principio de funcionamiento se seleccionaron tres diodos IR los cuales eran el SFH4545 (940nm), el TSAL6100 (850nm), CQY37N (810nm).

El TSAL6100 tiene un calentamiento suave de (30° - 50°), es ideal para muestras pequeñas si su tiempo de exposición es de 10-30 segundos.



Figura 27: TSAL6100.

El SFH4545 es ideal para muestras mas grandes de (30-50ml) su calentamiento es moderado de (40° - 60°) mientras su tiempo de exposición sea de 15-40 segundos.



Figura 28: SFH4545.

El CQY37N tenía mas riesgo de calentamiento, por lo tanto su exposición debía ser de 5-15 segundos, su calentamiento llegaba a (50° - 70°), por lo cual se debía tener mayor precaución.



Figura 29: CQY37N.

Estos diodos se hicieron para colocarse a 90° , en una ranura de manera que estuvieran alineados que incidieran justo al centro de la muestra, el cual su haz de luz fuera cortado por el optical encoder, para posteriormente tener una imagen de la infusión de café con la interacción de la muestra.

4.2 Diseño y construcción del prototipo 1

Una vez seleccionados los componentes necesarios, se procedió al desarrollo del prototipo. El cual las dimensiones fueron determinadas mediante mediciones realizadas con un calibrador

vernier. Estas piezas se pasaron de manera digital para que todas las piezas estuvieran en su lugar y se asegurara la precisión en el momento de la interacción del haz de luz incidente en el centro de la cubeta de cuarzo.

Con ayuda de herramientas CAD (Diseño Asistido por Computadora) se hizo un prototipo en el software de diseño Fusion360. En las siguientes Figuras 30 31 32 se observa el diseño en Fusion 360 con diferentes vistas.

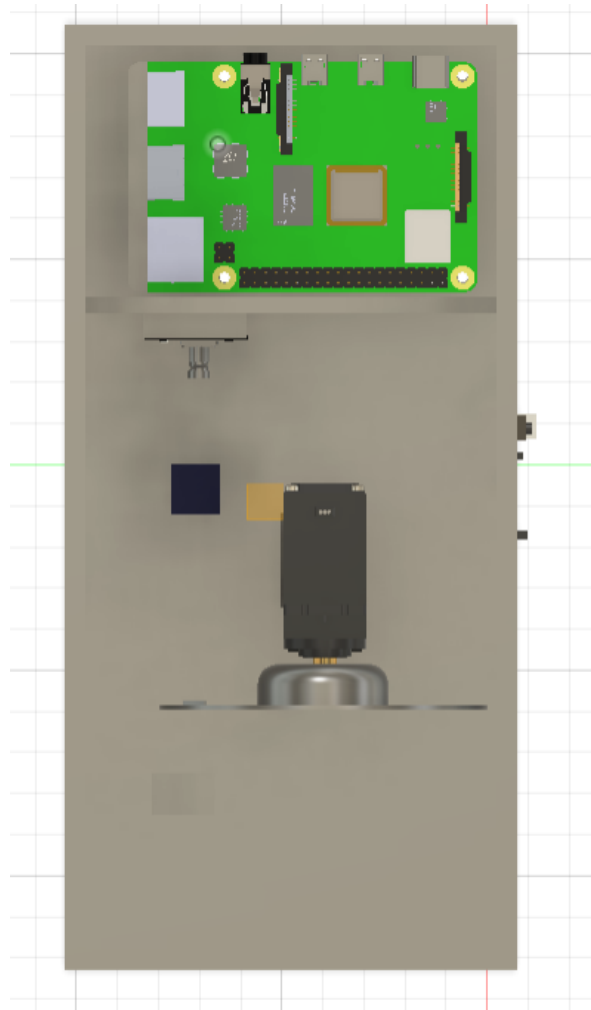


Figura 30: Vista superior del prototipo en Fusion360.

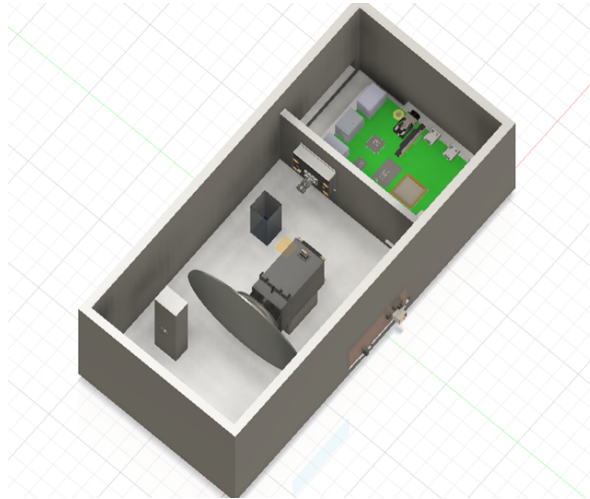


Figura 31: Vista lateral.

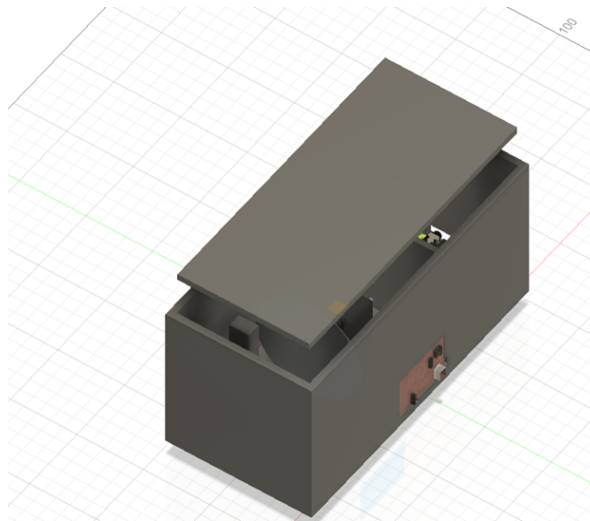


Figura 32: Prototipo en la etapa final de diseño.

Con el chasis y los componentes previamente seleccionados, los cuales fueron una Raspberry Pi 4, un optical encoder el cual funcionaria con un circuito de control de giro con un servomotor 360°, el cual su respectivo circuito de acoplamiento el cual se diseñó para iniciar el giro y tener un botón de paro. Este circuito seria alimentado por la Raspberry Pi a 5 volts, los leds conectados por medio de los pines gpio del la Raspberry, con lo cual al ejecutar el programa se encendería para posteriormente la cámara (PI Cam) lanzara una ráfaga de fotos y capturar la luz incidente en la muestra. Este diseño se hizo en Ultiboard de National Instruments en la

Figura 33 se muestra el diseño.



Figura 33: Diseño de la PCB para el control del Optical Encoder.

Este diseño se hizo con ayuda del software Ultiboard de National Instruments, el cual posteriormente se llevó a su manufactura. Como se muestra en la Figura siguiente 34, posteriormente el circuito diseñado se lleva a la parte de impresión.

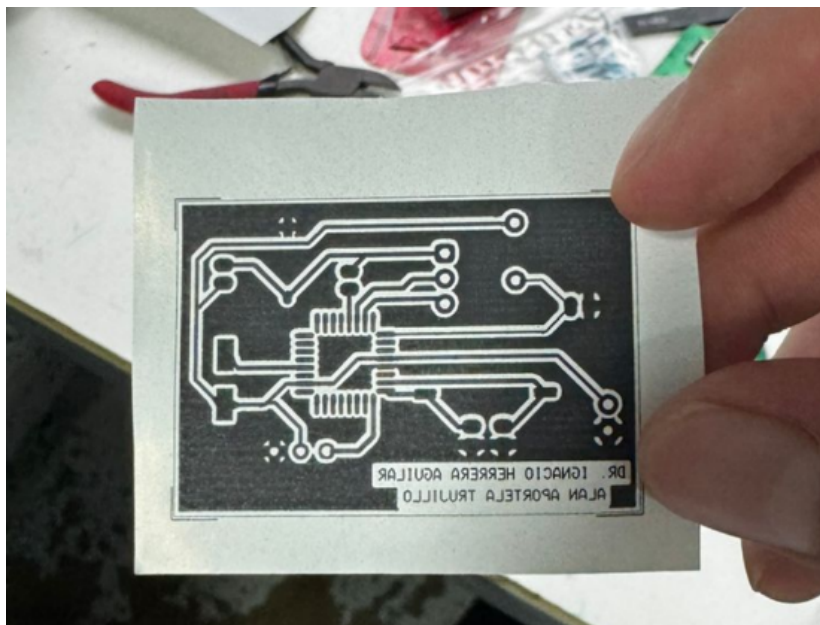


Figura 34: Circuito impreso.

Una vez obtenido el patrón del circuito, se realizó el proceso de su transferencia térmica seguido de su ataque químico para poder obtener nuestro circuito final.

Posteriormente, el chasis del sistema fue fabricado mediante impresión 3D, permitiendo la integración con los componentes ópticos y electrónicos del prototipo.

En nuestra primera impresión nuestro producto final, no tenía la suficiente solidez en las paredes lo cual generaba problemas a la hora de montar la tapa, asimismo generaba inestabilidad al igual de una mala impresión estética.

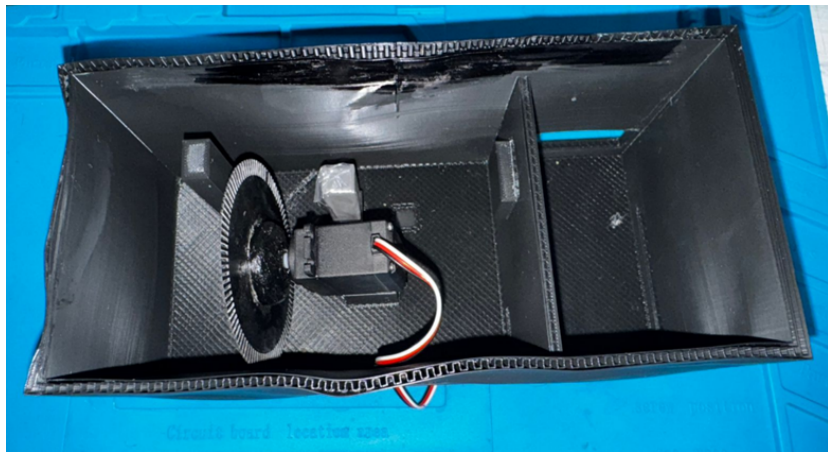


Figura 35: Impresión 3D del prototipo 1 con problemas en la impresión.

Con estos problemas se observó que la solidez en las paredes era nula, con lo cual se optó por aplicar un adhesivo, pero el resultado no fue satisfactorio ya que estéticamente se apreciaba una deformación en las paredes.

Entre todos estos percances se aprovechó para la colocación superficial de los componentes así como verificar que las medidas fueron correctas y no había errores en los cuales al ensamblar no hubiera problemas con los tamaños de los componentes.

Posteriormente el problema fue solucionado mediante una extrusión en las paredes, todo esto fue modificado en la plataforma Fusion360, ya que eso no se había considerado para el relleno de filamento y su posterior solidez y rigidez. Una vez implementada esta modificación se pasó a ensamblar el prototipo 1. En la siguiente imagen [36](#) se muestra el resultado.

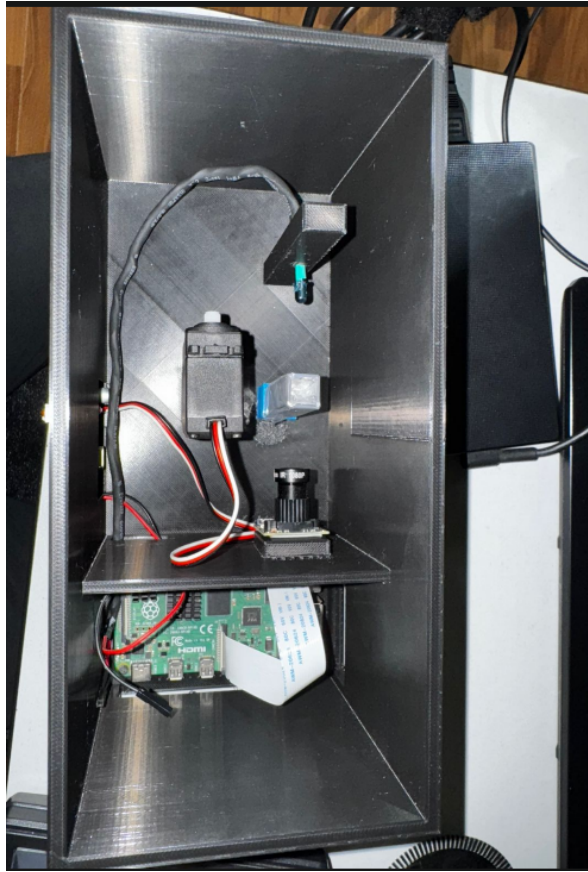


Figura 36: Prototipo 1 ensamblado.

Como se puede observar en la figura anterior el prototipo se corrigieron los problemas de la impresión, posteriormente se procedió al montaje de los componentes para iniciar con pruebas de funcionamiento y captura de imágenes.



Figura 37: Prototipo 1 en funcionamiento.

En esta etapa se realizaron pruebas de funcionamiento, las cuales fueron exitosas, sin embargo los resultados no fueron lo esperado debido a que la cámara entraba en saturación.

Se trató de reducir la intensidad de los LEDs mediante modulación por ancho de pulso (PWM). No obstante, la cámara persistió con los problemas en la captura de imágenes. En la imagen 38 se muestra el resultado de la captura obtenida.



Figura 38: Resultado de la captura de imágenes con el prototipo 1.

Posteriormente en la siguiente imagen 39 se hizo un cambio de Led para ver si cambiaba la saturación lo cual el resultado siguió siendo el mismo.

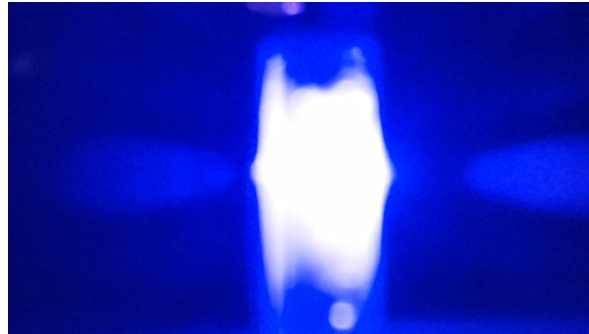


Figura 39: Prueba con diferente LED.

4.3 Análisis de fallas del prototipo 1

Como se observa en las imágenes de los resultados de este prototipo no fueron favorables, debido a que su posicionamiento directo con la cámara se producía una saturación evidente en las imágenes capturadas. Lo que impedía realizar mediciones confiables para verificar nuestras predicciones iniciales eran que al poner la infusión de café esta daría un tipo de filtro el cual atenuaría la luz incidida con lo cual podríamos tener una imagen para su posterior análisis.

Se realizaron modificaciones con el objetivo de obtener de mejorar la captura de imágenes como el bajar la intensidad de los LEDs con PWM, se bajó su potencia máxima hasta un 10 % pero aun así la saturación existía, por lo que se determinó la necesidad de rediseñar el sistema.

Conviene señalar que dio tiempo de corregir las fuentes de luz empleadas debido a que los LEDS al parecer presentaban una intensidad luminosa elevada, no presentaba una adecuada colimación al igual que su luz no era del todo centrada en un punto fijo (foco), lo cual generaba una luz difusa. Se trato de corregir esto con lentes de enfoque pero no se encontraba la estabilidad necesaria debido al diseño del los tipos de LEDs siempre se apreciaba una variación por lo cual nuestra primera propuesta no era del todo correcta, con lo cual se tomo en cuenta todo esto para poder implementar en el prototipo siguiente para no volver a cometer los mismos errores.

Otro problema identificado se muestra en la siguiente foto fue la colocación de la cámara aun

sin luz incidente era muy cercana la distancia entre la relación celda de cuarzo/cámara con lo cual las imágenes no iban a tener el campo de observación deseado.



Figura 40: Posicionamiento de la cámara prototipo 1.

Por último se concluyó que no se podía depender solamente del sensor de imagen el cual podía dar imágenes pero por el tema de la saturación no podíamos depender totalmente de esta forma de medición por lo cual se tenía que pensar en otras técnicas de medición confiables para la obtención de resultados.

4.4 Propuesta de diseño del prototipo 2

En el presente desarrollo se consideraron las limitaciones y fuentes de error identificadas en el Prototipo 1. A partir de este análisis se realizó una retroalimentación del diseño, lo que permitió introducir mejoras orientadas a incrementar la estabilidad, reproducibilidad y desempeño del sistema en el Prototipo 2.

En primer lugar se optó por sustituir las fuentes de iluminación utilizadas en el diseño anterior, seleccionando fuentes que presenten mayor estabilidad y una adecuada concentración del haz en el centro de la muestra. Con base en estos criterios se seleccionaron por algo que estaba en el mercado el cual no requerían modificaciones adicionales en su configuración básica. Estos fueron:

Un láser verde de 532 nm clase III con una potencia de salida de 100 mw.



Figura 41: Láser verde 532 nm Clase III.

Un láser rojo de 650 nm clase III con 100 mw de potencia.



Figura 42: Láser rojo 650 nm Clase III.

Un láser IR con de 808- 1064 nm el cual tuvo que ser modificado para poder tener este espectro debido a que la luz no es visible para el ojo humano es considerado peligroso por la potencia de salida de 100 mw y no están a la venta de manera comercial a cualquier individuo por el daño ocular que pueden ocasionarte.



Figura 43: Láser IR 808-1064 nm Clase III .

Este resultado se logró obtener mediante la modificación del dispositivo cuya tecnología está basada en DPSS (Diode Pumped Solid State), este tipo de láser genera inicialmente radiación infrarroja (típicamente desde los 808 nm y 1064 nm), la cual posteriormente convertida a 532 nm mediante la duplicación de frecuencia y filtrada ópticamente para suprimir componentes infrarrojas residuales.

En el presente trabajo se retiró el filtro de bloqueador del infrarrojo del módulo, permitiendo la emisión de radiación IR residual proveniente del proceso interno del láser. Esta modificación permitió disponer de una fuente adicional en la región infrarroja cercana sin requerir de un diodo láser independiente, lo cual resultó crucial para la evaluación espectral de las muestras de café bajo distintas longitudes de onda discretas.

