UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

"SISTEMA DE MEDICIÓN DE SONIDO PARA EL MONITOREO DE GRADO DE TOSTADO DE CAFÉ"

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

PROTOTIPOS INDUSTRIALES

AUTOR:

EMERSON ALBERTO INLAGO CHORLANGO

DIRECTOR:

MSC. HUGO EDUARDO SALAZAR GARCÍA

IBARRA - ECUADOR 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo de la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DEL CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD	1724840689		
APELLIDOS Y NOMBRES	Inlago Chorlango Emerson Alberto		
DIRECCIÓN	Tabacundo, José Catucuago y 28 de Abril		
EMAIL	eainlagoc@utn.edu.ec / emersoninlagoc@gmail.com		
TELÉFONO FIJO	02-2367141	**TELÉFONO MÓVIL**	0997341037

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	Sistema de medición de sonido para el monitoreo de grado de tostado de café
AUTORA	Inlago Chorlango Emerson Alberto
FECHA	12 de mayo del 2025
PROGRAMA	■ Grado ☐ Posgrado
TÍTULO POR EL QUE OPTA	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR /ASESOR	Ing. Hugo Eduardo Salazar García, MSc Ing. Rosero Chandi Carlos Xavier, Dr.

CONSTANCIA

El autor asegura que la obra en cuestión es completamente original y fue creada sin infringir los derechos de autor de terceros. Por lo tanto, se considera la legitima propiedad de los derechos de la obra y asume la responsabilidad total sobre su contenido. Además, se compromete a defender a la Universidad en caso de que surjan reclamos por partes de terceros.

Ibarra, a los 12 días del mes de mayo del 2025

AUTOR:

(f).....

Emerson Alberto Inlago Chorlango

C.I.: 1724840689

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 12 de mayo de 2025

Msc. Hugo Eduardo Salazar García

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f).....

Msc. Hugo Eduardo Salazar García

C.C.: 1002582177

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "SISTEMA DE MEDICIÓN DE SONIDO PARA EL MONITOREO DE GRADO DE TOSTADO DE CAFÉ" elaborado por EMERSON ALBERTO INLAGO CHORLANGO, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte.

(f).....

Msc. Hugo Eduardo Salazar García
C.C.: 1002582177

(f).....

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi
C.C.: 1002515821

DEDICATORIA

A mi familia,

E*ntregaron lo mejor de ustedes, sin pedir nada a cambio.*

M*e enseñaron que el sacrificio no es pérdida, sino semilla de grandes frutos.*

I*nspiraron cada paso mío con su ejemplo de resiliencia y amor incondicional.*

L*o dieron todo, incluso cuando yo no siempre supe valorarlo.*

Y *hoy, este sueño es nuestro, porque sin su apoyo, nada de esto habría sido posible.*

Gracias por ser mi fortaleza y mi razón.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación, por el apoyo académico y los recursos proporcionados durante todo el proceso. La institución ha sido un pilar fundamental en mi desarrollo profesional y personal, permitiéndome alcanzar este importante logro.

De manera especial, agradezco a mi tutor Ing. Hugo Salazar, Msc., por su apoyo y dedicación a lo largo de este proceso. Su paciencia y consejos fueron cruciales para superar los desafíos que surgieron durante la investigación. Agradezco profundamente su compromiso y orientación, que me permitió avanzar y completar este trabajo.

RESUMEN

Este estudio aborda el desarrollo de un sistema de medición acústica para monitoreo del grado de tostado del café, basado en la detección de los eventos acústicos llamados primer crack y segundo crack, los cuales son utilizados como indicativo del desarrollo del tueste. El sistema propuesto integra un micrófono INMP441, un microcontrolador ESP32 y un módulo semáforo LED. La metodología constó de tres etapas principales. Primero, se llevó a cabo la caracterización acústica mediante una configuración experimental, permitiendo establecer rangos de frecuencia y repetitividad. Segundo, se realizó la selección de componentes utilizando un análisis multicriterio. Tercero, se diseñó e implementó un algoritmo de detección y clasificación de cracks para distinguir el primer crack del segundo crack. Este algoritmo fue validado en Python y adaptado a las capacidades del microcontrolador. Además, de una lógica simple para diferenciar el tueste claro (primer crack) y tueste oscuro (segundo crack). El sistema se validó bajo las mismas condiciones y con la misma materia prima utilizada en la etapa de caracterización inicial. Las pruebas demostraron un desempeño consistente y replicable, confirmando la funcionalidad del sistema para el monitoreo del grado de tostado del café. Si bien el sistema es operativo, se recomienda integrar variables como temperatura y tiempo de tueste para optimizar su precisión en aplicaciones prácticas.

Palabras Clave: Grado de tueste, Monitoreo acústico, Primer Crack, Segundo Crack, Frecuencia, Repetibilidad.