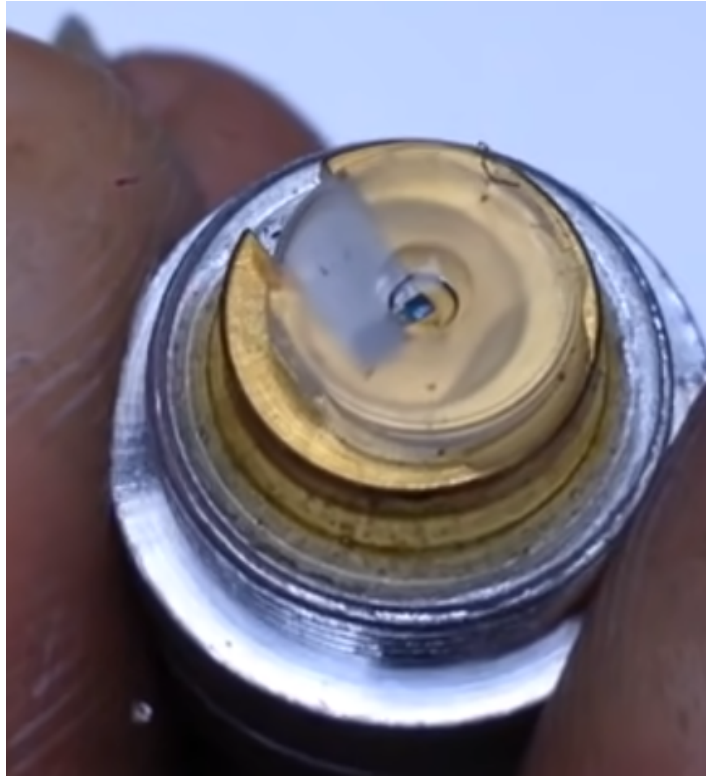


Figura 44: Láser descubierto en el cual se observa la lente expansiva.

Esta lente permite que el haz de luz se expanda antes de pasar a través de una lente colimadora. Una lente colimadora es un componente óptico diseñado para transformar un haz de luz divergente proveniente de una fuente puntual en un conjunto de rayos paralelos, conocido como haz colimado.

Su función principal consiste en dirigir el haz de luz en una dirección específica con mínima dispersión angular, lo cual resulta fundamental en aplicaciones de medición óptica de precisión y en sistemas láser.



Figura 45: Diodo Láser en conjunto con la lente colimadora.

Con base en lo anterior, se procedió a la de modificación del cristal monolítico, dicho de otro modo va a permitir tener la luz incidente del diodo en el espectro IR. El cristal que se retiró es ese pequeño cuadrado de color entre morado/verde el cual va a permitir tener el espectro IR.

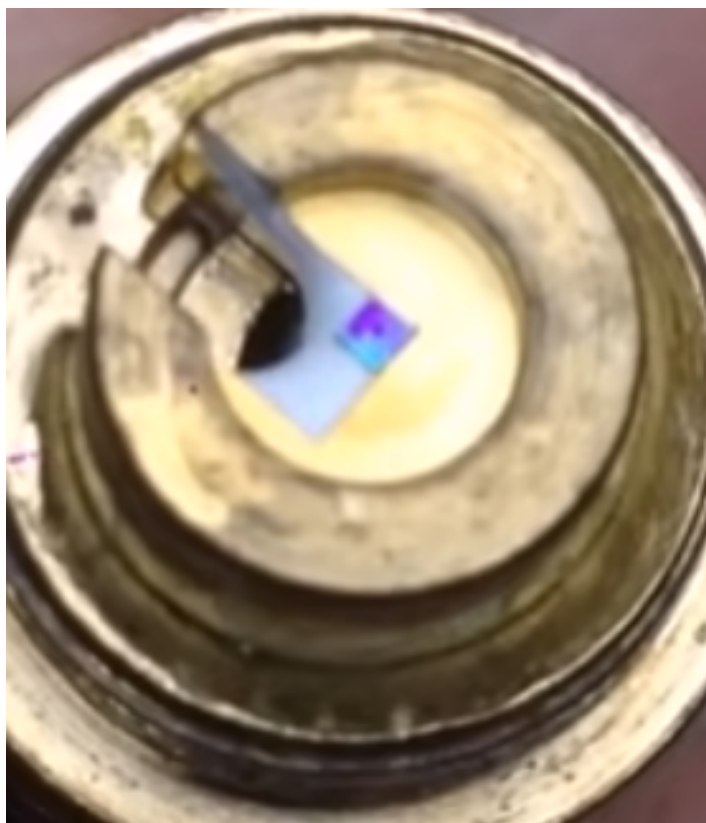


Figura 46: Cristal monolítico que se retiró.

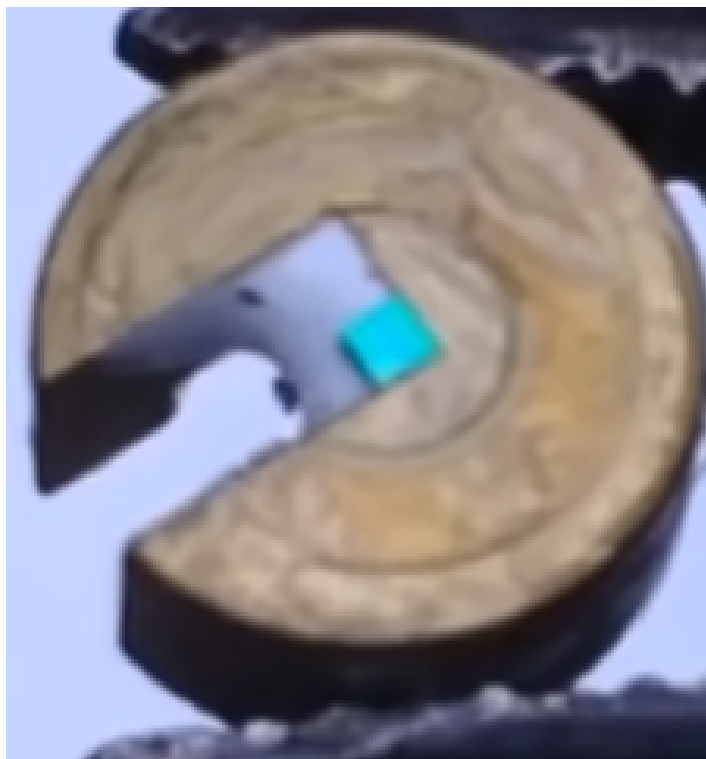


Figura 47: Retiro exitoso del cristal Monolítico.

Una vez resuelta la configuración de las fuentes de iluminación, se pasó a la toma de mediciones con el calibrador vernier, con lo cual se hizo una base para los láseres con el objetivo de mantener los láseres en operación continua y sin la necesidad de tener un operador que tenga que presionar el botón para mantenerse encendida.

Este diseño permitió asegurar condiciones geométricas reproducibles del sistema óptico, manteniendo un tamaño consistente del haz y una distancia de propagación constante, gracias a una base modular que fija la posición de los tres láseres bajo las mismas condiciones experimentales.

Se utilizaron nuevamente las herramientas de diseño CAD, en el software Fusion360.

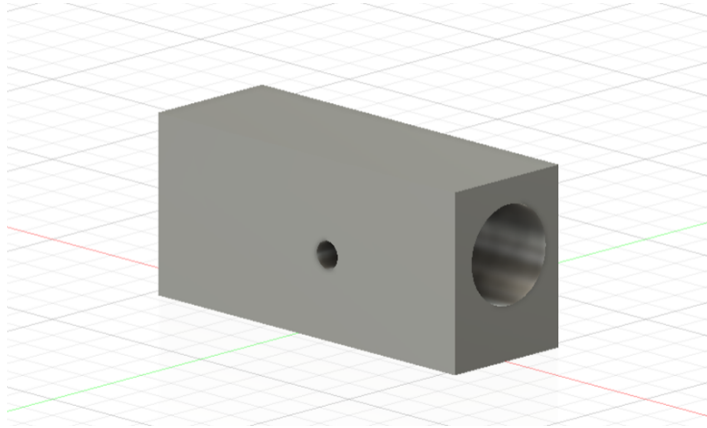


Figura 48: Diseño de la base para láser.

Como se mencionó anteriormente se aseguraron condiciones geométricas reproducibles, obteniendo dimensiones de 45mm de alto x 100 mm de largo.

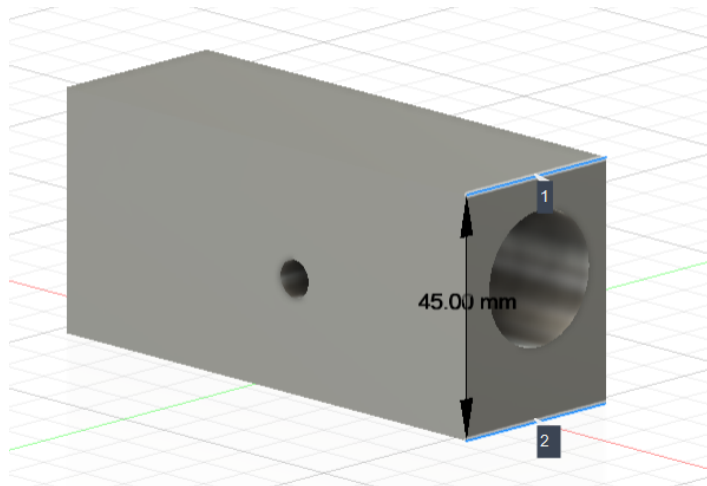


Figura 49: Medidas de la base alto.

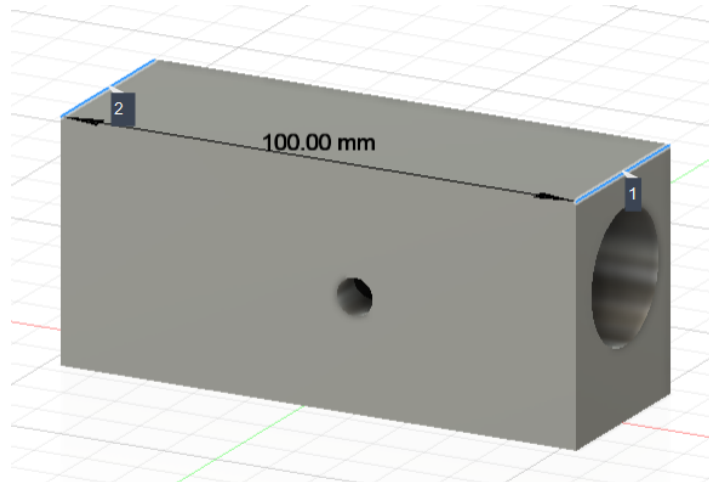


Figura 50: Medidas de la base largo.

Posteriormente se paso a la impresión en 3D para obtener la base de los tres láseres y verificar el funcionamiento de la base el cual fue exitoso.



Figura 51: Base para los láseres que se implementaran en el diseño.

Una vez completada esta primera etapa, se procedió a realizar experimentaciones preliminares con las muestras y distancias del láser para saber que tan compacto o a que distancia debería estar la muestra, filtros, sensores.

En este prototipo se iba a sumar celdas de plástico debido a que son baratas, al igual que las

celdas de cuarzo que se tenían anteriormente, permitiendo evaluar el desempeño de ambos materiales para saber si ambos eran aptos para usarse en el sistema.

Se realizaron pruebas con alcohol isopropílico, café en un tostado medio y agua purificada, para con esto experimentar la distancia de los láseres y su interacción con los cambios de medios.

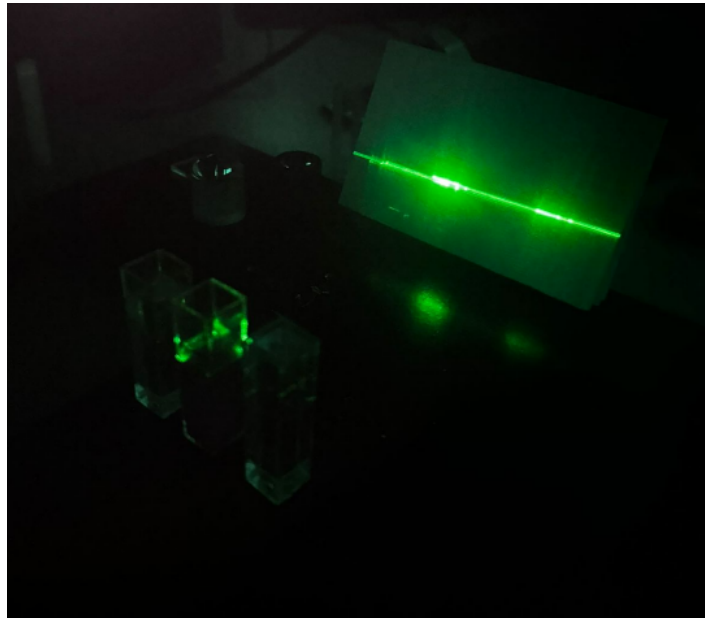


Figura 52: Interacción de láser con diferentes medios.

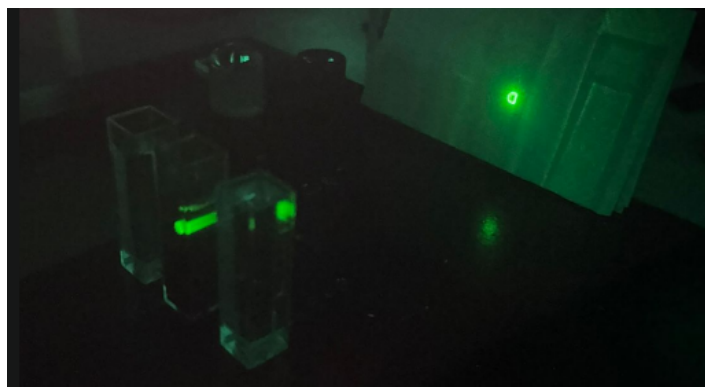


Figura 53: Interacción del láser a través de una infusión de café.

Al igual se probó con otras fuentes de luz, las cuales eran luz blanca descompuesta a través de un prisma para obtener las diferentes longitudes de onda, pero las limitaciones con esto,

fueron que la luz era muy tenue y en las mediciones registraban mucho ruido, por lo cual los láseres daban esa estabilidad monocromática.

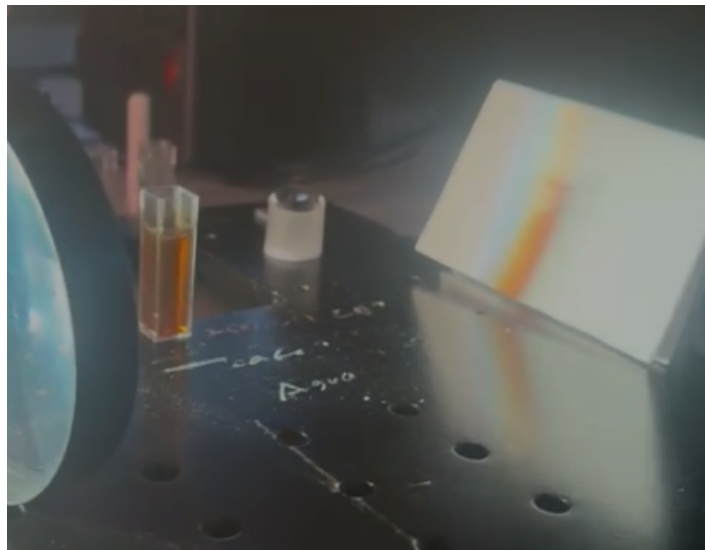


Figura 54: Interacción de la infusión con difracción de luz blanca.

Posteriormente a esta selección, se paso a la etapa en la cual se implementa el BPW34, para poder entender su funcionamiento, al igual que visualizar si la distancia era un factor a considerar en cuanto a su funcionamiento.

Se diseñó una pequeña base para que el haz de luz saliente de la muestra entrara directamente sin luz exterior que alteran la medición.

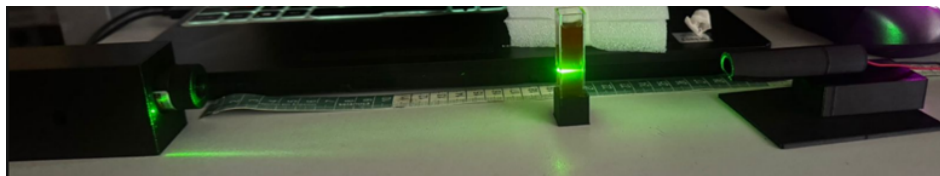


Figura 55: Pruebas de distancia y funcionamiento del fotodiodo.

Este fotodiodo, primero se empezó a entender usando un multímetro evaluando su resistividad en Mili-voltios, con lo cual al probar una infusión de café y una infusión de alcohol isopropílico conviene señalar que dio una clara diferencia en Milivoltios, mínima pero notable al compararlas. En la siguiente imagen [56](#) vemos la transmitancia, al atravesar una muestra de

alcohol isopropílico.



Figura 56: Interacción del láser con alcohol isopropílico.

Después de esto se pasó a la implementación del filtro LongPass 550 nm, con lo cual, con las pruebas, determinaríamos su correcto posicionamiento en nuestro sistema.

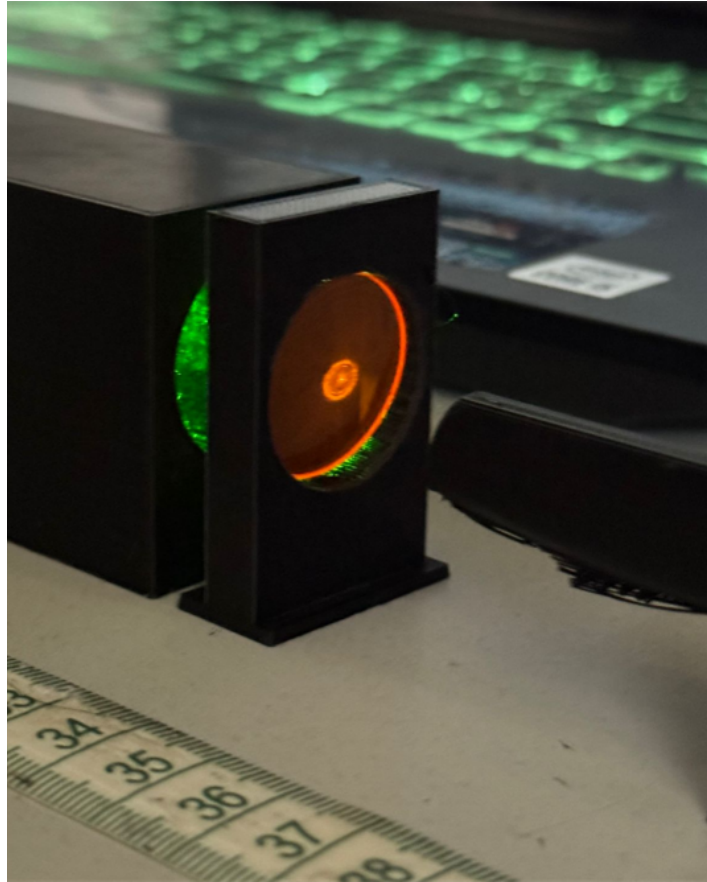


Figura 57: Láser con la interacción del filtro LongPass.

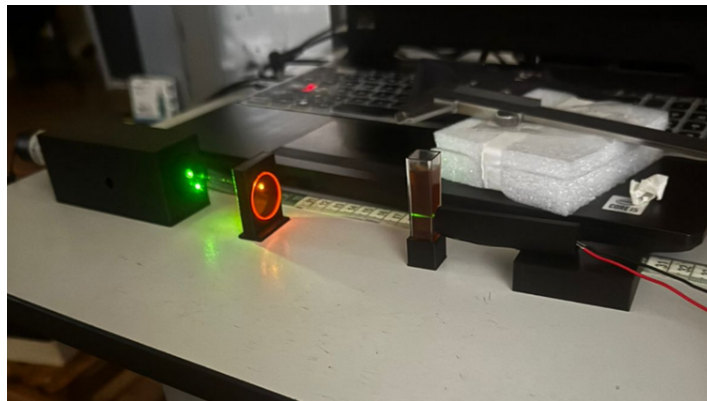


Figura 58: Combinación de elementos en pruebas de diseño.

Después de diferentes pruebas se concluyó que el filtro LongPass debía colocarse después de la muestra, debido a que de esta manera el sensor no se saturaba y se permitía el paso únicamente de la radiación transmitida a través de la muestra. Otra consideración que se tuvo

fue la implementación de filtros ND para atenuar la potencia del haz láser y evitar la saturación del detector, manteniendo la longitud de onda constante y asegurando mediciones dentro del rango lineal del sistema, lo que permitió garantizar una correcta medición para el sensor de difracción.

Estos filtros fueron colocados de manera estratégica antes y después de la muestra para controlar la potencia óptica incidente y transmitida, evitando saturación del sistema de detección y asegurando mediciones dentro del régimen lineal. Un filtro LongPass permitió suprimir radiación no deseada y mejorar la calidad de la señal registrada.

Al tener un ambiente más controlado, con los componentes adecuados se pudieron determinar que las características que debía cumplir el sistema son:

- El grosor de las paredes del diseño debía tener 5mm para evitar la filtración de radiación IR del ambiente.
- El filamento tenía que ser específicamente color negro.
- El filtro LongPass va colocado después de la muestra.
- El sensor BPW34 tenía que estar alineado a la fuente incidente de la luz.
- Los componentes van en este orden: Láser → filtro ND → muestra → filtro ND → filtro Long Pass → Fotodiodo
- Se consideraron espacios laterales para la colocación del sensor óptico y un BPW34 para la medición de reflectancia.

Una vez definidos estos criterios se pasó al diseño en Fusion360, siguiendo la metodología del prototipo 1 al tomar medidas con un calibrador Vernier para el correcto acople de los componentes.

Para la parte del cambio de láseres sin afectar el prototipo, se diseñó un espacio donde solamente se intercambiaría la base para facilitar el intercambio de las fuentes láser durante las mediciones.

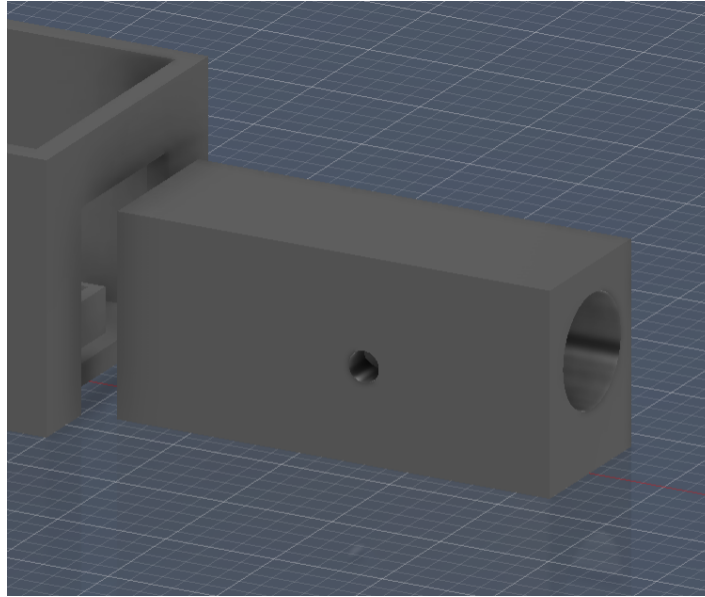


Figura 59: Base de láser acoplada al diseño.

En las siguientes figuras observaremos el diseño con sus respectivas medidas en Fusion360 [60](#)
[61](#) [62](#) [63](#).

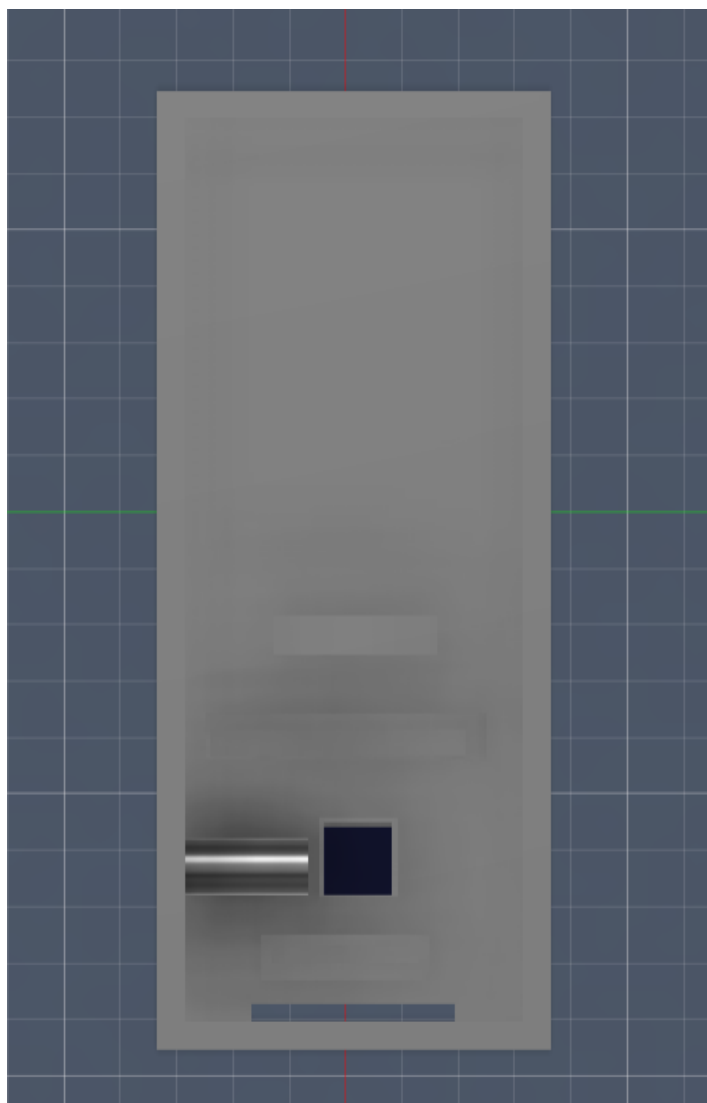


Figura 60: Vista área del prototipo.

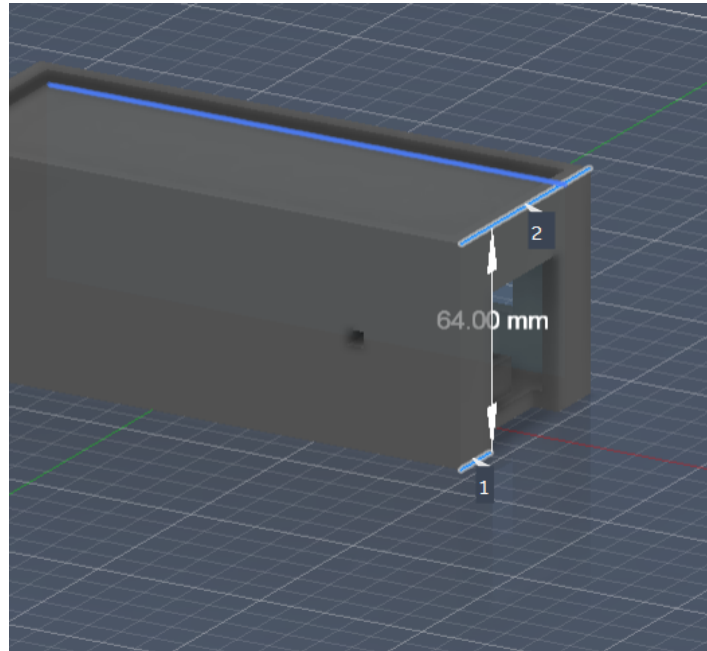


Figura 61: Medidas de altura.

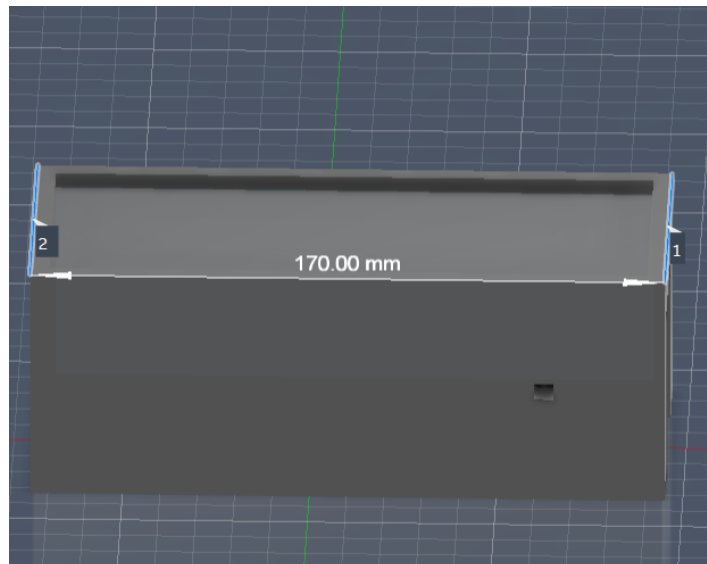


Figura 62: Medidas de largo.

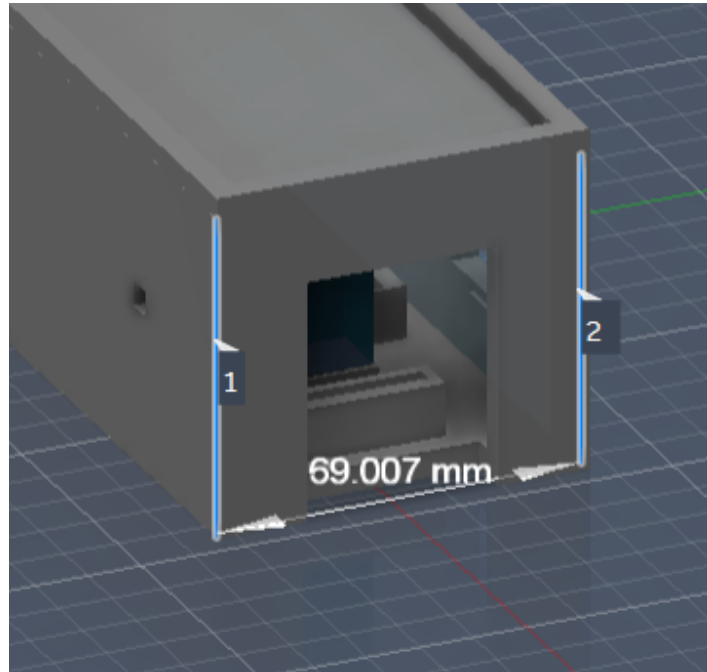


Figura 63: Medidas de ancho.

Finalmente en la siguiente imagen [64](#) observaremos el diseño en físico con filamento grueso de 5mm en la pared, al igual que su integración con los filtros ND y el LongPass.



Figura 64: Diseño final.

Como se muestra en la figura anterior, la estructura mecánica del sistema fue definida de acuerdo con el diseño preliminar. Sin embargo, la integración de los elementos del sensor de imagen y electrónicos requería el diseño de acoplamientos específicos, los cuales se describen en las siguientes secciones como parte del proceso de consolidación del prototipo final.

4.5 Diseño electrónico y diseño de la interfaz de medición

En la parte del diseño electrónico se realizó un acoplamiento Para la detección de radiación transmitida por la muestra se seleccionó el fotodiodo BPW34, que tiene una sensibilidad espectral en el rango aproximado de 430-110 nm.

Durante su operación, el fotodiodo genera una corriente y el sistema de adquisición requiere voltaje, por lo cual se implementó un amplificador de transimpedancia (TIA) utilizando un amplificador operacional LM358 en configuración inversora. La resistencia se seleccionó: Considerando la corriente máxima esperada. Rango de voltaje del ADC Evitar la saturación del operacional.

$$R = \frac{4\text{ V}}{5\mu\text{A}} = 800\text{ k}\Omega$$

Este procedimiento permitió dimensionar adecuadamente la ganancia del sistema.

El circuito se implementó primero en protoboard para poder verificar el correcto funcionamiento asimismo, se utilizó un Arduino UNO. Esto se debió a que el voltaje fue digitalizado mediante el convertidor analógico-digital (ADC) integrado en la plataforma Arduino UNO, lo cual permitió la adquisición de datos de forma simple y reproducible en etapas de prototipado.

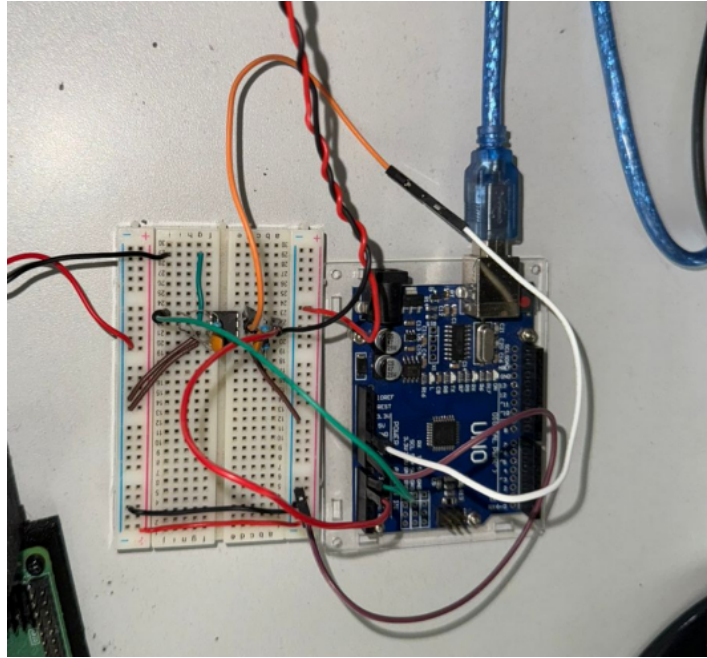


Figura 65: Circuito en fases de prueba en protoboard.

Para el desarrollo de la interfaz de monitoreo se utilizó Processing, la cual permitió implementar una interfaz gráfica en tiempo real, para visualizar la señal adquirida, registrar los datos experimentales en voltaje y porcentaje.

Esta cadena de adquisición se estructuró como :

Láser → Muestra → BPW34 → TIA (LM358) → (ARDUINO) → Serial → Processing

Se menciona que se tienen dos BPW34 debido a que uno va a leer los valores de transmitancia y el otro los valores de la reflectancia.

Posteriormente a la verificación del correcto funcionamiento del circuito en protoboard, así como de la comunicación entre Arduino con la interfaz, se pasó a la manufactura de un circuito impreso usando la plataforma Altium de diseño de PCBs. Altium Designer es una plataforma profesional unificada para el diseño de tarjetas de circuito impreso (PCB) que integra esquemáticos y diseño físico en un solo entorno.

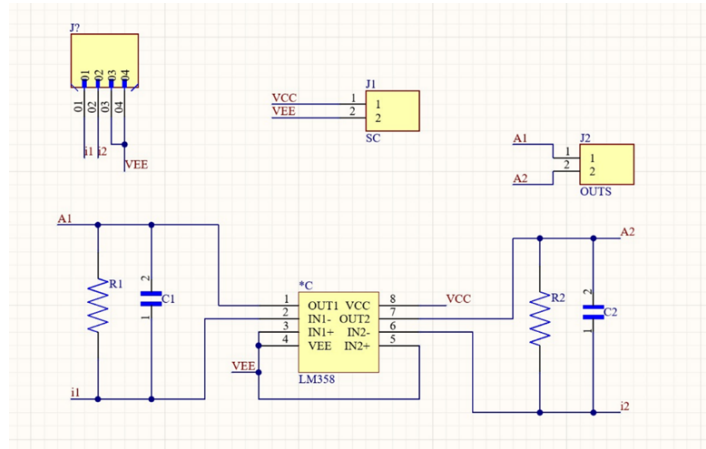


Figura 66: Esquemático del circuito integrado con los BPW32.

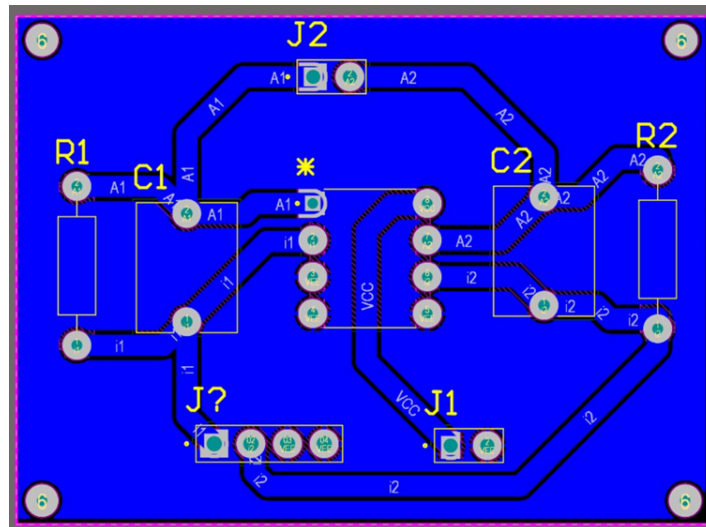


Figura 67: Diseño de la PCB.

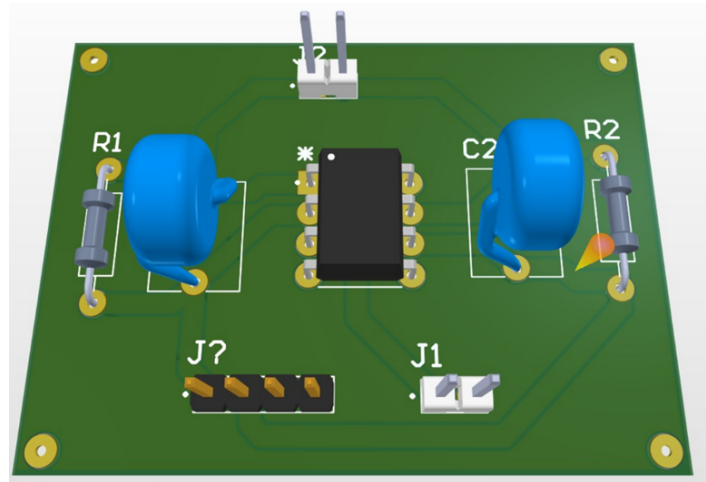


Figura 68: Simulación 3D del circuito.

Posteriormente se paso a la etapa de manufactura, para poder implementarla al prototipo y corroborar su correcto funcionamiento.