ABSTRACT

This study addresses the development of an acoustic measurement system for monitoring the degree of coffee roasting, based on the detection of acoustic events known as the first crack and second crack, which are used as indicators of the roasting process. The proposed system integrates an INMP441 microphone, an ESP32 microcontroller, and an LED semaphore module. The methodology consisted of three main stages. First, acoustic characterization was carried out through an experimental setup, allowing the establishment of frequency ranges and repeatability. Second, component selection was performed using a multi-criteria analysis. Third, an algorithm for crack detection and classification was designed and implemented to distinguish the first crack from the second crack. This algorithm was validated in Python and adapted to the microcontroller's capabilities. Additionally, a simple logic was incorporated to differentiate between light roast (first crack) and dark roast (second crack). The system was validated under the same conditions and with the same raw material used in the initial characterization stage. The tests demonstrated consistent and replicable performance, confirming the system's functionality for monitoring the degree of coffee roasting. While the system is operational, it is recommended to integrate variables such as temperature and roasting time to optimize its accuracy in practical applications.

Keywords: Roasting degree, Acoustic monitoring, First Crack, Second Crack, Frequency, Repeatability.

ÍNDICE DE CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA I

CONSTANCIA II

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR III

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR IV

DEDICATORIA V

AGRADECIMIENTOS VI

RESUMEN VII

ABSTRACT VIII

ÍNDICE DE CONTENIDO IX

ÍNDICE DE FIGURAS XV

ÍNDICE DE TABLAS XVII

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del Problema 1

1.2 Objetivos 2

1.2.1 Objetivo General 2

1.2.2 Objetivos Específicos 2

1.3 Justificación 2

1.4 Alcance 3

CAPÍTULO II - MARCO REFERENCIAL 4

2.1 Antecedentes 4

2.2 Tostado de café 5

2.2.1 Fases del Proceso de Tostado 6

2.2.2 Tipos de Tueste 7

2.2.2.1 Tueste Claro. 7

2.2.2.2 Tueste medio. 7

2.2.2.3 Tueste Oscuro. 7

2.2.3 Acústica Durante El Proceso De Tostado 8

2.2.3.1 Primer Crack. 8

2.2.3.2 Segundo Crack. 9

2.2.4 Fundamentos Acústicos 9

2.2.4.1 Sonido. 9

2.2.5 Caracterización del Sonido 11

2.2.5.1 Ponderación. 11

2.2.5.2 Análisis por Bandas de Frecuencia. 12

2.3 Procesamiento Digital de Señales (DSP) 13

2.3.1.1 Fundamentos del DSP. 13

2.3.1.2 Técnicas de DSP en Audio. 14

CAPÍTULO III - MARCO METODOLÓGICO 16

3.1 Método de la Investigación 16

3.2 Diseño de la Investigación 16

3.2.1 Fase 1: Adquisición de Información 17

3.2.2 Fase 2: Diseño del Sistema Acústico 17

3.2.3 Fase 3: Construcción del Dispositivo 18

3.2.4 Fase 4: Pruebas de Funcionamiento 18

CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y ANÁLISIS 19

4.1 Recolección de Datos del Proceso de Tostado 19

4.1.1 Materiales y Configuración Experimental 19

4.1.1.1 Materiales Utilizados. 19

4.1.1.2 Configuración de Grabación en Audacity. 19

4.1.1.3 Justificación del Proceso Experimental. 20

4.2 Identificación y Caracterización de los Sonidos del proceso de Tostado 21

4.2.1 Análisis Inicial de la Forma de Onda del Primer y Segundo Crack 21

4.2.2 Análisis Espectral de los Sonidos del Proceso de Tostado 24

4.2.3 Resumen de los Resultados Acústicos 27

4.3 Requerimientos del Sistema 28

4.3.1 Requerimientos Funcionales 28

4.3.2 Requerimientos Técnicos 28

4.4 Selección de Protocolo y Hardware 29

4.4.1 Selección del Protocolo 29
4.4.1.1 Inter-IC Sound Bus (I2S). 29
4.4.1.2 Circuito Inter-Integrado (I2C). 30
4.4.1.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. 30
4.4.2 Selección de la Unidad de Procesamiento 34
4.4.2.1 ESP32-WROOM-32D. 34
4.4.2.2 STM32H7. 36
4.4.2.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. 37
4.4.3 Selección del Micrófono 41
4.4.3.1 INMP441 41
4.4.3.2 SPH0645LM4H. 42
4.4.3.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. 42
4.4.4 Selección de la Visualización 46
4.4.4.1 Módulo Semáforo LED. 46
4.4.4.2 Pantalla OLED 128×64. 47
4.4.4.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. 47
4.4.5 Solución Mediante Criterios Ponderados 51
4.5 Desarrollo y Diseño del Hardware 52
4.5.1 Diagrama de Funcionamiento del Sistema de Monitoreo Acústico 52
4.5.2 Diagrama de Conexión del Hardware 54