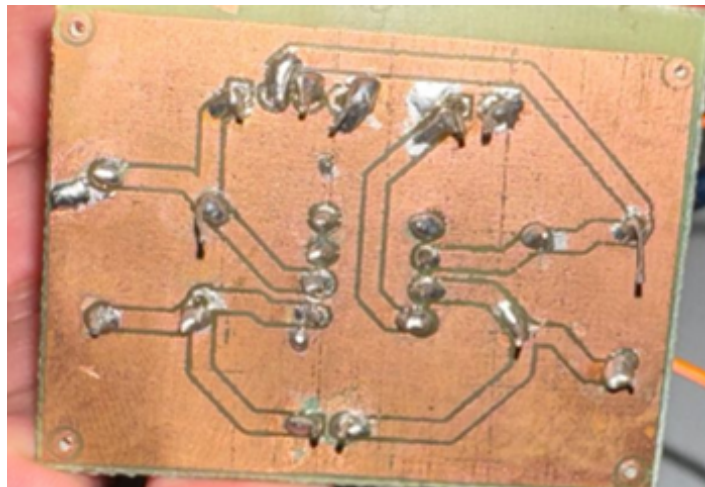


Figura 69: Circuito impreso transimpedancia.

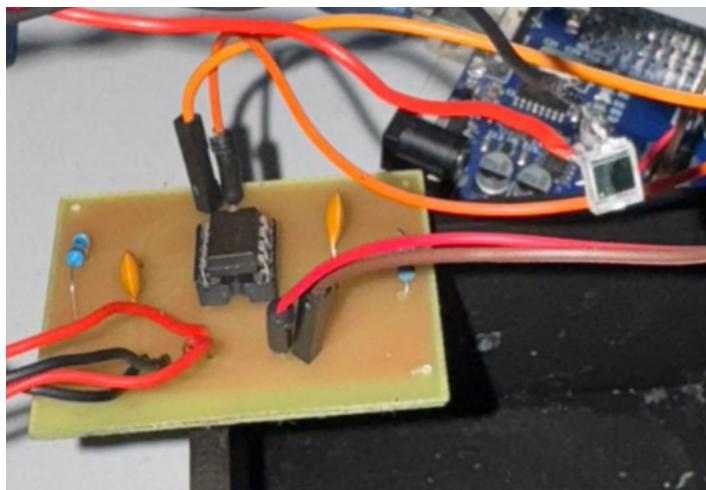


Figura 70: Integración al prototipo.

La interfaz se diseñó con un enfoque funcional y orientado a la interpretación inmediata de resultados experimentales. Está compuesta por:

- Gráfica en tiempo real
- Indicador numérico de reflectancia
- Indicador numérico de transmitancia

El eje vertical se encuentra normalizado en porcentaje (0–100 %), lo cual permite una interpretación directa del nivel relativo de energía detectada respecto a la referencia calibrada.

En los indicadores numéricos tenemos

- Reflectancia, muestra el valor porcentual calculado y voltaje instantáneo medido.
- Transmitancia, muestra el valor porcentual calculado y voltaje instantáneo correspondiente.



Figura 71: Interfaz gráfica.

El funcionamiento del circuito en conjunto con la interfaz permitió comprobar que la radiación IR del ambiente no penetra en el sistema. Al mantenerse cerrado nuestro sistema la medición siempre fue 0 V y 0 %, al haber cambios de luz la reacción de los fotodiodos era inmediata con lo cual verificamos el correcto acoplamiento.

4.6 Diseño e integración del sensor óptico para la captura de imágenes

Para completar el sistema espectroscópico basado en fuentes de iluminación controladas y sensores fotodetectores, se integró una cámara compatible con Raspberry Pi 4 como sensor óptico de captura de imágenes. Esta cámara permite registrar información visual de la interacción entre la luz y la muestra, obteniendo mapas espaciales de intensidad y color que posteriormente pueden ser procesados digitalmente para extraer parámetros ópticos relevantes. La cámara se conectó mediante la interfaz CSI de la Raspberry Pi 4 y se controló mediante la librería Picamera2 en Python, la cual permite la configuración de resolución, adquisición de imágenes y almacenamiento de datos para su posterior análisis.

El flujo de operación implementado consiste en:

1. Inicializar la cámara y configurar la resolución de captura.
2. Iniciar el sensor y estabilizar la exposición.

3. Capturar la imagen de la muestra iluminada.
4. Guardar la imagen en formato digital para su procesamiento.
5. Se agregó un complemento para convertir la imagen a escala de grises para analizar la intensidad luminosa incidente o transmitida.

Este procedimiento permite obtener tanto la imagen original como una representación en escala de grises, donde cada píxel corresponde a un nivel de intensidad luminosa. A partir de esta información es posible calcular perfiles de intensidad, variaciones espaciales del haz, así como métricas estadísticas empleadas en la caracterización óptica de las muestras de café.

La integración de la cámara dentro del sistema óptico proporciona un mecanismo adicional de medición no invasiva, permitiendo correlacionar la información espectral obtenida mediante fotodetectores con características visuales de la muestra, mejorando la robustez y confiabilidad del sistema de análisis desarrollado.

Para garantizar su correcto funcionamiento y acoplamiento se diseñó una base utilizando herramientas CAD. Con el objetivo de garantizar estabilidad y reproducibilidad en la captura de imágenes.

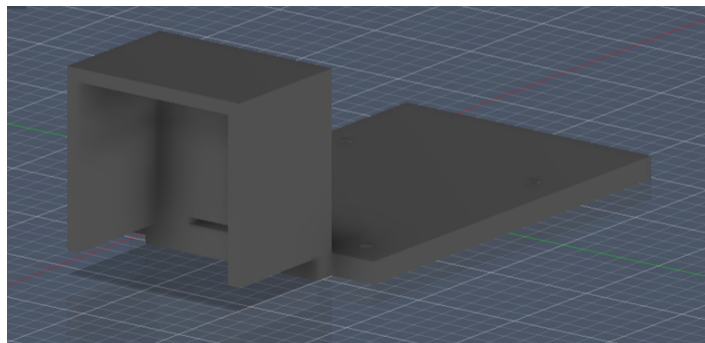


Figura 72: Diseño de la cámara en Fusion360.

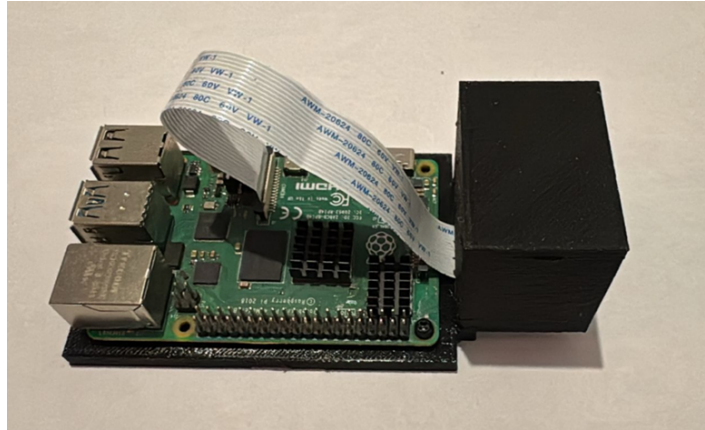


Figura 73: Base acoplada a la Raspberry pi 4 y la pi cam.



Figura 74: Vista frontal de la Pi Cam.

Posteriormente se hizo la integración al prototipo para probar su funcionamiento en conjunto y posteriormente hacer las pruebas experimentales con infusiones de café.

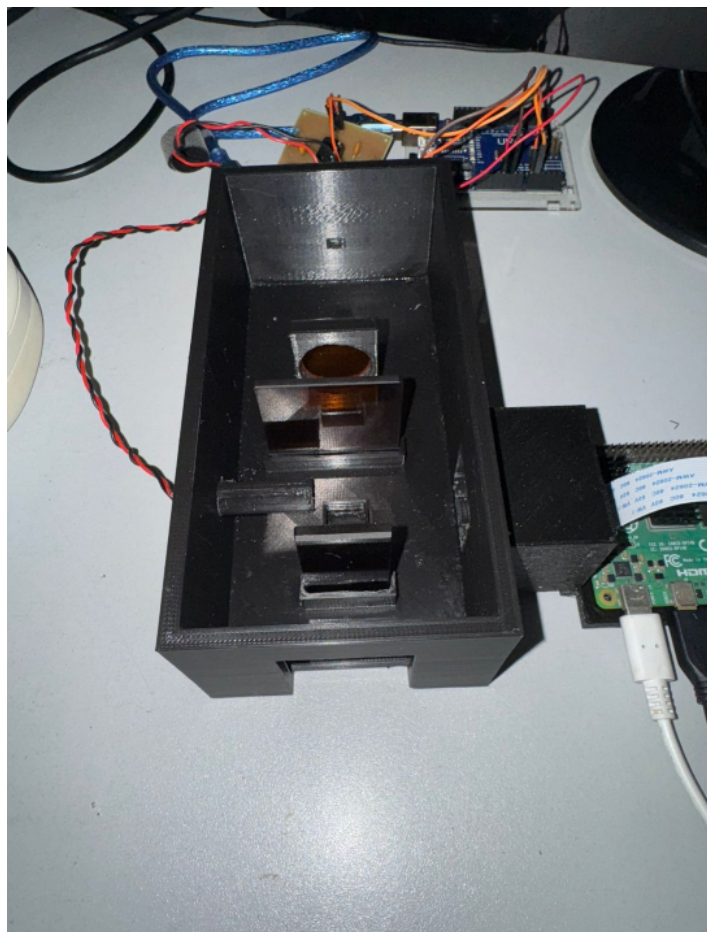


Figura 75: Acoplamiento de la Pi Cam con el espectrofotómetro.

4.7 Metodología para la preparación de muestras

La preparación de muestras constituye una etapa crítica dentro del proceso experimental, ya que influye directamente en la reproducibilidad y confiabilidad en los resultados. Por esta razón, se estableció un protocolo estandarizado de preparación que garantiza condiciones controladas y repetibles, permitiendo evaluar de manera objetiva el efecto del grado de tostado sobre la respuesta espectral del sistema. La homogeneidad en la concentración y en los parámetros de preparación asegura que las variaciones observadas en las mediciones sean atribuibles únicamente al nivel de tostado y no a factores externos asociados al proceso de extracción.

Estas pruebas se realizaron únicamente con 3 grados de tostado Claro, Medio y Oscuro. Los

volúmenes de operación fueron para 3.5 ml por cada celda, ambas celdas de plástico y de cuarzo tenían la misma capacidad en ml.

Se tomó en cuenta el peso de las celdas para tener conocimiento del peso de cada uno de los materiales de medición.

Para esto se usó una balanza analítica/precisión de la marca OHAUS debido a la alta precisión sobre todo en masas pequeñas de hasta 0.1 mg (0.0001g).

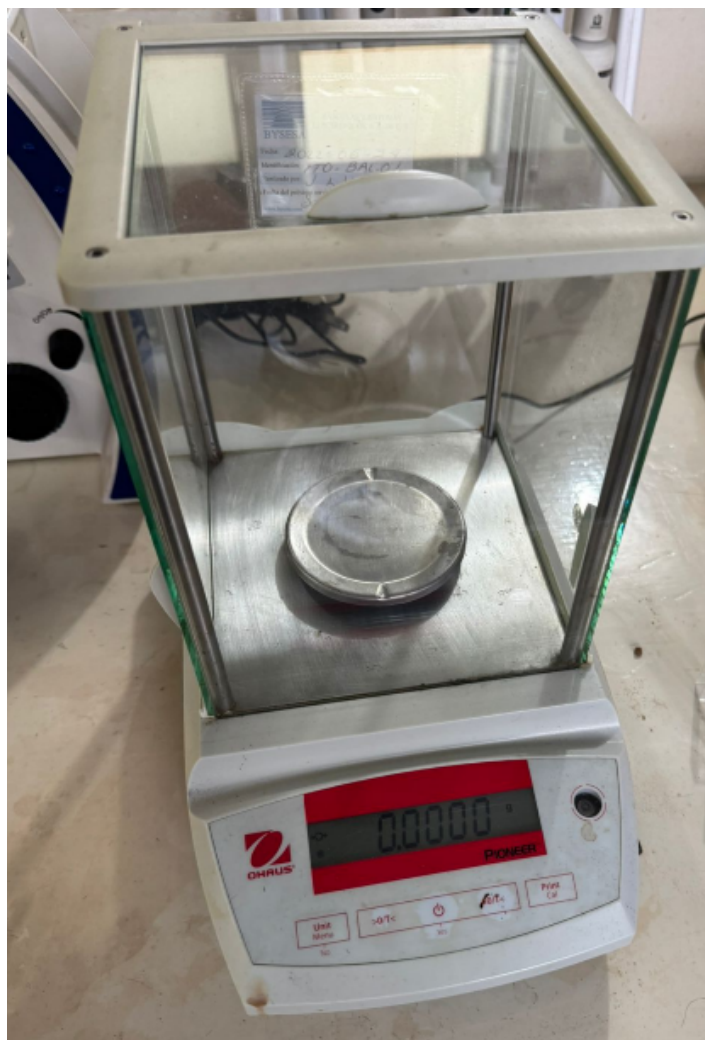


Figura 76: Balanza OHAUS.

Para garantizar que estaba en óptimas condiciones y debidamente calibrada, esta balanza tiene una burbuja la cual indica si esta centrada, esta en optimas condiciones de funcionamiento.



Figura 77: Balanza con su sello de calibración.



Figura 78: Celdas de plástico y cuarzo.

Tabla 3: Peso de la celda utilizada

Tipo de celda	Peso (g)
Cuarzo	5.8091
Tipo de celda	Peso (g)
Plástico	2.0197g

Pasamos posteriormente al llenado con su respectivo etiquetado en gramos, al igual que su clasificación.



Figura 79: Medición en gramos del café.

En la imagen siguiente [80](#) , observamos la clasificación de los grados de tostado.



Figura 80: Clasificación de grado de tostado Oscuro, Medio, Claro.

Posteriormente, una vez obtenidas las medidas, se utilizó agua destilada para la preparación de las muestras, debido a su baja concentración de impurezas.

La temperatura 90° - 95° influye en la solubilidad de compuestos. A mayor temperatura, mayor solubilidad de:

- Cafeína
- Ácidos clorogénicos
- Melanoidinas
- Compuestos fenólicos

Esta temperatura es un parámetro crítico en la preparación de infusiones de café, ya que influye directamente en la cinética de extracción y en la solubilidad de los compuestos químicos presentes en el grado de tostado. Diversos estudios han demostrado que el intervalo de 90°C a 95°C favorece una extracción eficiente de compuestos solubles tales como cafeína, ácidos clorogénicos, melanoidinas y compuestos fenólicos, sin inducir una degradación excesiva o sobreextracción indeseada [23, 48].

Posteriormente los demás pasos se hicieron en este orden:

1. Tomar muestra de café ejemplo (5g, 10g, 15g).

2. Medir un vaso de agua destilada de (237 ml)
3. Calentarlo por 2 min hasta tener una temperatura de 90° - 95° .
4. Poner en la prensa francesa primero el café y después el agua y presionar.
5. Tomar 3.3ml de la dilución con la jeringa y con los guantes de nitrilo puestos.
6. Llenar las celdas de cuarzo.

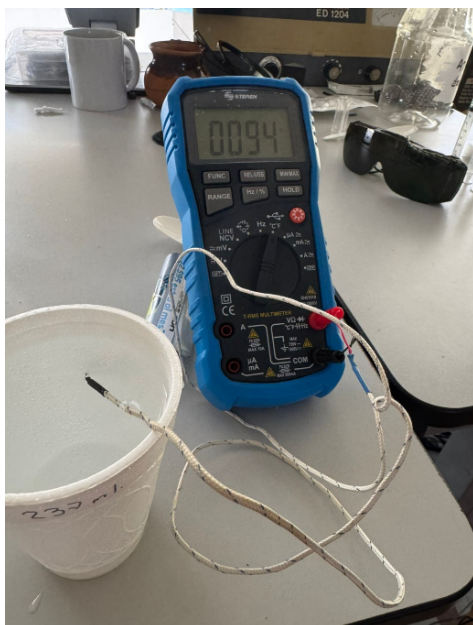


Figura 81: Vaso de 237 ml a la temperatura de 94° .



Figura 82: Preparación en prensa francesa.



Figura 83: Infusiones de café tostado medio en las celdas de plástico y cuarzo.

Para la limpieza se uso una dilución de ácido sulfúrico (H_2SO_4), con el cual garantizamos limpieza.

En la etapa de limpieza se siguen los pasos:

1. Colocarse guantes de nitrilo antes de su manipulación.
2. Tomar de la dilución preparada de H_2SO_4 + agua, en una jeringa.
3. Verter interna y externamente de la celda la dilución de manera moderada.
4. Limpiar el excedente con un algodón.
5. Dejar escurrir hasta que se seque con la temperatura ambiente.



Figura 84: Preparación de la dilución



Figura 85: Aplicación de la dilución de limpieza.



Figura 86: Celdas limpias para su posterior uso.

4.8 Fase de experimentación

En esta etapa final de experimentación se realizaron 18 mediciones, todas bajo condiciones similares en preparación, temperatura y con el ambiente controlado, las cuales permitirían obtener diferentes resultados.

Las infusiones y su preparación fueron controladas con una bitácora para garantizar una mejor reproducibilidad y medición en las mediciones.

MUESTRA: Café [Tipo] - Tostado [Claro/Medio/Oscuro]
 Fecha: 22/01/2026 Hora: 04:29
 Operador: Alan Apertia Trujillo

PREPARACIÓN:

- Masa café: 5 g
- Volumen agua: 237 ml
- Temp. agua inicial: 25 °C 77°F
- Temp. agua final: 93 °C
- Tiempo extracción: min
- Temp. enfriamiento: 27 °C
- Hora preparación: 4:42 51:20.47
- Hora medición: 5:36 47:00.00

OBSERVACIONES:

- Color infusión: Café no tan claro es poco oscuro.
- Aroma: Normal no tan fuerte
- Claridad: Semi oscuro 60% oscuro

MUESTRA: Café tostado Medio
 FECHA/HORA: 5:36 22/01/2026
 CUBETA: (Cuarzo/Plástico)
 TEMPERATURA: 27.0 °C
 pH (opcional): 4.66

PLÁSTICO 6:56
 28°
 4.66

Figura 87: Ejemplo de bitácora usada en una preparación.

Para estas pruebas con los láseres se usó equipo de protección ocular los cuales fueron unas gafas de protección con densidad óptica OD5+, diseñadas para la longitud de onda correspondiente a los diodos láser empleados. (532 nm, 650 nm y 808 nm)

El uso de este nivel de protección garantiza una reducción significativa del riesgo ocular ante la exposición accidental a radiación directa o reflejada, asegurando condiciones de trabajo seguras durante las pruebas experimentales.



Figura 88: Gafas de protección OD5+.

Este mismo procedimiento se repitió con los tostados medio y oscuro, con el debido preparación de las infusiones.