4.5.3 Análisis Energético 56

4.5.3.1 Cálculo del Consumo de Corriente. 56

4.5.3.2 Verificación de la Fuente de Alimentación. 57

4.5.4 Diseño de Caja Contenedora para el Sistema de Medición de Sonido para el Monitoreo del Tostado de Café 57

4.6 Desarrollo del Algoritmo e Implementación 58

4.6.1 Diseño del Algoritmo en Python 58

4.6.1.1 Validación del Algoritmo. 59

4.6.1.2 Diagrama Funcional del Algoritmo. 62

4.6.2 Implementación del Algoritmo 63

4.6.2.1 Configuración Técnica y Adquisición de Señales. 63

4.6.2.2 Procesamiento Digital de Señales. 64

4.6.2.3 Detección de Cracks. 64

4.6.2.4 Determinación del Grado de Tostado 65

4.6.2.5 Visualización y Control del Proceso. 65

4.6.2.6 Diagrama Funcional del Algoritmo Implementado. 66

4.7 Análisis de Costos 68

4.8 Pruebas de Funcionamiento 69

4.8.1 Prueba 1: Identificación del Primer y Segundo Crack 70

4.8.2 Prueba 2: Detección del Tueste Claro 73

4.8.3 Prueba 3: Detección del Tueste Oscuro 75

CAPITULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 77

5.1 CONCLUSIONES 77

5.2 RECOMENDACIONES 79

BIBLIOGRAFÍA 80

ANEXOS 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Fases del Proceso de Tostado [13]. 6

Figura 2.2 Escala de Tueste del Café [15]. 8

Figura 2.3 Audiograma Tonal en Relación con la Edad de una Persona [23]. 11

Figura 2.4 Curvas de Ponderación A, B y C [27]. 12

Figura 2.5 Octavas de Frecuencia [20] 13

Figura 2.6 Vista de una Señal en el Dominio del Tiempo y la Frecuencia [35]. 14

Figura 2.7 Filtros de Frecuencia: a. Pasa Bajo, b. Pasa Alto, c. Pasa Banda y d. Rechaza Banda [32]. 15

Figura 4.1 Grabación del Proceso de Tostado del Café Especie Arábiga en Audacity (Configuración Experimental) – Tueste 1. 20

Figura 4.2 Identificación de los Picos Asociados al Primer Crack y Segundo Crack (Tueste 1). 21

Figura 4.3 Identificación de los Picos Asociados al Primer Crack y Segundo Crack (Tueste 2). 22

Figura 4.4 Espectrograma en Audacity del Tueste 1 – Audio segmentado en ruido de fondo, primer crack y segundo crack. 24

Figura 4.5 Espectro del ruido de fondo del Tueste 2 y Tueste 2 con su frecuencia dominante. 25

Figura 4.6 Diagrama de Funcionamiento del Sistema de Medición de Sonido para Monitoreo del Grado de Tostado de Café. 53

Figura 4.7 Diagrama de Conexión del Sistema de Monitoreo Acústico para Monitoreo del Grado de Tostado de Café. 54

Figura 4.8 Caja Contenedora para el Sistema de Medición Acústica para el Monitoreo de Grado de Tostado de Café. 57

Figura 4.9 Validación del Algoritmo en Etapa Inicial del Primer Crack - Fragmento Perteneciente al Tueste 3 con Identificación Correcta. 60

Figura 4.10 Validación del Algoritmo en Etapa Media del Segundo Crack - Fragmento Perteneciente al Tueste 4 con Identificación Correcta. 60

Figura 4.11 Diagrama de Flujo del Algoritmo en Python para la Identificación del Primer y Segundo Crack. 62

Figura 4.12 Diagrama de Etapa de Adquisición y Filtrado del Sistema de Medición Acústica para el Monitoreo del Grado de Tostado de Café. 66

Figura 4.13 Diagrama de Flujo del Sistema de Clasificación de Cracks e Identificación del Tueste Claro y Oscuro. 67

Figura 4.14 Posicionamiento del Sistema de Medición Acústica para el Monitoreo del Grado de Tostado de Café. 69

Figura 4.15 Muestras Tostadas Después de la Identificación del Primer y Segundo crack. 71

Figura 4.16 Muestras Después de la Identificación del Tueste Claro. 74

Figura 4.17 Muestras Después de la Identificación del Tueste Oscuro. 76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Datos Comparativos de los Procesos de Tostado en Función de los Cracks (Tueste 1 y Tueste 2). 23

Tabla 4.2 Distribución Frecuencial de Picos Asociados al Primer Crack (Tueste 1 y Tueste 2). 26

Tabla 4.3 Distribución Frecuencial de Picos Asociados al Segundo Crack (Tueste 1 y Tueste 2). 26

Tabla 4.4 Caracterización de Eventos Acústicos Durante el Proceso de Tostado de Café: Frecuencias, Tasa de Ocurrencia Media y Observaciones. 27