Con lo cual:

1. Se preparó una infusión de café correspondiente al grado de tostado evaluado (claro/medio/oscuro), empleando 5 g de café.
2. Se adicionaron 237 mL de agua destilada a una temperatura controlada de 90°C – 95°C , manteniendo constantes las condiciones de extracción para asegurar reproducibilidad.
3. Una vez finalizada la preparación, se homogenizó la muestra y se tomó una alícuota de 3.5 mL para llenar la celda de plástico.
4. Se tomó una segunda alícuota de 3.5 mL para llenar la celda de cuarzo.
5. Se colocaron los elementos de seguridad (gafas de protección láser y guantes) antes de iniciar la medición.
6. Se insertó la celda (plástico) en el compartimiento de muestra del espectrofotómetro.
7. Se inició la interfaz de adquisición y visualización de datos.

8. Se realizó una verificación de funcionamiento del sistema (lectura estable del detector y comunicación con la interfaz).
9. Se verificó la disponibilidad del sensor de imagen para el registro complementario una vez iniciado.
10. Se cerró la tapa del sistema para minimizar la influencia de luz ambiental.
11. Se efectuó la medición para el primer láser, realizando cinco repeticiones por corrida.
12. Se repitió el procedimiento para las tres longitudes de onda empleadas, manteniendo la misma celda y condiciones experimentales.
13. Se sustituyó la celda de plástico por la celda de cuarzo.
14. Se repitieron las mediciones con las tres longitudes de onda, nuevamente con tres repeticiones por corrida.

También se hizo una medición retirando todos los filtros, con el fin de observar la interacción directa del láser para observar el comportamiento con las muestras de infusiones claro, medio y oscuro. Con esto poder determinar si los filtros afectan a la medición y al paso de la luz o existe una relación aun con filtros.

Las pruebas se realizaron en ambos medios cuarzo y plástico.

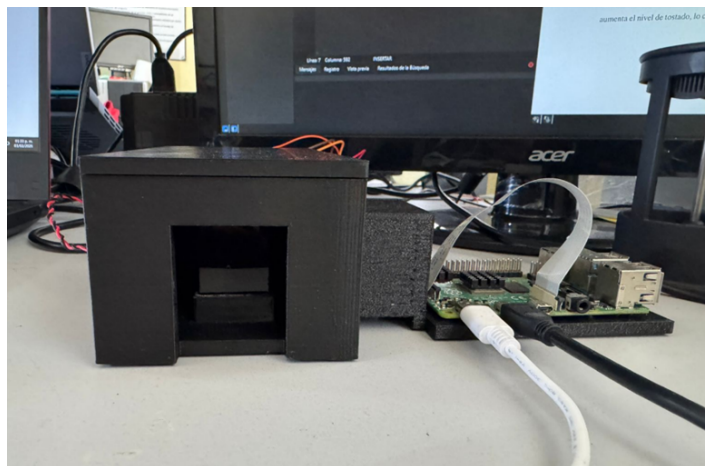


Figura 89: Espectrofotómetro listo para la medición..

En las siguientes imágenes 90, 91 se visualiza la interfaz y el comportamiento con diferentes láseres interactuando con distintos grados de tostado.



Figura 90: Tostado medio y su medición con el láser rojo.

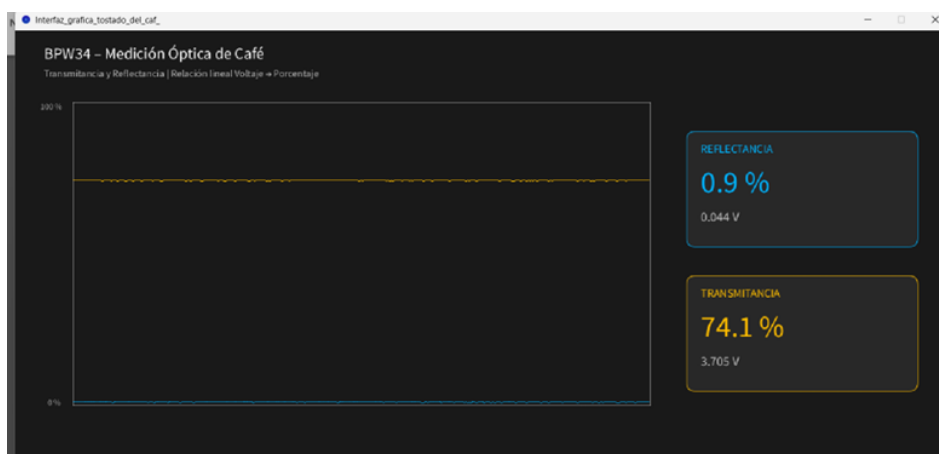


Figura 91: Medición de interacción directa del láser rojo en tostado medio.

En la siguiente imagen 92 se observa la interacción del láser rojo con nuestro equipo en funcionamiento.

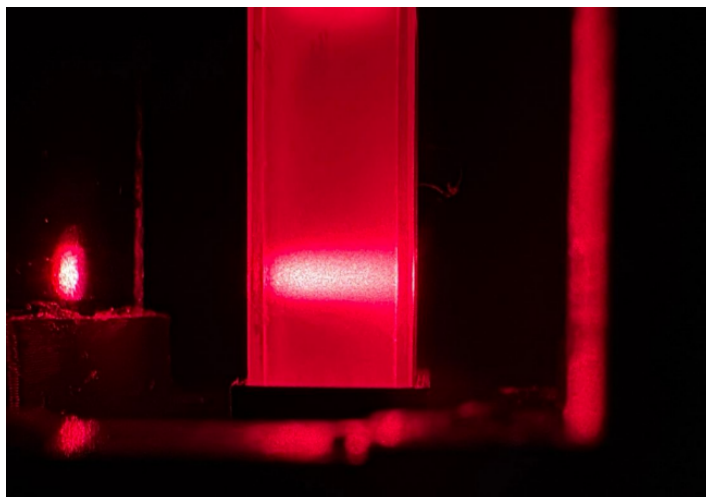


Figura 92: Experimentación en proceso.

Este fue el procedimiento seguido durante la etapa de experimentación para la toma de mediciones de las infusiones de café.

Asimismo, el mismo procedimiento se aplicó para las mediciones con interacción directa del láser.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

En este capítulo se abordará la descripción de los resultados obtenidos.

Se realizó un total de 90 mediciones correspondientes a las infusiones de café evaluadas. Para cada grado de tostado (claro, medio y oscuro) se efectuaron mediciones con tres longitudes de onda distintas, utilizando dos tipos de celdas (plástico y cuarzo) y realizando cinco repeticiones por cada combinación láser–celda. Esto permitió evaluar la reproducibilidad del sistema y analizar la influencia del material de la celda en la respuesta óptica.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de interacción directa del láser retirando los filtros ND y de paso largo, con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema sin atenuación espectral. Estas pruebas se efectuaron tanto en celda de plástico como de cuarzo, realizando cinco mediciones por cada láser, lo que representó 30 mediciones adicionales.

En las siguientes tres Figuras 93, 94, 95 tenemos las mediciones de los tres grados de tostado con la interacción del láser verde.

Láser Verde															
Tostado claro mediciones															
Cubeta de plástico				Interacción directa del láser cubeta de plástico				Cubeta de cuarzo				Interacción directa del láser cubeta de plástico			
T%	Volts	RF	Volts	T%	Volts	RF	Volts2	T%	Volts	RF	Voltaje	T%2	Voltaje2	RF2	Voltaje
73.80%	3.690v		0.40% 0.020v	73.70%		3.685	1.00% 0.049v	73.80%	3.690v		0.50% 0.024v	73.90%	3.695v		0.60% 0.029v
73.80%	3.690v		0.20% 0.010v	73.90%	3.695v		1.10% 0.054v	73.80%	3.690v		0.60% 0.029v	73.80%	3.690v		0.70% 0.034v
73.80%	3.690v		0.20% 0.010v	73.70%	3.685v		0.90% 0.044v	73.80%	3.690v		0.40% 0.020v	73.80%	3.690v		0.70% 0.034v
73.80%	3.690v		0.40% 0.020v	74.00%	3.700v		0.90% 0.044v	73.80%	3.690v		0.05% 0.0024v	73.70%	3.685v		0.40% 0.020v
73.80%	3.690v		0.10% 0.005v	73.70%	3.685v		1.00% 0.049v	73.80%	3.690v		0.05% 0.0024v	73.90%	3.695v		0.50% 0.024v

Figura 93: Tostado claro mediciones con láser verde.

Láser Verde															
Tostado Medio mediciones															
Cubeta de plástico				Interacción directa del láser cubeta de plástico				Cubeta de cuarzo				Interacción directa del láser cubeta de plástico			
T%	Volts	RF	Volts	T%	Volts	RF	Volts2	T%	Volts	RF	Voltaje	T%2	Voltaje2	RF2	Voltaje
74.10%	3.705v		0.40% 0.020v	74.10%	3.705v		1.00% 0.049v	74.10%	3.705v		0.50% 0.024v	74.10%	3.705v		0.20% 0.010v
74.10%	3.705v		0.20% 0.010v	74.10%	3.705v		0.80% 0.039v	74.10%	3.705v		0.40% 0.020v	74.10%	3.705v		0.20% 0.010v
74.20%	3.710v		0.10% 0.005v	74.00%	3.700v		0.90% 0.044v	74.10%	3.705v		0.30% 0.015v	74.20%	3.710v		0.50% 0.024v
74.20%	3.710v		0.20% 0.010v	74.00%	3.700v		0.90% 0.044v	74.00%	3.700v		0.20% 0.010v	73.70%	3.705v		0.50% 0.024v
74.20%	3.710v		0.10% 0.005v	74.10%	3.705v		0.80% 0.039v	74.10%	3.705v		0.30% 0.015v	74.20%	3.710v		0.40% 0.020v

Figura 94: Tostado medio mediciones con láser verde.

Láser Verde																	
Tostado oscuro mediciones																	
Cubeta de plástico				Interacción directa del láser cubeta de plástico				Cubeta de cuarzo				Interacción directa del láser					
Volts	= RF	= Volts	= 1%	Volts	= RF	= Volts2	= 1%	Volts	= RF	= Voltaje	= 1%2	Voltaje2	= RF2	= Voltaje	=		
3.690 v		0.30%	0.015 v	73.80%	3.690v		0.30%	0.015v	73.80%	3.690v		0.30%	0.015v	73.80%	3.690v	0.30%	0.015v
3.690v		0.30%	0.015v	73.80%	3.690v		0.40%	0.020v	73.80%	3.690v		0.00%	0.00v	73.80%	3.690v	0.40%	0.020v
3.690v		0.30%	0.015v	73.80%	3.690v		0.30%	0.015v	73.80%	3.690v		0.20%	0.010v	73.80%	3.690v	0.30%	0.015v
3.690v		0.40%	0.020v	73.80%	3.690v		0.40%	0.020v	73.80%	3.690v		0.20%	0.010v	73.70%	3.685v	0.50%	0.024v
3.690v		0.10%	0.005v	73.80%	3.690v		0.20%	0.010v	73.80%	3.690v		0.20%	0.010v	73.90%	3.695v	0.40%	0.020v

Figura 95: Tostado oscuro mediciones con láser verde.

En las siguientes tres Figuras 96,97, 98 tenemos las mediciones de los tres grados de tostado con la interacción del láser rojo.

Láser rojo															
Tostado claro mediciones															
Cubeta de plástico				Interacción directa del láser				Cubeta de cuarzo				Interacción directa del láser			
1%	Volts	RF	Volts3	1%2	Volts2	RF2	Volts4	1%5	Volts5	RF3	Volts6	1%3	Volts7	RF4	Volts8
73.90%	3.695v	0.50%	0.024v	73.80%	3.690v	1.10%	0.054v	73.80%	3.690v	0.40%	0.020v	73.90%	3.695v	0.90%	0.044v
73.70%	3.685v	0.20%	0.010v	73.80%	3.690v	1.40%	0.068v	73.70%	3.685v	0.00%	0.000v	73.80%	3.690v	0.90%	0.044v
73.70%	3.685v	0.20%	0.010v	73.90%	3.695v	1.30%	0.064v	73.90%	3.695v	0.10%	0.005v	73.90%	3.695v	0.80%	0.039v
73.90%	3.695v	0.50%	0.024v	73.80%	3.690v	1.40%	0.068v	73.90%	3.695v	0.40%	0.020v	73.90%	3.695v	0.80%	0.039v
73.90%	3.695v	0.50%	0.024v	73.90%	3.695v	1.20%	0.059v	73.80%	3.690v	0.20%	0.010v	73.90%	3.695v	0.90%	0.044v

Figura 96: Tostado claro mediciones con láser rojo.

Láser rojo																
Tostado medio mediciones																
Cubeta de plástico				Interacción directa del láser				Cubeta de cuarzo				Interacción directa del láser				
1%	Volts	RF	Volts3	1%2	Volts2	RF2	Volts4	1%5	Volts5	RF3	Volts6	1%3	Volts7	RF4	Volts8	
43.70%	2.185v		0.20%	0.010v	74.20%	3.710v	0.30%	0.015v	24.40%	1.222v	0.30%	0.015v	74.10%	3.705v	1.00%	0.049v
43.50%	2.175v		0.00%	0.000v	74.20%	3.710v	0.30%	0.015v	27.70%	1.383v	0.50%	0.024v	74.00%	3.700v	1.60%	0.078v
43.20%	2.160v		0.10%	0.005v	74.10%	3.705v	0.50%	0.024v	34.90%	1.745v	0.40%	0.020v	74.10%	3.685v	0.90%	0.044v
43.50%	2.175v		0.20%	0.010v	74.10%	3.705v	0.50%	0.024v	35.50%	1.774v	0.40%	0.020v	74.00%	3.700v	1.00%	0.049v
43.70%	2.185		0.20%	0.010v	74.20%	3.710v	0.30%	0.015v	35.50%	1.774v	0.40%	0.020v	74.20%	3.710 v	1.00%	0.049v

Figura 97: Tostado medio mediciones con láser rojo.

Láser rojo														
Tostado oscuro mediciones														
Cubeta de plástico			Interacción directa del láser					Cubeta de cuarzo			Interacción directa del láser			
Volts	RF	Volts3	T%2	Volts2	RF2	Volts4	T%5	Volts5	RF3	Volts6	T%3	Volts7	RF4	Volts8
2.874v	0.10%	0.005v	73.80%	3.690v	0.60%	0.029v	36.60%	1.828v	0.20%	0.010v	73.90%	3.695v	0.50%	0.024v
2.864v	0.50%	0.024v	73.80%	3.690v	0.60%	0.029v	37.00%	1.848v	0.40%	0.020v	73.70%	3.685v	0.40%	0.020v
2.869v	0.30%	0.015v	73.80%	3.690v	0.20%	0.024v	36.60%	1.828v	0.50%	0.024v	73.70%	3.685v	0.40%	0.020v
2.835v	0.20%	0.010v	73.90%	3.695v	0.70%	0.034v	36.90%	1.843v	0.30%	0.015v	73.80%	3.690v	0.30%	0.015v
2.840v	0.20%	0.010v	73.90%	3.695v	0.70%	0.034v	37.00%	1.848v	0.40%	0.020v	73.90%	3.695v	0.60%	0.029v

Figura 98: Tostado oscuro mediciones con láser rojo.

En la siguiente tres Figuras 99, 100, 101, tenemos las mediciones de los tres grados de tostado con la interacción del láser IR.

Láser infrarrojo											
Tostado claro mediciones											
cubeta de plástico				Interacción directa del láser				Cubeta de cuarzo			
T%	VOLTS	RF	VOLTS2	T%2	VOLTS3	RF2	VOLTS4	T%3	VOLTS5	RF3	VOLTS6
0.70% <td>0.034v</td> <td></td> <td>11.50%<td>0.577v</td><td>0.80%<td>0.039v</td><td>19.50%<td>0.973v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.70%</td></td></td></td></td>	0.034v		11.50% <td>0.577v</td> <td>0.80%<td>0.039v</td><td>19.50%<td>0.973v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.70%</td></td></td></td>	0.577v	0.80% <td>0.039v</td> <td>19.50%<td>0.973v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.70%</td></td></td>	0.039v	19.50% <td>0.973v</td> <td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.70%</td></td>	0.973v	0.60% <td>0.029v</td> <td>12.70%</td>	0.029v	12.70%
0.90% <td>0.044v</td> <td></td> <td>11.60%<td>0.582v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>19.40%<td>0.968v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td></td></td></td>	0.044v		11.60% <td>0.582v</td> <td>0.70%<td>0.034v</td><td>19.40%<td>0.968v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td></td></td>	0.582v	0.70% <td>0.034v</td> <td>19.40%<td>0.968v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td></td>	0.034v	19.40% <td>0.968v</td> <td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td>	0.968v	0.70% <td>0.034v</td> <td>12.70%</td>	0.034v	12.70%
0.50% <td>0.024v</td> <td></td> <td>11.60%<td>0.582v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>19.60%<td>0.978v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td></td></td></td>	0.024v		11.60% <td>0.582v</td> <td>0.70%<td>0.034v</td><td>19.60%<td>0.978v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td></td></td>	0.582v	0.70% <td>0.034v</td> <td>19.60%<td>0.978v</td><td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td></td>	0.034v	19.60% <td>0.978v</td> <td>0.70%<td>0.034v</td><td>12.70%</td></td>	0.978v	0.70% <td>0.034v</td> <td>12.70%</td>	0.034v	12.70%
0.80% <td>0.039v</td> <td></td> <td>11.60%<td>0.582v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>19.60%<td>0.978v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.90%</td></td></td></td></td>	0.039v		11.60% <td>0.582v</td> <td>0.60%<td>0.029v</td><td>19.60%<td>0.978v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.90%</td></td></td></td>	0.582v	0.60% <td>0.029v</td> <td>19.60%<td>0.978v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.90%</td></td></td>	0.029v	19.60% <td>0.978v</td> <td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.90%</td></td>	0.978v	0.60% <td>0.029v</td> <td>12.90%</td>	0.029v	12.90%
0.60% <td>0.029v</td> <td></td> <td>11.50%<td>0.577v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>19.60%<td>0.982v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.80%</td></td></td></td></td>	0.029v		11.50% <td>0.577v</td> <td>0.60%<td>0.029v</td><td>19.60%<td>0.982v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.80%</td></td></td></td>	0.577v	0.60% <td>0.029v</td> <td>19.60%<td>0.982v</td><td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.80%</td></td></td>	0.029v	19.60% <td>0.982v</td> <td>0.60%<td>0.029v</td><td>12.80%</td></td>	0.982v	0.60% <td>0.029v</td> <td>12.80%</td>	0.029v	12.80%
											0.70%
											11.90%

Figura 99: Tostado claro mediciones con láser IR.

Láser infrarrojo																
Tostado medio mediciones																
cubeta de plástico				Interacción directa del láser				Cubeta de cuarzo								
T%	VOLTS	RF	VOLTS2	T%2	VOLTS3	RF2	VOLTS4	T%3	VOLTS5	RF3	VOLTS6	T%4	VOLTS7	RF4	VOLTS8	
2.10%	0.103v		19.60%	0.978v	73.90%	1.695v	20.70%	1.036v	1.60%	0.078v	21.30%	1.065v	74.10%	1.705v	15.90%	0.797v
2.10%	0.103v		19.70%	0.987v	73.90%	1.695v	20.90%	1.046v	1.60%	0.078v	22.20%	1.109v	74.10%	1.705v	15.90%	0.797v
2.10%	0.103v		19.60%	0.978v	73.90%	1.695v	20.90%	1.046v	1.50%	0.073v	22.00%	1.100v	74.00%	1.700v	16.00%	0.802v
2.10%	0.103v		19.70%	0.987v	73.90%	1.695v	20.90%	1.046v	1.60%	0.078v	22.20%	1.109v	74.10%	1.705v	16.00%	0.802v
2.10%	0.103v		19.70%	0.987v	73.90%	1.695v	20.70%	1.036v	1.50%	0.073v	21.30%	1.065v	74.00%	1.700v	15.90%	0.797v

Figura 100: Tostado medio mediciones con láser IR.

Láser infrarrojo											
Tostado oscuro mediciones											
cubeta de plástico				Interacción directa del láser				Cubeta de cuarzo			
VOLTS	RF	VOLTS2	T%2	VOLTS3	RF2	VOLTS4	T%3	VOLTS5	RF3	VOLTS6	T%4
0.029v	6.70%	0.337v	1.00%	0.049v	6.30%	0.313v	1.00%	0.049v	3.30%	0.156v	0.90%
0.049v	6.80%	0.342v	1.00%	0.049v	6.50%	0.323v	1.00%	0.049v	3.30%	0.160v	1.20%
0.039v	6.80%	0.342v	1.00%	0.049v	6.40%	0.318v	1.00%	0.049v	3.30%	0.156v	1.00%
0.034v	6.60%	0.332v	1.00%	0.049v	6.30%	0.313v	1.20%	0.059v	2.90%	0.147v	0.90%
0.039v	6.80%	0.342v	1.20%	0.059v	6.30%	0.313v	1.00%	0.049v	3.30%	0.160v	0.90%
											3.20%
											0.044v
											3.20%
											0.161v
											0.161v

Figura 101: Tostado oscuro mediciones con láser IR.

En la tabla presentada anteriormente se muestran todas las mediciones experimentales realizadas en este estudio, incorporando aquellas obtenidas con el espectrofotómetro y las registradas a partir de la interacción directa del láser con las muestras.

Con base aen estos datos, el análisis se enfoca inicialmente en la comparación de los distintos grados de tostado del café (claro, medio y oscuro), utilizando celdas de plástico y de cuarzo bajo condiciones ópticas controladas. A partir de estas configuraciones experimentales se obtuvieron los datos ópticos correspondientes, los cuales se presentan en las tablas siguientes para su análisis y discusión.

Se procedió primero a clasificar las muestras según su grado de tostado y el tipo de celda de medición empleada. De igual forma, la información experimental se organizó en función del láser utilizado durante las mediciones, con el propósito de facilitar el análisis comparativo de los resultados.

Promedio $T(V)$ → valor medio de transmitancia en voltaje $\sigma T(V)$ → Variabilidad de la transmitancia

Promedio $R(V)$ → Valor medio de la reflectancia σR → Variabilidad de la reflectancia

Tostado	Material	Promedio T (V)	σT	Promedio R (V)	σR
Claro	Plástico	3.69	0	0.014	0.005477226
Claro	Cuarzo	3.69	0	0.009	0.005477226
Medio	Plástico	3.69	0	0.014	0.005477226
Medio	Cuarzo	3.69	0	0.009	0.005477226
Oscuro	Plástico	3.69	0	0.014	0.005477226
Oscuro	Cuarzo	3.69	0	0.009	0.005477226
Láser verde					

Figura 102: Tostado oscuro mediciones con láser IR.

Tostado	Material	Promedio T (V)	σT	Promedio R (V)	σR
Claro	Plástico	2.8524	0.016349312	0.0128	0.007190271
Claro	Cuarzo	1.839	0.010246951	0.0178	0.005403702
Medio	Plástico	2.8524	0.016349312	0.0128	0.007190271
Medio	Cuarzo	1.839	0.010246951	0.0178	0.005403702
Oscuro	Plástico	2.8524	0.016349312	0.0128	0.007190271
Oscuro	Cuarzo	1.839	0.010246951	0.0178	0.005403702
Láser rojo					

Figura 103: Tostado oscuro mediciones con láser IR.

Tostado	Material	Promedio T (V)	σT	Promedio R (V)	σR
Claro	Plástico	0.04025	0.006291529	68.6706	152.7957797
Claro	Cuarzo	0.051	0.004472136	0.1582	0.00801249
Medio	Plástico	0.04025	0.006291529	68.6706	152.7957797
Medio	Cuarzo	0.051	0.004472136	0.1582	0.00801249
Oscuro	Plástico	0.04025	0.006291529	68.6706	152.7957797
Oscuro	Cuarzo	0.051	0.004472136	0.1582	0.00801249
Infrarrojo					

Figura 104: Tostado oscuro mediciones con láser IR.

El análisis por secciones espectrales muestra que la respuesta óptica del café depende tanto del grado de tostado como del material del recipiente y la longitud de onda incidente. Para los tres tostados, el láser verde presenta la menor variabilidad y la mayor estabilidad en la señal, mientras que el infrarrojo exhibe una mayor dispersión, particularmente en tostados oscuros.

El uso de recipientes de cuarzo proporciona mediciones más consistentes, confirmando su idoneidad para sistemas ópticos de caracterización del café.

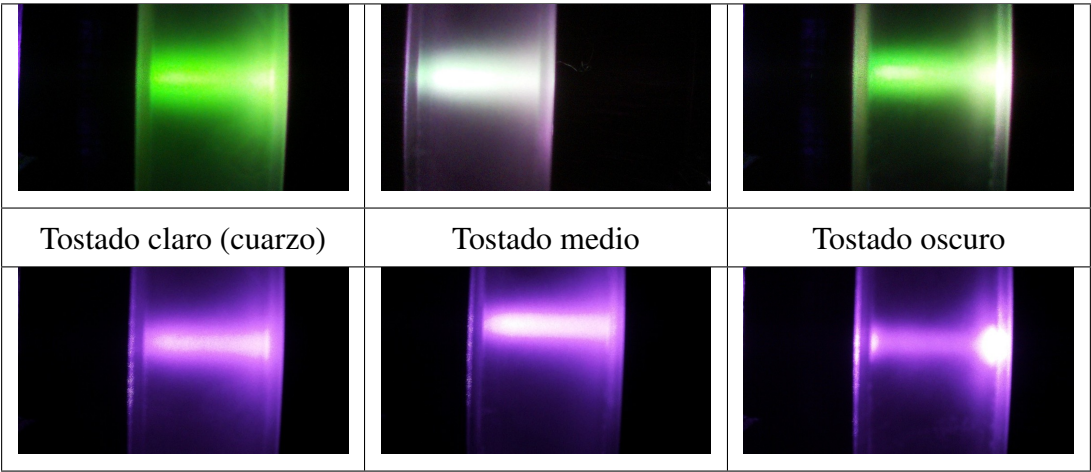


Figura 105: Comparación visual de la transmitancia del láser verde y láser IR en distintos grados de tostado con celdas de cuarzo.

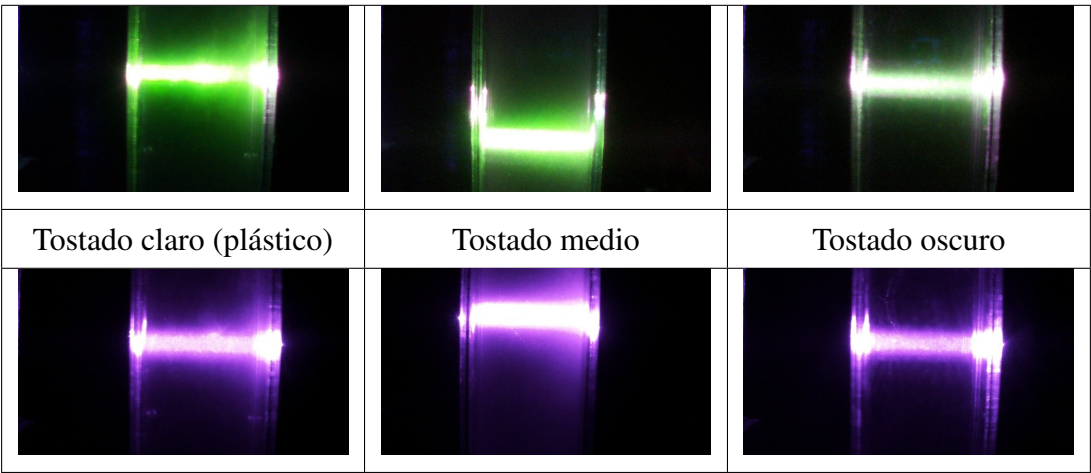


Figura 106: Comparación visual de la transmitancia del láser verde y láser IR en distintos grados de tostado con celdas de plástico.

Se puede apreciar en las imágenes anteriores y la comparativa entre la incidencia del láser verde y el láser IR, vemos que las pruebas ópticas confirman esta parte dejando en evidencia que al tener una celda de plástico tenemos mayor ruido así como mayor dispersión, aun así observamos la interacción del haz de luz verde, el cual luce mas estable.

En un análisis específico a la parte de la dispersión con el láser IR tenemos que:

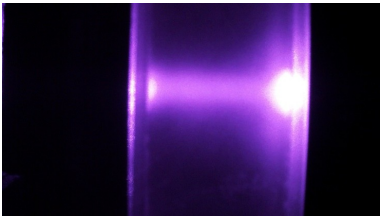
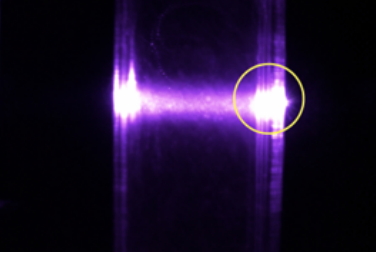
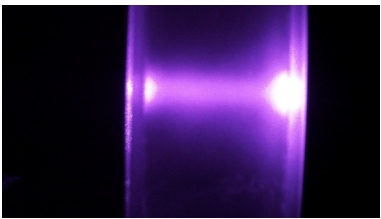
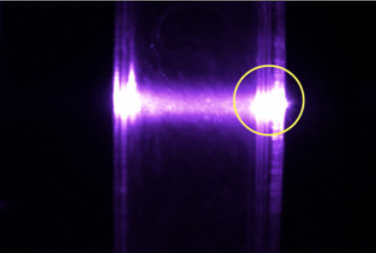
		68.6706 es el promedio de reflectancia en el plástico.
Tostado oscuro en cubeta de cuarzo, donde el punto luminoso que se observa es la dispersión de nuestra muestra.	Tostado oscuro en cubeta de plástico, donde observamos el mismo fenómeno, pero con una ligera incrementación de intensidad.	Comparado con el 0.1582 del cuarzo.
		

Figura 107: Comparación de reflectancia del tostado oscuro en cubetas de cuarzo y plástico.

Con esto cerramos y confirmamos la parte en la que el láser IR permite apreciar mayor dispersión, ahora si se coloca la infusión en una celda de plástico la reflectancia incrementa drásticamente.

5.1 Resultados del comportamiento de voltaje en función del grado de tostado

Con el fin de evaluar cualitativamente la reproducibilidad del sistema y la estabilidad de la señal, se calcularon el valor promedio y la desviación estándar para cada condición experimental.

Las siguientes gráficas de barras de error [108](#) y de voltaje promedio vs grado de tostado [109](#):

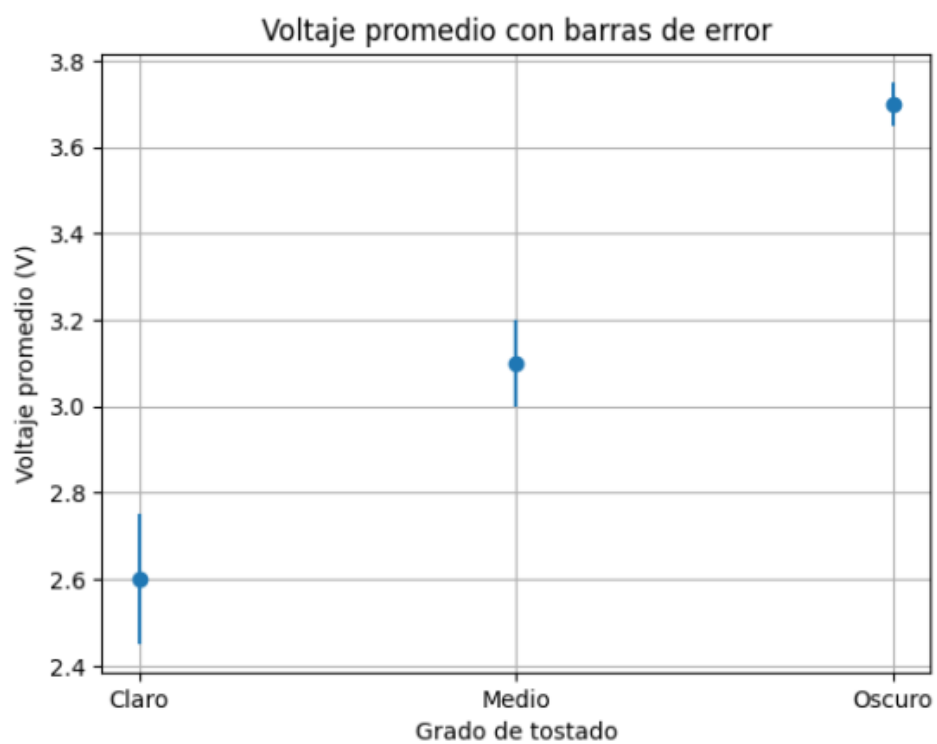


Figura 108: Gráfica de error de los tostados claro, medio y oscuro.

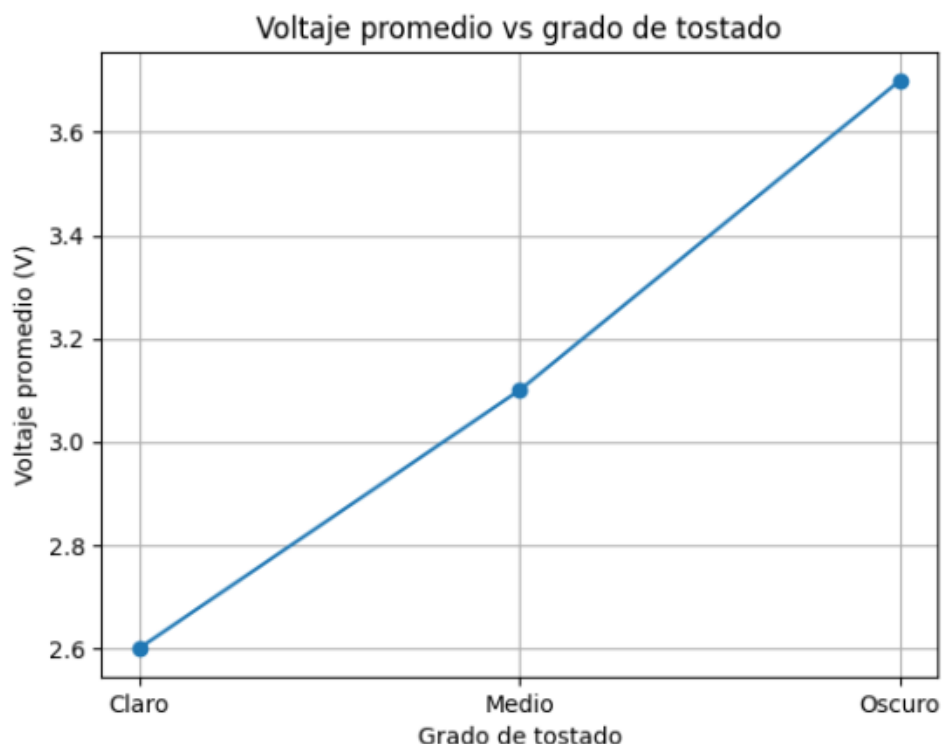


Figura 109: Voltaje promedio vs grado de tostado.

La gráfica comparativa de los tres niveles de tostado muestra un patrón óptico claramente diferenciado. El tostado claro presenta mayor transmitancia y menor reflectancia, mientras que el tostado oscuro exhibe una reducción significativa en la transmitancia y un incremento en la reflectancia. Este comportamiento se asocia al aumento de carbonización y rugosidad del grano de café conforme avanza al tostado, lo que modifica la interacción de la radiación con el material. El tostado medio presenta valores medios, confirmando una transición gradual entre ambos extremos.

Tostado claro

El tostado claro presenta los valores promedio de voltaje más bajos, acompañados de una mayor dispersión entre mediciones repetidas. Este comportamiento sugiere una estructura interna menos homogénea y una menor absorción óptica del haz incidente. La mayor variabilidad observada indica que pequeñas diferencias en la preparación o en la distribución de partículas dentro de la muestra pueden influir significativamente en la señal registrada.

Tostado medio

En el tostado medio se observa un incremento en el voltaje promedio, así como una reducción moderada de la variabilidad. Esto sugiere que, conforme avanza el proceso térmico, el material comienza a absorber energía óptica de manera más consistente. La señal obtenida presenta mayor estabilidad en comparación con el tostado claro, lo que indica una transición hacia un comportamiento óptico más uniforme.

Tostado oscuro

El tostado oscuro presenta los valores de voltaje más elevados y la menor variabilidad relativa entre mediciones. Este comportamiento es consistente con una mayor absorción óptica, asociada al oscurecimiento del material y a la formación de compuestos derivados de reacciones de Maillard y carbonización parcial. La menor dispersión en los datos sugiere una respuesta más estable del sistema bajo esta condición.

En la siguiente imagen [110](#) se muestra el comportamiento de los tuestes con los láseres y sus diferentes longitudes de onda.