Tabla 4.5 Características del Protocolo I2S [43], [44]. 29

Tabla 4.6 Características del Protocolo I2C [45]. 30

Tabla 4.7 Evaluación de Protocolos por Criterios Ponderados. 31

Tabla 4.8 Ponderación de las Alternativas para el Criterio de Aplicación. 32

Tabla 4.9 Ponderación de las Alternativas para el criterio Velocidad de Transmisión..... 32

Tabla 4.10 Ponderación de las Alternativas para el Criterio Número de Líneas..... 33

Tabla 4.11 Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Protocolos..... 33

Tabla 4.12 Características del ESP32-WROOM-32D [46], [47], [48]. 35

Tabla 4.13 Características del STM32H7 [49]. 36

Tabla 4.14 Evaluación de la Unidad de Procesamiento por Criterios Ponderados. 37

Tabla 4.15 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Velocidad I2S. 38

Tabla 4.16 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Facilidad de Programación. 39

Tabla 4.17 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Costo. 39

Tabla 4.18 Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Unidad de Procesamiento. 40

Tabla 4.19 Características del Micrófono Omnidireccional INMP441 [50]. 41

Tabla 4.20 Características del Micrófono PH0645LM4H-B [51]. 42

Tabla 4.21 Evaluación de Micrófono por Criterios Ponderados. 43

Tabla 4.22 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Respuesta de Frecuencia. . 44

Tabla 4.23 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Consumo de Corriente. 44

Tabla 4.24 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Costo. 45

Tabla 4.25 Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Micrófonos. 45

Tabla 4.26 Características del Módulo Semáforo LED. 46

Tabla 4.27 Características de la Pantalla Oled 128x64. 47

Tabla 4.28 Evaluación de Visualización por Criterios Ponderados. 48

Tabla 4.29 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Visibilidad. 49

Tabla 4.30 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Facilidad de Implementación. 49

Tabla 4.31 Ponderación de Alternativas según el Criterio de Costo. 50

Tabla 4.32 Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Visualización. 51

Tabla 4.33 Conexión de Pines al ESP32 (ESP32-WROOM-32D). 55

Tabla 4.34 Resultados de la Validación del Algoritmo para la Identificación del Primer Crack. 61

Tabla 4.35 Resultados de la Validación del Algoritmo para la Identificación del Segundo Crack. 61

Tabla 4.36 Costos Totales del Sistema de Medición Acústica para el Monitore de Grado de Tostado de Café..... 68

Tabla 4.37 Procedimiento para la Identificación del Primer y Segundo Crack. 70

Tabla 4.38 Resultados de la prueba 1: Identificación del Primer y Segundo crack. 71

Tabla 4.39 Procedimiento para la Identificación del Tueste Claro. 73

Tabla 4.40 Resultados de la Prueba 2: Identificación del Tueste Claro. 74

Tabla 4.41 Procedimiento para la Identificación del Tueste Oscuro. 75

Tabla 4.42 Resultados de la Prueba 3: Identificación del Tueste Oscuro. 76

1. CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

En Ecuador, el café es parte de la identidad nacional, es uno de los productos más antiguos, así mismo desempeñan un papel importante en la económica, este cultivo está presente desde la provincia de Loja hasta el Carchi, inclusive se encuentra en las Islas Galápagos [1].

Los granos de café verde necesariamente deben tener un proceso térmico para que liberar aroma y sabor a través de sustancias químicas como la cafeína, fructosa, sacarosa entre otras. Por lo tanto, el tostado es considerado la etapa más crítica en la producción de café, debido a que sufre cambios físicos y químicos. Los parámetros de interés en este proceso son la temperatura y tiempo, los mismos deben ser cuidadosamente controlados para obtener una calidad de café tostado. Empleando una misma materia prima y cantidad de granos, y con diferentes combinaciones de temperatura y tiempo, el café resultante tiene cambios físicos, químicos y sensoriales [2].

Existen dos sonidos característicos que se producen durante el proceso de tostado, denominados como primer y segundo crack. El primer crack puede indicar un tueste claro o un tueste medio, sonido con similitud al canguil cuando revienta. El segundo crack señala un tueste oscuro, un sonido mucho más agudo [3]. Actualmente, la identificación del grado del café tostado se realiza en gran medida de forma manual, basándose en los sonidos característicos que estos emiten durante el proceso. Este método pone una gran responsabilidad en la agudeza auditiva del tostador. Sin embargo, puede dar lugar a errores, especialmente cuando el tostador es inexperto. Estos errores pueden llevar a un desconocimiento del grado de tostado, inclusive a la inutilización del grano de café, ya que el tostado es un proceso irreversible.

Se planea implementar un sistema de medición acústica para mejorar la precisión en la identificación del grado de tostado. Este sistema contribuirá al conocimiento del grado de tostado,

proporcionando al tostador un parámetro adicional que le permitirá minimizar errores al determinar el grado de tostado del café.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de medición acústica para el monitoreo de grado de tostado en el café.