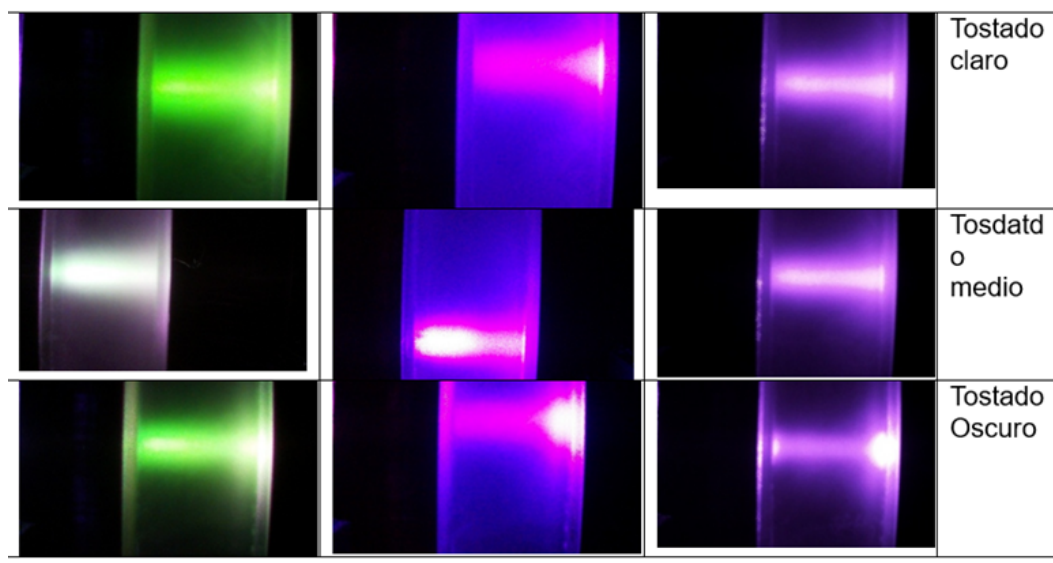


Figura 110: Resultados de los diferentes grados de tueste con interacción de los láseres y sus diferentes longitudes de onda.

En estas imágenes se muestran el comportamiento del haz láser al atravesar las infusiones

correspondientes a los grados distintos de tostado.

Estas imágenes cualitativas del perfil del haz transmitido muestran una modificación progresiva en la distribución espacial de la intensidad conforme aumenta el grado de tostado. Este comportamiento es consistente con los resultados cuantitativos obtenidos en la medición del voltaje promedio.

Como se observa en la figura 108, el voltaje registrado por el sistema aumenta sistemáticamente desde el tostado claro hasta al oscuro, esta tendencia se puede observar que el proceso de tostado modifica las propiedades ópticas de la infusión, alterando el coeficiente de absorción y los fenómenos de dispersión interna. La redistribución espacial de la energía luminosa observada en las imágenes se traduce en una variación medible de la señal eléctrica del fotodetector.

La reducción de la variabilidad en el tostado oscuro sugiere una respuesta más estable del sistema bajo condiciones de mayor absorción óptica, lo cual confirma la sensibilidad del espectrofotómetro desarrollado para discriminar entre diferentes grados de tostado.

5.2 Resultados en el análisis del uso de material

El análisis comparativo del uso de materiales entre celdas de plástico y cuarzo indica que el material más adecuado para el sistema propuesto es el cuarzo. Experimentalmente, el cuarzo mostró una mayor estabilidad en las mediciones de transmitancia, evidenciado por menores valores de desviación estándar y coeficiente de variación en comparación con la celda de plástico. Esta menor dispersión estadística sugiere una respuestas más consistente y reproducible.

Desde el punto de vista óptico el plástico puede introducir cierto ruido, dispersión interna o variabilidad asociada a su composición y acabado superficial. En la siguiente Figura 111 se tienen los resultados entre los materiales de cuarzo y plástico.

Láser	Material	T_V_prom	T_V_sigma	T_V_CV	R_V_prom	R_V_sigma	R_V_CV
Verde	Plástico	3.69	0	0	0.014	0.005477226	0.391230398
Verde	Cuarzo	3.69	0	0	0.009	0.005477226	0.608580619
Rojo	Plástico	2.8524	0.016349312	0.005731774	0.0128	0.007190271	0.561739938
Rojo	Cuarzo	1.839	0.010246951	0.005572023	0.0178	0.005403702	0.303578788
IR	Plástico	0.04	0.005477226	0.136930639	0.339	0.004472136	0.013192141
IR	Cuarzo	0.051	0.004472136	0.08768894	0.1582	0.00801249	0.050647852
Resumen global por material							
Material	Prom CV T	Prom CV R	Prom sigma T	Prom sigma R			
Cuarzo	0.031086988	0.320935753	0.004906362	0.006297806			
Plástico	0.047554138	0.322054159	0.007275512	0.005713211			

Figura 111: Tabla de análisis de materiales cuarzo y plástico.

Si bien el plástico es una opción significativamente mas accesible los resultados experimentales indican que el cuarzo ofrece mejor desempeño metroológico, lo cual puede justificar su selección donde la estabilidad y precisión sean prioritarias. La siguiente Figura nos demuestra la comparación de la interacción del haz de luz en los materiales cuarzo y plástico [112](#).

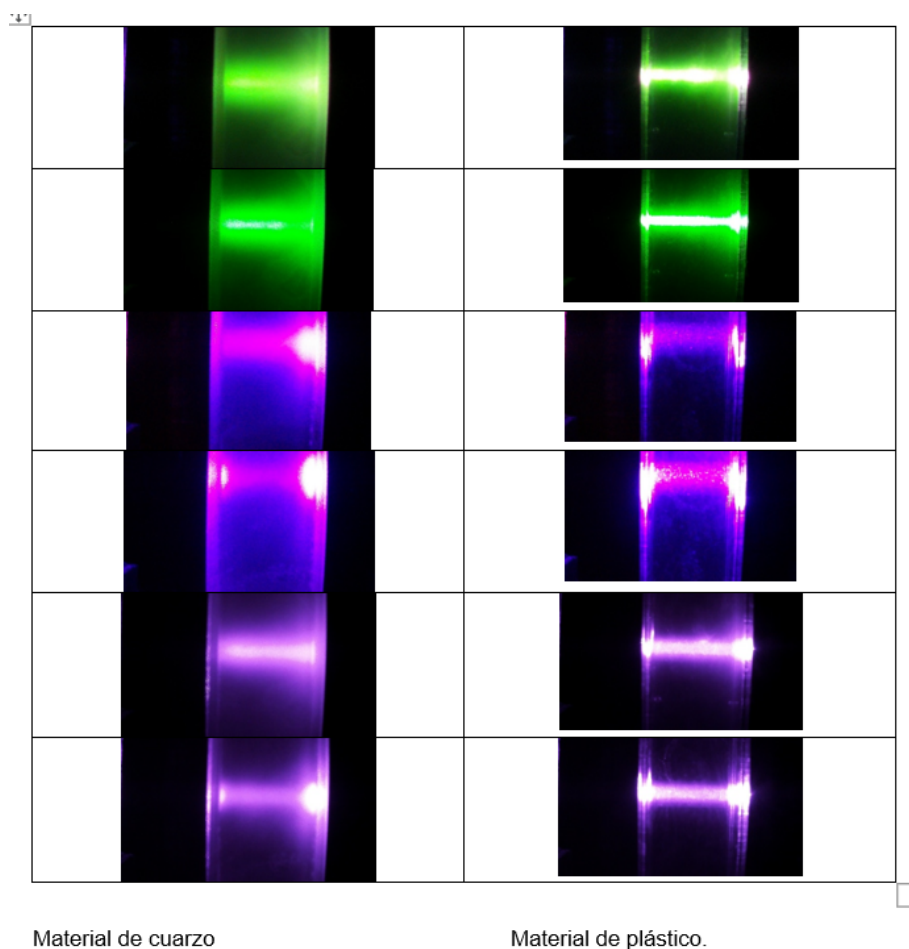


Figura 112: Comparación de la interacción de la luz en materiales de cuarzo y plástico.

Los resultados de la Figura 111 muestran diferencias medibles en los valores promedio de transmitancia y reflectancia entre los materiales evaluados. Estas diferencias cuantitativas se ven respaldadas por la evidencia visual obtenida mediante el registro del trayecto del haz de luz dentro de las celdas. Las imágenes 112 permiten observar modificaciones en la distribución espacial de la intensidad luminosa, particularmente en el caso del plástico, donde se aprecia mayor dispersión y variabilidad del perfil del haz.

La prueba de incidencia del haz de luz, realizada sin filtros ópticos, permitió validar la alineación del sistema y confirmar que la geometría óptica no introduce errores sistemáticos significativos, esta verificación permite asegurar que las diferencias observadas en los valores eléctricos registrados se deben principalmente a la interacción luz-muestra y a las propiedades ópticas del material de la celda y no a artefactos instrumentales.

En conjunto, los datos estadísticos y la evidencia visual confirma la coherencia interna del sistema de medición y respalda la selección de cuarzo como material ópticamente más estable para aplicaciones de caracterización espectrofotométrica del grado de tostado.

CONCLUSIONES

El análisis de las infusiones de café nos mostró la respuesta óptica del café, la cual los resultados muestran que se hizo cumplir nuestra hipótesis inicial, la cual planteaba obtener una forma de medición o un patrón en los diferentes grados de tostado de café. Con este patrón, la respuesta óptica depende tanto del grado de tostado como del material del recipiente y la longitud de onda incidente.

Para los tres tostados, el láser verde presenta la menor variabilidad y mayor estabilidad en la señal, mientras que el infrarrojo exhibe una mayor dispersión, particularmente en tostados oscuros, el uso de recipientes de cuarzo proporciona mediciones más consistentes, confirmando su idoneidad para sistemas ópticos de caracterización del café. El análisis experimental de cómo la transmitancia y la reflectancia del café varían según el grado de tostado, la longitud de onda del láser y el material del recipiente permitió encontrar patrones ópticos claros, que se pueden repetir y son coherentes físicamente. Los resultados muestran que el grado de tostado influye de manera directa en la interacción óptica de la infusión, observándose una disminución sistemática de la transmitancia y un incremento de la reflectancia conforme se eleva el nivel de tostado, lo cual atribuye al aumento de carbonización, opacidad y rugosidad superficial del grano de café.

Al comparar el material del recipiente, el cuarzo demostró ser más estable en las mediciones de transmitancia, lo que se vio en menores promedios de desviación estándar y coeficiente de variación en comparación con el plástico. En reflectancia, ambos materiales presentaron un comportamiento, con variaciones dependientes en longitudes; sin embargo, el cuarzo ofreció una respuesta más consistente en el rango visible, lo que lo convierte en el material más adecuado para un sistema de medición óptica robusto y reproducible. El plástico, si bien puede resultar funcional en condiciones específicas (particularmente en infrarrojo), introduce una mayor dependencia de factores geométricos y superficiales. Los resultados en conjunto permiten confirmar que el sistema experimental es capaz de discriminar de manera efectiva los diferentes niveles de tostado del café mediante mediciones ópticas no destructivas. Asimismo, se establece que el uso de recipientes de cuarzo y la evaluación espectral multibanda son una

estrategia confiable para aplicaciones de clasificación, control de calidad y caracterización óptica del café.

RECOMENDACIONES

Se recomienda incorporar un fotodetector calibrado espectralmente para cada longitud de onda, especialmente en la región infrarroja, donde se observe mayor variación en la respuesta reflectiva.

Emplear celdas certificadas y realizar calibraciones periódicas del sistema para incrementar la precisión de las mediciones. Se recomienda usar polarizadores, filtros ND y filtros Long Pass de la marca ThorLABS debido a que son de uso profesional, certificadas para análisis más precisos y confiables.

En las recomendaciones metodológicas se recomienda que:

- Incrementar el número de repeticiones por medición para fortalecer el análisis estadístico y disminuir la incertidumbre experimental.
- Incrementar las dosis de gramos para ver si estas afectan a las mediciones.
- Implementar mas muestras de diferentes marcas y grados de tostado.

Recomendaciones científicas:

- Ampliar las variedades de café para evaluar la sensibilidad del sistema ante cambios fisicoquímicos más amplios.
- Implementar técnicas de procesamiento digital de imágenes para cuantificar automáticamente la variación espectral capturada por el sensor.
- Se sigue implementando láseres de mayor potencia, al igual de láseres de fibra óptica.
- Hacer pruebas de reacción en las infusiones con nanopartículas de plata o oro para ver los cambios en la estructura de la infusión.

Por último hacer pruebas de validación, en la cual se haga una comparación con un espectrofotómetro certificado, con el fin de validar cuantitativamente la precisión del sistema desarrollado.

PRODUCTOS ACADÉMICOS

ANEXOS

.1 Código de adquisición en Arduino

Listing 1: Programa de lectura de sensores de transmitancia y reflectancia

```
1  const int sensorTrans = A0;
2  const int sensorRefl  = A1;
3
4  void setup() {
5      Serial.begin(115200);
6  }
7
8  void loop() {
9      int adcTrans = analogRead(sensorTrans);
10     int adcRefl  = analogRead(sensorRefl);
11
12     Serial.print(adcTrans);
13     Serial.print(",");
14     Serial.println(adcRefl);
15
16     delay(10);
17 }
```

.2 Código de processing (Interfaz)

Listing 2: Programa de la interfaz gráfica para la lectura de reflectancia y transmitancia

```
1  import processing.serial.*;
2
3  Serial myPort;
4  PrintWriter output;
5
6  // ADC
```

```

7 float adcTrans, adcRefl;
8
9 // Voltajes
10 float voltTrans, voltRefl;
11
12 // Porcentajes
13 float percTrans, percRefl;
14
15 // Datos para grafica (%)
16 float[] dataTrans = new float[600];
17 float[] dataRefl = new float[600];
18
19 int t = 0;
20
21 // Layout
22 int graphX = 80;
23 int graphY = 100;
24 int graphW = 800;
25 int graphH = 420;
26
27 void setup() {
28     size(1300, 600);
29     println(Serial.list());
30     myPort = new Serial(this, Serial.list()[0], 115200);
31     myPort.bufferUntil('\n');
32
33     output = createWriter("datos_cafe.csv");
34     output.println("tiempo,adc_trans,volt_trans,perc_trans,adc_refl
        ,volt_refl,perc_refl");
35 }
36
37 void draw() {

```

```

38 background(25);
39
40 // ===== TITULO =====
41 fill(255);
42 textSize(22);
43 text(BPW34 Medicion Optica de Cafe, 40, 40);
44
45 textSize(14);
46 fill(180);
47 text(Transmitancia y Reflectancia Relacion lineal Voltaje
      Porcentaje, 40, 65);
48
49 // ===== CONVERSIONES =====
50 voltTrans = (adcTrans / 1023.0) * 5.0;
51 voltRefl = (adcRefl / 1023.0) * 5.0;
52
53 percTrans = constrain((voltTrans / 5.0) * 100.0, 0, 100);
54 percRefl = constrain((voltRefl / 5.0) * 100.0, 0, 100);
55
56 // ===== GRAFICA =====
57 stroke(160);
58 noFill();
59 rect(graphX, graphY, graphW, graphH);
60
61 fill(160);
62 textSize(12);
63 text("100 %", graphX - 45, graphY + 10);
64 text("0 %", graphX - 35, graphY + graphH);
65
66 // Transmitancia
67 stroke(0, 180, 255);
68 noFill();

```



```

69     beginShape();
70     for (int i = 0; i < dataTrans.length; i++) {
71         float x = map(i, 0, dataTrans.length, graphX, graphX + graphW
72             );
73         float y = map(dataTrans[i], 0, 100, graphY + graphH, graphY);
74         vertex(x, y);
75     }
76     endShape();
77
78     // Reflectancia
79     stroke(255, 190, 0);
80     beginShape();
81     for (int i = 0; i < dataRefl.length; i++) {
82         float x = map(i, 0, dataRefl.length, graphX, graphX + graphW
83             );
84         float y = map(dataRefl[i], 0, 100, graphY + graphH, graphY);
85         vertex(x, y);
86     }
87     endShape();
88
89     // ===== PANEL DERECHO =====
90     drawPanel(930, 140, "REFLECTANCIA", percTrans, voltTrans, color
91         (0,180,255));
92     drawPanel(930, 340, "TRANSMITANCIA", percRefl, voltRefl, color
93         (255,190,0));
94 }
95
96 void drawPanel(int x, int y, String title, float perc, float volt
97     , color c) {
98     fill(40);
99     stroke(c);
100    rect(x, y, 320, 160, 12);

```

```

96
97     fill(c);
98     textSize(16);
99     text(title, x + 20, y + 30);
100
101     textSize(42);
102     text(nf(perc,1,1) + " %", x + 20, y + 85);
103
104     fill(200);
105     textSize(18);
106     text(nf(volt,1,3) + " V", x + 20, y + 125);
107 }
108
109 // ===== SERIAL =====
110 void serialEvent(Serial p) {
111     String in = p.readStringUntil('\n');
112     if (in == null) return;
113
114     in = trim(in);
115     String[] vals = split(in, ',');
116
117     if (vals.length == 2) {
118         adcTrans = float(vals[0]);
119         adcRef1  = float(vals[1]);
120
121         for (int i = 0; i < dataTrans.length - 1; i++) {
122             dataTrans[i] = dataTrans[i + 1];
123             dataRef1[i]  = dataRef1[i + 1];
124         }
125
126         dataTrans[dataTrans.length - 1] = percTrans;
127         dataRef1[dataRef1.length - 1]   = percRef1;

```

```

128
129     output.println(
130         t + "," +
131         adcTrans + "," + nf(voltTrans,1,3) + "," + nf(percTrans,1,2)
132             + "," +
133         adcRefl + "," + nf(voltRefl,1,3) + "," + nf(percRefl,1,2)
134     );
135     t++;
136 }
137 }
138
139 void exit() {
140     output.flush();
141     output.close();
142     super.exit();
143 }

```

.3 Código de python para la captura de imágenes

Listing 3: Código de captura de imágenes de la raspberry

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  """
3  ANALIZADOR DE MUESTRAS PARA PI CAMERA
4  Version especifica para camara oficial Raspberry Pi
5  """
6
7  import os
8  import json
9  import numpy as np
10 from datetime import datetime

```

```

11 import time
12 from picamera2 import Picamera2
13 from libcamera import controls
14
15 class AnalizadorPiCamera:
16     def __init__(self):
17         self.directorio = os.path.expanduser("~/muestras_picamera")
18         os.makedirs(self.directorio, exist_ok=True)
19
20     # Inicializar Pi Camera
21     self.picam2 = None
22     self.inicializar_camara()
23
24     print(f" Directorio: {self.directorio}")
25     print(f" Camara: Raspberry Pi Camera (CSI)")
26
27     def inicializar_camara(self):
28         """Inicializar la Pi Camera"""
29         try:
30             self.picam2 = Picamera2()
31
32             # Configuración para captura de alta calidad
33             config = self.picam2.create_still_configuration(
34                 main={"size": (1920, 1080), "format": "RGB888"},
35                 buffer_count=2
36             )
37
38             self.picam2.configure(config)
39             self.picam2.start()
40
41             # Ajustes automaticos

```

```

42     self.picam2.set_controls({"AfMode": controls.AfModeEnum.
        Continuous}))
43
44     # Tiempo para estabilizar
45     time.sleep(2)
46
47     print(" Pi Camera inicializada y lista")
48     return True
49
50     except Exception as e:
51     print(f" Error inicializando Pi Camera: {e}")
52     print("\nSolucionar con:")
53     print("1. sudo raspi-config -> Interface -> Camera -> Enable")
54     print("2. sudo reboot")
55     return False
56
57     def capturar_muestra(self, nombre_personalizado=None):
58     """Capturar muestra con Pi Camera"""
59     if not self.picam2:
60     print(" Camara no inicializada")
61     return None
62
63     print("\n CAPTURANDO MUESTRA...")
64     print("     Ajusta el enfoque y la iluminacion")
65     input("     Presiona ENTER para capturar...")
66
67     try:
68     # Capturar imagen
69     frame = self.picam2.capture_array()
70
71     # Crear nombre de archivo
72     if nombre_personalizado:

```