1.2.2 Objetivos Específicos

Determinar los requisitos de diseño para un sistema de medición acústica capaz de identificar el grado de tostado del café durante el proceso de tueste.

Diseñar el sistema de medición acústica de acuerdo con los requerimientos.

Construir el sistema de medición acústica.

Validar el sistema acústico en una tostadora de café real.

1.3 Justificación

Esta investigación surge de la necesidad de abordar un vacío en el conocimiento teórico en Ecuador. Aunque existen estudios previos a nivel internacional sobre la identificación del grado de tostado del café mediante su acústica, hasta el momento no se han realizado investigaciones específicas en el país.

La implementación de medición de sonido para la identificación del grado de tueste de café durante el proceso de tueste contribuirá en el mejoramiento de la calidad de café tostado. Los resultados permitirán la inclusión de una variable crítica que, contribuirá significativamente en la precisión de un sistema de tostado automatizado en el futuro, así como al mejoramiento de procesos agroindustriales.

1.4 Alcance

Este proyecto tiene como finalidad desarrollar un sistema de medición de sonido para monitorear el grado de tostado del café. Para esto, se seleccionarán los componentes que cumplan con los requerimientos del diseño, luego se construirá el sistema de medición acústica y finalmente, la evaluación de los resultados probando el sistema de monitoreo en una tostadora de café real.

2. CAPÍTULO II - MARCO REFERENCIAL

2.1 Antecedentes

Este trabajo está fundamentado por medio de información existente, acerca de la influencia del sonido en el proceso de tostado de café.

Siebald, Möller, Lenz, Kirchner y Hensel [4] realizaron una investigación sobre la acústica durante el proceso del tostado de café, realizaron un experimento empleando dos micrófonos situados frente a un tostador de tambor (Hottop KN-8828B- 2K+), tomaron mediciones de la presión acústica en cinco distintos tuestes, seguido de un análisis. Los resultados, arrojaron que se puede emplear un análisis sonoro para medir la proporción de granos partidos.

Wibowo, Munandar, Mahendra, Josary, Ningrum y Sejati [5] en Indonesia desarrollaron un tostador de café inteligente. Analizaron estudios previos, para obtener las especificaciones del tostador, de modo que emplearon sensores de sonido, temperatura y un microcontrolador para la gestión del sistema. Aplicaron inteligencia artificial para detectar la madurez de los granos de café y el sonido del crack, obteniendo resultados favorables.

Wibowo *et al* [6] desarrollaron en Indonesia un modelo de aprendizaje autónomo para la detección del agrietamiento de los granos del café durante el proceso de tostado. Para esto, emplearon videos del proceso de tostado de internet, separando el audio en donde se está resquebrajándose los granos de café, posteriormente los convirtieron en formato de imagen usando MFCC, para utilizarlos en una red neuronal convolucional (CNN). Llegaron a obtener una precisión de 89.7%, empleando 216 archivos de datos.

Falah, Rivai y Purwanto [7] desarrollaron un prototipo de tostador de café. El sistema se basó mediante lógica difusa para identificar los niveles claro, medio y oscuro de tostado de café, para el nivel claro se empleó un sensor de gas, por el contrario, para los niveles medio y oscuro se

utilizó un sensor de sonido. En sus resultados se obtuvo diferentes respuestas del sensor de gas para cada nivel de tueste, lograron diferenciar el crujido de café con el ruido de fondo a través de un espectro de frecuencia. Concluyeron que el sistema es capaz de identificar los diferentes niveles de tueste de los granos de café con éxito.

Esta investigación M. Münchow, J. Alstrup, I. Steen, y D. Giacalone [8] evaluaron cómo el color y el tiempo de tueste afectan las propiedades sensoriales del café. Utilizaron datos de ocho estudios con evaluadores capacitados o semientrenados, emplearon técnicas de análisis descriptivo sensorial. Se encontró que, aunque ambos parámetros influyen en el sabor del café, el color es el predictor más fuerte. Dentro del tiempo de tueste, se distinguen dos fases: "tiempo hasta el primer crack" y "tiempo de desarrollo", siendo esta última la más influyente en el sabor del café.

2.2 Tostado de café

Este proceso es fundamental gracias a que permite liberar las características organolépticas, para lograr perfiles de tueste consistentes, es necesario controlar de manera óptima variables como la temperatura, el tiempo y la cantidad de café verde. Durante el tostado, ocurren importantes reacciones químicas, deshidratación y cambios en la microestructura del grano. De tal modo que este proceso requiere de habilidad y experiencia de un tostador, quien es capaz de resaltar las cualidades únicas de cada grano y alcanzar el equilibrio deseado en su sabor y aroma [2],[9],[10].

Según C. Yeretzian, A. Jordan, R. Badoud, y W. Lindinger [11], denotan que el proceso de tostado es el más importante debido a que incrementa entre un 100 a 300% el valor económico de la materia prima. También mencionan que el proceso de tueste está comprendido entre temperaturas de 170 y 230 °C, con un tiempo comprendido entre 10 y 15 minutos.