```

73     filename = f"{nombre_personalizado}.jpg"
74     else:
75         timestamp = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
76         filename = f"muestra_{timestamp}.jpg"
77
78     filepath = os.path.join(self.directorio, filename)
79
80     # Guardar imagen (usando OpenCV o PIL)
81     try:
82         import cv2
83         frame_bgr = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_RGB2BGR)
84         cv2.imwrite(filepath, frame_bgr)
85     except:
86         from PIL import Image
87         img = Image.fromarray(frame)
88         img.save(filepath)
89
90     print(f" Muestra guardada: {filename}")
91     print(f"    Resolucion: {frame.shape[1]}x{frame.shape[0]} px")
92
93     return filepath
94
95     except Exception as e:
96         print(f" Error capturando: {e}")
97         return None
98
99     def analizar_muestra(self, imagen_path):
100         """Analizar muestra capturada"""
101         print(f"\n ANALIZANDO: {os.path.basename(imagen_path)}")
102
103         # Cargar imagen
104         try:

```

```

105 import cv2
106 img = cv2.imread(imagen_path)
107 if img is None:
108     print(" No se pudo cargar la imagen")
109     return None
110 except:
111     from PIL import Image
112     img_pil = Image.open(imagen_path)
113     img = np.array(img_pil)
114
115     altura, ancho = img.shape[:2]
116     print(f" Tamano: {ancho}x{altura} px")
117
118     # ANaLISIS DE COLOR
119     print("\n ANaLISIS DE COLOR:")
120
121     if len(img.shape) == 3:
122         # Convertir a diferentes espacios de color
123         hsv = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2HSV)
124         lab = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2LAB)
125
126         # Promedios
127         bgr_avg = np.mean(img, axis=(0, 1))
128         hsv_avg = np.mean(hsv, axis=(0, 1))
129
130         print(f"    Color promedio BGR: [{bgr_avg[0]:.0f}, {bgr_avg[1]:.0f}, {bgr_avg[2]:.0f}]")
131         print(f"    Color promedio HSV: [{hsv_avg[0]:.0f}, {hsv_avg[1]:.0f}, {hsv_avg[2]:.0f}]")
132
133         # Distribucion de color dominante
134         hue_channel = hsv[:, :, 0]

```

```

135 hist_hue = np.histogram(hue_channel, bins=12, range=(0, 180))
    [0]
136 color_idx = np.argmax(hist_hue)
137 colores = ["Rojo", "Naranja", "Amarillo", "Verde", "Cian", "
    Azul", "Violeta", "Magenta"]
138 color_dom = colores[color_idx % len(colores)]
139 print(f"    Color dominante: {color_dom}")
140 else:
141     print("    Imagen en escala de grises")
142     bgr_avg = [np.mean(img), np.mean(img), np.mean(img)]
143
144     # ANALISIS DE BRILLO Y CONTRASTE
145     print("\n BRILLO Y CONTRASTE:")
146     if len(img.shape) == 3:
147         gris = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
148     else:
149         gris = img
150
151     brillo = np.mean(gris)
152     contraste = np.std(gris)
153
154     print(f"    Brillo promedio: {brillo:.1f}/255")
155     print(f"    Contraste: {contraste:.1f}")
156
157     # DETECCION DE BORDES
158     print("\n DETECCION DE BORDES:")
159     bordes = cv2.Canny(gris, 50, 150)
160     area_bordes = np.sum(bordes > 0)
161     porcentaje_bordes = (area_bordes / bordes.size) * 100
162
163     print(f"    Area con bordes: {areabordes} px")
164     print(f"    Porcentaje: {porcentaje_bordes:.1f}%")

```



```

165
166 # DETECCION DE CONTORNOS
167 print("\n DETECCION DE CONTORNOS:")
168 contornos, _ = cv2.findContours(bordes, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.
    CHAIN_APPROX_SIMPLE)
169
170 print(f"    Contornos detectados: {len(contornos)}")
171
172 if contornos:
173     areas = [cv2.contourArea(c) for c in contornos]
174     print(f"    Area mayor: {max(areas):.0f} px")
175     print(f"    Area menor: {min(areas):.0f} px")
176     print(f"    Area total: {sum(areas):.0f} px")
177
178 # GUARDAR RESULTADOS
179 resultados = {
180     "fecha": datetime.now().isoformat(),
181     "archivo": imagen_path,
182     "camara": "Raspberry Pi Camera (CSI)",
183     "dimensiones": f"{ancho}x{altura}",
184     "color_promedio_bgr": [float(x) for x in bgr_avg],
185     "brillo": float(brillo),
186     "contraste": float(contraste),
187     "area_bordes": int(area_bordes),
188     "porcentaje_bordes": float(porcentaje_bordes),
189     "num_contornos": len(contornos),
190     "observaciones": self.generar_observaciones(brillo, contraste
        , porcentaje_bordes)
191 }
192
193 # Guardar JSON
194 json_path = imagen_path.replace('.jpg', '_analisis.json')

```

```

195     with open(json_path, 'w') as f:
196         json.dump(resultados, f, indent=2)
197
198     # Guardar imagen con contornos
199     if contornos:
200         img_contornos = img.copy()
201         cv2.drawContours(img_contornos, contornos, -1, (0, 255, 0), 2)
202         contornos_path = imagen_path.replace('.jpg', '_contornos.jpg')
203         cv2.imwrite(contornos_path, img_contornos)
204         print(f"    Imagen con contornos: {contornos_path}")
205
206     print(f"\n Resultados guardados en: {json_path}")
207
208     return resultados
209
210     def generar_observaciones(self, brillo, contraste, bordes):
211         """Generar observaciones automaticas"""
212         observaciones = []
213
214         if brillo < 50:
215             observaciones.append("Muestra poco iluminada")
216         elif brillo > 200:
217             observaciones.append("Muestra sobreexpuesta")
218         else:
219             observaciones.append("Iluminacion adecuada")
220
221         if contraste < 30:
222             observaciones.append("Bajo contraste")
223         elif contraste > 100:
224             observaciones.append("Alto contraste")
225
226         if bordes < 5:

```

```

227 observaciones.append("Pocos detalles detectados")
228 elif bordes > 30:
229 observaciones.append("Muchos detalles detectados")
230
231 return observaciones
232
233 def menu_principal(self):
234     """Menu interactivo"""
235     while True:
236         print("\n" + "="*50)
237         print(" ANALIZADOR PI CAMERA")
238         print("="*50)
239         print("1. Capturar nueva muestra")
240         print("2. Analizar ultima muestra")
241         print("3. Ver todas las muestras")
242         print("4. Ajustar configuracion camara")
243         print("5. Salir")
244         print("="*50)
245
246         opcion = input("\nSelecciona opcion (1-5): ").strip()
247
248         if opcion == "1":
249             nombre = input("Nombre personalizado (dejar vacio para
                automatico): ").strip()
250             muestra = self.capturar_muestra(nombre if nombre else None)
251             if muestra:
252                 self.analizar_muestra(muestra)
253
254         elif opcion == "2":
255             archivos = [f for f in os.listdir(self.directorio)
256                 if f.endswith('.jpg') and not f.endswith('_contornos.jpg')]
257

```

```

258     if archivos:
259         archivos.sort(reverse=True)
260         ultima = os.path.join(self.directorio, archivos[0])
261         self.analizar_muestra(ultima)
262     else:
263         print(" No hay muestras para analizar")
264
265     elif opcion == "3":
266         print(f"\n MUESTRAS EN {self.directorio}:")
267         archivos = sorted([f for f in os.listdir(self.directorio)
268             if f.endswith('.jpg') and not f.endswith('_contornos.jpg')])
269
270         for i, archivo in enumerate(archivos, 1):
271             ruta = os.path.join(self.directorio, archivo)
272             tamano = os.path.getsize(ruta)
273             fecha = datetime.fromtimestamp(os.path.getmtime(ruta))
274
275             print(f"\n   {i}. {archivo}")
276             print(f"           Tamano: {tamano:,} bytes")
277             print(f"           Fecha: {fecha.strftime('%Y-%m-%d %H:%M')}")
278
279     elif opcion == "4":
280         self.ajustar_configuracion()
281
282     elif opcion == "5":
283         print("\n Cerrando camara y saliendo...")
284         if self.picam2:
285             self.picam2.stop()
286         break
287
288     else:
289         print(" Opcion no valida")

```

```

290
291 def ajustar_configuracion(self):
292     """Ajustar configuracion de la camara"""
293     if not self.picam2:
294         print(" Camara no inicializada")
295         return
296
297     print("\n AJUSTES DE CAMARA:")
298     print("1. Resolucin")
299     print("2. Modo de enfoque")
300     print("3. Volver")
301
302     opcion = input("Selecciona: ").strip()
303
304     if opcion == "1":
305         print("\n RESOLUCIONES DISPONIBLES:")
306         print("1. 640x480 (VGA)")
307         print("2. 1280x720 (HD)")
308         print("3. 1920x1080 (Full HD)")
309         print("4. 2028x1520 (3MP)")
310
311         res_opcion = input("Selecciona resolucion: ").strip()
312
313         resoluciones = {
314             "1": (640, 480),
315             "2": (1280, 720),
316             "3": (1920, 1080),
317             "4": (2028, 1520)
318         }
319
320         if res_opcion in resoluciones:
321             ancho, alto = resoluciones[res_opcion]

```

```

322     try:
323     self.picam2.stop()
324     config = self.picam2.create_still_configuration(
325     main={"size": (ancho, alto), "format": "RGB888"}
326     )
327     self.picam2.configure(config)
328     self.picam2.start()
329     time.sleep(1)
330     print(f" Resolucion cambiada a: {ancho}x{alto}")
331     except Exception as e:
332     print(f" Error: {e}")
333     else:
334     print(" Opcion no valida")
335
336     elif opcion == "2":
337     print("\n MODOS DE ENFOQUE:")
338     print("1. Automatico continuo")
339     print("2. Manual")
340
341     focus_opcion = input("Selecciona modo: ").strip()
342
343     if focus_opcion == "1":
344     self.picam2.set_controls({"AfMode": controls.AfModeEnum.
345         Continuous})
346     print(" Enfoque automatico activado")
347     elif focus_opcion == "2":
348     self.picam2.set_controls({"AfMode": controls.AfModeEnum.Manual
349         })
350     print(" Modo manual activado")
351     else:
352     print(" Opcion no valida")

```

```
352     if __name__ == "__main__":
353         print(" INICIANDO ANALIZADOR PARA PI CAMERA")
354         print("      " + datetime.now().strftime("%Y-%m-%d"))
355
356         analizador = AnalizadorPiCamera()
357
358         if analizador.picam2:
359             analizador.menu_principal()
```

Bibliografía

- [1] I. Santoso, S. A. Mustaniroh, and A. Choirun, “Methods for quality coffee roasting degree evaluation: A literature review on risk perspective,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 924, 2021, p. 012058.
- [2] L. Munyendo, D. Njoroge, and B. Hitzmann, “The potential of spectroscopic techniques in coffee analysis—a review,” *Processes*, vol. 10, no. 1, p. 71, 2022, accessed: 2026.
- [3] L. Huang, M. Liu, B. Li, B. Chitrakar, and X. Duan, “Terahertz spectroscopic identification of roast degree and variety of coffee beans,” *Foods*, vol. 13, no. 3, p. 389, 2024.
- [4] G. M. R. N. Alcantara *et al.*, “Effect of roasting on chemical composition of coffee,” *Food Chemistry*, 2025, roasting plays a crucial role in determining characteristics and sensory properties of coffee. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814625004194>
- [5] F. O. Díaz, “Efecto de la tostión del café (coffea arabica l.) sobre atributos de calidad,” 2018, sciELO. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000400031&script=sci_arttext
- [6] K. F. Ting, “Effect of coffee roasting on the cupping quality of coffee,” 2024. [Online]. Available: <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/2174>
- [7] J. Alstrup, “The effect of roast development time modulations on chemical and sensory coffee properties,” *Beverages*, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2306-5710/6/4/70>
- [8] W. contributors, “Coffee cupping,” 2025, practice of observing the tastes and aromas of brewed coffee. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Coffee_cupping
- [9] M. Münchow, “Roasting conditions and coffee flavor: A multi-study analysis,” *Beverages*, 2020, comparison of color and time as traditional predictors of sensory properties. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2306-5710/6/2/29>

- [10] W. K., “Near-infrared spectroscopy as tool to predict coffee roasting degree,” 2022, relationship between roasting variables and conventional analytical variables. [Online]. Available: <https://jfrm.ru/files/archive/21/W%C3%B3jcicki.pdf>
- [11] ResearchGate, “Comparison of results from cupping and descriptive sensory analysis,” *Sensory evaluation comparative study*, 2000, comparison of cupping and descriptive sensory methods showing limitations. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/264791895_Comparison_of_Results_from_Cupping_and_Descriptive_Sensory_Analysis_of_Colombian_Brewed_Coffee
- [12] J. D. Wilson, A. J. Buffa, and B. Lou, *College Physics*, 6th ed. Pearson Education, 2007.
- [13] J. R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, 3rd ed. Springer, 2006.
- [14] R. M. Silverstein, F. X. Webster, D. J. Kiemle, and D. L. Bryce, *Spectrometric Identification of Organic Compounds*, 8th ed. Wiley, 2014.
- [15] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Wiley, 2007.
- [16] H. Cen and Y. He, “Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 72–83, 2007.
- [17] J. G. Webster, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press, 2010.
- [18] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge University Press, 2015.
- [19] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*, 5th ed. Springer, 2016.
- [20] Specialty Coffee Association, “Official cupping standards,” 2024. [Online]. Available: <https://sca.coffee/sca-news/sca-new-cva-cupping-standards>

- [21] I. A. Ludwig *et al.*, “Effect of sugar addition during roasting on antioxidant capacity of coffee,” *LWT - Food Science and Technology*, 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364381200494X>
- [22] M. Kharbach, M. A. Mansouri, M. Taabouz, and H. Yu, “Current application of advancing spectroscopy techniques in food analysis: Data handling with chemometric approaches,” *Foods*, vol. 12, no. 14, p. 2753, 2023.
- [23] N. Z. Rao and M. E. Fuller, “Physiochemical characteristics of hot and cold brew coffee chemistry: The effects of roast level and brewing temperature on compound extraction,” *Foods*, vol. 9, no. 7, p. 902, 2020.
- [24] S. E. Yeager, M. E. Batali, L. X. Lim, J. Liang, J. Han, A. N. Thompson, J.-X. Guinard, and W. D. Ristenpart, “Roast level and brew temperature significantly affect the color of brewed coffee,” *Journal of Food Science*, vol. 87, no. 4, pp. 1837–1850, 2022.
- [25] C. I. Gamboa-Gómez, J. Barragán-Zúñiga, M. D. Herrera, M. Alongi, N. E. Rocha-Guzmán, D. Dominguez, K. F. Valles-Araiza, M. Anese, M. Rodríguez-Morán, and F. Guerrero-Romero, “Influence of coffee roasting degree from four mexican regions on in vitro antioxidant activity and digestive enzyme inhibition and its in vivo effects on carbohydrate and lipid absorption,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 26, no. 20, p. 10067, 2025.
- [26] ASTM International, “Astm e275: Standard practice for describing and measuring performance of ultraviolet and visible spectrophotometers,” 2022, accessed 2026-02-11.
- [27] C. Pizarro, J. M. González-Sáiz, and I. Esteban-Díez, “Use of near-infrared spectroscopy and feature selection techniques for predicting the caffeine content and roasting color in roasted coffees,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 55, no. 18, pp. 7477–7488, 2007.
- [28] J. S. Ribeiro *et al.*, “Chemometric models for the quantitative descriptive sensory analysis of arabica coffee beverages using near infrared spectroscopy,” *Food Chemistry*, 2011.

- [29] L. Munyendo *et al.*, “Monitoring a coffee roasting process based on near-infrared and raman spectroscopy,” *Journal of Chemometrics*, 2025.
- [30] E. Maliaritsi *et al.*, “Visible-light spectroscopy and laser scattering for screening brewed coffee types using a low-cost portable platform,” *Electronics*, vol. 14, no. 18, p. 3625, 2025.
- [31] J. L. Domínguez-Juárez, R. Quintero-Torres, M. A. Cardoso-Duarte, M. A. Quiroz-Juárez, J. L. Aragón, and J. Villatoro, “Unveiling the properties of liquids via photothermal-induced diffraction patterns,” *Communications Physics*, vol. 6, p. 154, 2023.
- [32] D. A. Skoog, F. J. Holler, and S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 7th ed. Cengage Learning, 2018.
- [33] D. C. Harris, *Quantitative Chemical Analysis*, 10th ed. W. H. Freeman, 2020.
- [34] H. Cen and Y. He, “Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 72–83, 2007.
- [35] B. G. Osborne, T. Fearn, and P. H. Hindle, *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Longman Scientific & Technical, 1993.
- [36] E. Hecht, *Optics*, 5th ed. Pearson, 2017.
- [37] Fundación UNAM, “El láser y sus aplicaciones técnicas,” <https://www.fundacionunam.org.mx/unam-al-dia/el-laser-y-sus-aplicaciones-tecnicas/>, 2025, [Online; accessed 14-Feb-2026].
- [38] O. Svelto, *Principles of Lasers*, 5th ed. Springer, 2010.
- [39] Vishay Semiconductors, “Bpw34, bpw34s silicon pin photodiode, datasheet (doc. 81521),” <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>, 2011, [Online; accessed 14-Feb-2026].
- [40] Texas Instruments, “Lm358 dual operational amplifier datasheet,” <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf>, 2023, [Online; accessed 16-Feb-2026].

- [41] S. Heath, *Embedded Systems Design*. Newnes, 2012.
- [42] E. Upton and G. Halfacree, *Raspberry Pi User Guide*. Wiley, 2016.
- [43] G. C. Holst and T. S. Lomheim, *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*. SPIE Press, 2011.
- [44] J. Richardson *et al.*, “Low-cost open-source hardware for optical sensing applications,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1234, 2019.
- [45] Arduino, “Arduino uno rev3 technical specifications,” <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>, 2024, [Online; accessed 16-Feb-2026].
- [46] K. R. Beebe, R. J. Pell, and M. B. Seasholtz, *Chemometrics: A Practical Guide*. Wiley, 1998.
- [47] D. S. da Costa *et al.*, “Thermal contaminants in coffee induced by roasting: A review,” *Nutrients*, 2023. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10138461/>
- [48] A. Illy and R. Viani, *Espresso Coffee: The Science of Quality*. Elsevier Academic Press, 2005.