2.2.1 Fases del Proceso de Tostado

El proceso de tostado de café se compone de una serie de fases que ocurren de forma secuencial, estas van desde la deshidratación del grano hasta su enfriamiento final, durante cada una de estas fases el grano de café se encuentra en constante cambios tanto físicos como químicos.

En la fase de secado, los granos de café pierden humedad y sufren un cambio de color. Luego, durante la caramelización, los azúcares se funden y el grano adquiere un tono café claro.

Cuando se llega a la fase de transición térmica, se produce un crujido característico llamado "primer crack", a la par el grano alcanza el doble de su tamaño original. En la fase de desarrollo, el grano experimenta un segundo sonido distintivo denominado "segundo crack", acompañado por la liberación de dióxido de carbono (CO2). Cuando se extrae el grano con el tueste deseado, iniciamos la fase final de enfriamiento, en donde los granos de café comienzan a cierran sus poros, guardando en su interior los aromas y sabores que definen su perfil único [12].

Figura 2.1

Fases del Proceso de Tostado [13].

2.2.2 Tipos de Tueste

Existen un gran número de tipos de tuestes esto debido a la complicada estandarización de la industria cafetera. Sin embargo, gracias a avances se han desarrollado herramientas como el uso de la curva de tueste, permitiendo a la industria lograr categorizar tres principales tipos de tueste con el objetivó de minimizar las confusiones en la identificación del tipo de tueste.

2.2.2.1 Tueste Claro. Se logra conseguir un tueste claro cuando el grano tiene una temperatura interna comprendida entre 180 °C y 208 °C. Este tipo de tueste se caracteriza por la presencia de un sabor ácido con notas afrutadas, lo cual lo hace ideal para bebidas preparadas mediante métodos de filtrado. Además, presenta un tiempo menor con relación a los otros tuestes, por lo que el grano solo presenta perdida de humedad y un color marrón claro [14].

2.2.2.2 Tueste medio. Para conseguir un tueste medio se debe llegar a conseguir una temperatura interna del grano comprendidas en un rango entre 210 y 220 °C. Este tipo de tueste contiene una mayor cantidad de cafeína en comparación con el tueste ligero, además de una acidez reducida y un aroma más pronunciado, lo que resulta en un sabor equilibrado. En la superficie del grano puede observarse algo de aceite y con un color es marrón medio [14].

2.2.2.3 Tueste Oscuro. Conseguir un tueste oscuro es necesario que el interior del grano de café tenga temperaturas muy altas, entre 220°C y 240 °C. En este tueste los granos obtienen unas características superficiales específicas como es la presencia de una capa aceitosa en todo el grano, que le otorga un aspecto brillante y ligeramente grasoso, con un color marrón oscuro o marrón chocolate, llegando a ser casi negro. En este tueste predominantemente un sabor amargo y con una mayor presencia del contenido de tocoferoles [14].

Figura 2.2

Escala de Tueste del Café [15].

2.2.3 Acústica Durante El Proceso De Tostado

Durante el proceso de tostado se producen dos sonidos característicos, conocidos como primer crack y segundo crack. Estos sonidos, que son audibles para el oído humano, de tal modo que un tostador artesanal los emplea a en forma de monitoreo para saber cómo va su café [16].

2.2.3.1 Primer Crack.

Se produce cuando el grano alcanza una temperatura interna de aproximadamente 200 °C. Este sonido es causado por la acumulación de presión de vapor, lo que hace que el grano se agriete, liberando vapor y gases. Para que este evento ocurra, se necesita una gran cantidad de energía calórica. El primer crack se caracteriza auditivamente por una intensidad sonora alta y una baja repetitividad de los eventos acústicos. Este evento dura aproximadamente dos minutos desde su inicio, asociado al tueste ligero y medio [8], [16]. De modo que después de escuchar el primer crack, se llega al tueste claro. Con el tiempo, se alcanza un tueste medio.

2.2.3.2 Segundo Crack. Ocurre cuando el grano alcanza una temperatura interna comprenda entre 230 °C a 240 °C. En este punto, el grano sufre una fractura más pronunciada liberando gases, simultáneamente el aceite comienza a emerger a la superficie del grano. Se distingue auditivamente debido que se presentada con una mayor repetitividad de los eventos acústicos (cracks), con una intensidad menor en relación con el primer crack, tiene una duración aproximada de dos minutos y está asociado con el tueste oscuro [16], [17]. Aunque, durante su fase inicial, el café puede presentar un tueste medio oscuro, con el tiempo, alcanza un tueste oscuro.

2.2.4 Fundamentos Acústicos

La acústica es la ciencia que estudia el sonido, abarcando tanto los sonidos que podemos percibir como aquellos que no son audibles para el ser humano, como los infrasonidos y ultrasonidos. El sonido permite transmitir de información, proporcionando datos como sobre el medio el cual atraviesa o los cuerpos que encuentra en su camino [18].

2.2.4.1 Sonido. Es un fenómeno físico que se origina a partir de alteraciones en la presión atmosférica, provocadas por las oscilaciones de partículas en un medio elástico, las cuales son propagadas en forma de ondas y pueden ser captadas por el sentido auditivo de personas o animales. Además, cada sonido tiene propiedades intrínsecas que permiten su reconocimiento como amplitud, intensidad, frecuencia, duración y timbre [19].

La frecuencia es una característica física un sonido, definida como el número de oscilaciones que se repiten por segundo, su unidad de medida es el Hertz (Hz). Si nos expandimos hacia términos musicales, la tonalidad de los sonidos es asociada a con la frecuencia, de modo que, a mayor frecuencia, el sonido es más agudo y a menor frecuencia, el sonido es más grave. Los humanos perciben frecuencias en un rango de 20 Hz a 20 kHz [20], [21]. Aunque cuando la fuente

sonora se encuentra en movimiento, su frecuencia puede variar dependiendo de la distancia entre el receptor y la fuente, conocido como efecto Doppler.

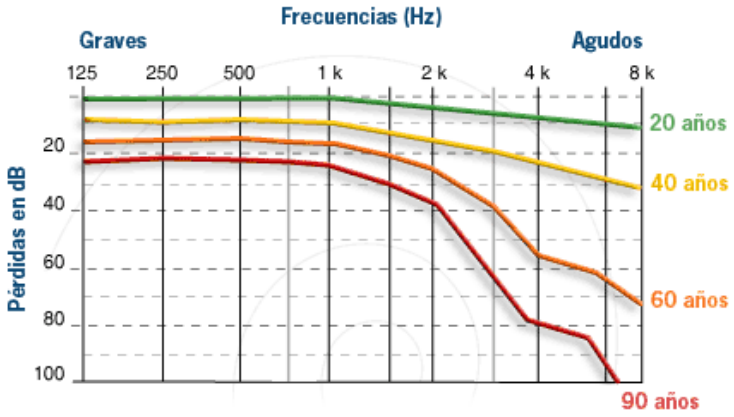
La amplitud es una propiedad importante para la caracterización del sonido, debido a que el sonido se transmite como una onda, esta propiedad representa la altura de la onda sonora, además de la percepción auditiva del oído humano, medida mediante el decibelio abreviado como dB. Una amplitud pequeña corresponde a sonidos suaves, mientras que una amplitud grande produce sonidos más fuertes, el rango de audición se mide por medio de una escala logarítmica que abarca desde 0 dB hasta 140 dB. [20], [21]. Cuando es sonidos se propaga por el medio y tratan de perduran en el tiempo, estos pierden toda su energía asiendo desaparezcan, en síntesis, si se duplica la distancia entre el receptor y la fuente sonora, los decibelios bajan con una relación de 6 dB cada vez.

Para diferencias dos sonidos que presentan una misma frecuencia y amplitud, se utiliza el timbre, esta cualidad permite identificar y seguir la fuente sonora sin depender de otros factores como el tono, la intensidad o la duración, de modo que podemos reconocer características particulares de una voz, como si es áspera, suave o ronca [21], [22].

El oído humano no puede detectar todos los sonidos de la naturaleza, solo los que se encuentren dentro de un rango audible. Sin embargo, esta percepción no es lineal, para mejorar la interpretación de esta idea, un sonido con una presión de 60 dB a baja frecuencia puede parecer tan intenso como un sonido de 0 dB a frecuencia media [20]. La capacidad auditiva disminuye con la edad, la disminución es más pronunciada en personas expuestas a entornos ruidosos.

Figura 2.3

Audiograma Tonal en Relación con la Edad de una Persona [23].



Nota. En el eje de las abscisas (eje X) se representa la audición en decibelios (dB). En el eje de las ordenadas (eje Y), se muestran las frecuencias, que van desde 125 Hz hasta 8 kHz. La relación se analiza en función de la edad de la persona, que varía entre 20 a 90 años.

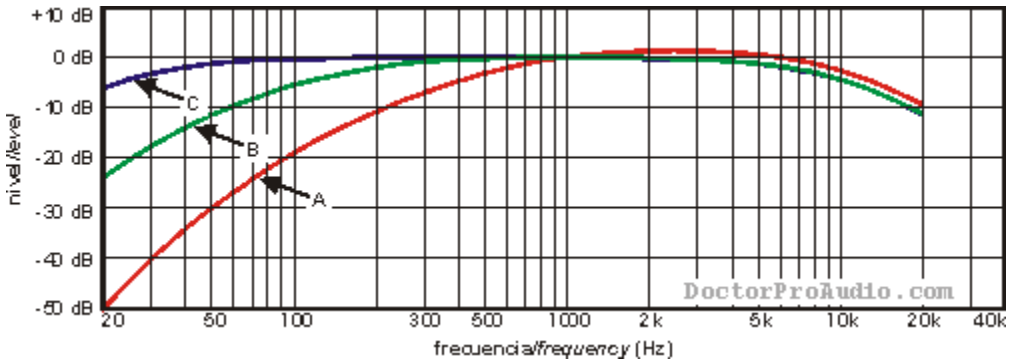
2.2.5 Caracterización del Sonido

El oído humano tiene un funcionamiento muy complejo, por lo que para lograr caracterizar los sonidos en función de cómo los percibimos los humanos auditivamente, se emplean dos técnicas principales: las ponderaciones y el análisis de frecuencias por bandas.

2.2.5.1 Ponderación. Para calibrar la sensibilidad de los instrumentos de medición se diseñaron las curvas de ponderación, nombradas curvas de Fletcher y Munson permitiendo reproducir la sensibilidad del oído humano frente a diversas frecuencias. Esta técnica es muy importante para obtener mediciones que representen con mayor exactitud y precisión a nuestra percepción auditiva, existen diversas curvas, sin embargo, las curvas de ponderaciones más empleadas en el análisis acústico están son las ponderaciones tipo A, B y C [24], [25], [26]. Estas curvas se pueden observar en la figura siguiente.

Figura 2.4

Curvas de Ponderación A, B y C [27].



Nota. Dependiendo la ponderación empelada, los valores en decibelios se agrega la letra correspondiente a la ponderación dBA, dBB, dBC.

Con el objetivo de imitar la sensibilidad del oído humana, se utiliza la ponderación tipo A, permitiendo ajustar los niveles de los decibelios para cada frecuencia, logrando que un instrumento de medición pueda tener una percepción auditiva similar al oído humano. Debido a su precisión en representar la respuesta auditiva humana, esta ponderación se ha convertido en la opción más empleada para estudios y mediciones acústicas [24], [28].

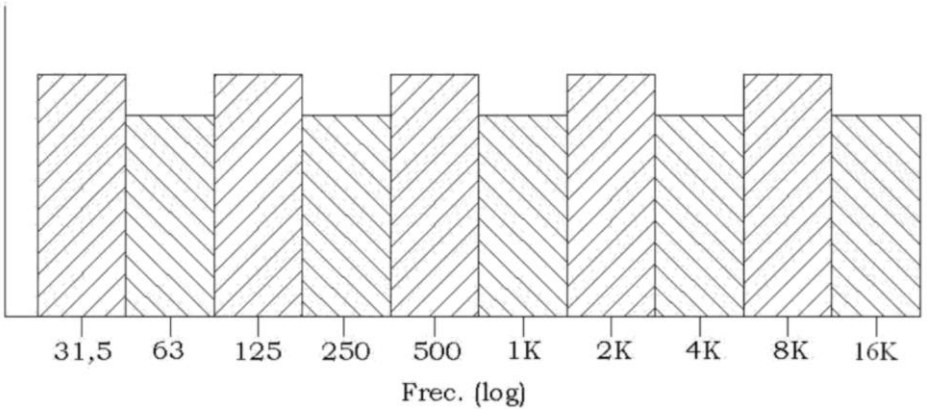
2.2.5.2 Análisis por Bandas de Frecuencia. Una banda el contexto de frecuencias corresponde a un rango específico dentro del espectro de frecuencias, en general los sonidos están compuestos por una combinación de varias frecuencias, a excepción de los tonos puros. Por lo tanto, al realizar un análisis acústico es necesario considerar cada una frecuencia que lo componen, para este propósito, normalmente se emplean filtros de octava de frecuencia. [20],[29]

Una banda de octava de frecuencia agrupa las frecuencias comprendidas entre un valor inicial y el doble de este, esta técnica nos permite analizar el rango de espectro de interés de una manera eficiente, facilitando la estimación de nivel de presión sonora. El análisis en bandas de octava es un enfoque ampliamente empleado y valorado debido a su precisión conjuntamente, con

una alta confiabilidad [30]. En la siguiente figura se representación de las bandas de octavas utilizadas a nivel internacional, en un rango de 31,5 kHz a 16 kHz.

Figura 2.5

Octavas de Frecuencia [20]



2.3 Procesamiento Digital de Señales (DSP)

El DSP permite transformar y manipular una señal con el objetivo de extraer información relevante. En el caso del audio digital, el procesamiento de señales facilita la comprensión del sonido (principios acústicos). Las señales en la realidad suelen ser continuas y de naturaleza analógica, por lo que, para trabajar con ellas en el ámbito digital, es necesario utilizar procesamiento digital de señales, el cual convierte las señales analógicas en datos digitales, permitiendo un análisis más detallado y accesible en diferentes aplicaciones [31].

2.3.1.1 Fundamentos del DSP. Las señales en la realidad son continuas por naturaleza, debió a esto usamos procesos conversión Analógica a Digital (ADC) y la conversión Digital a Analógica (DAC), estos procesos permiten a las computadoras interactuar con estas señales. Al emplear un ADC, los datos digitales obtenidos requieren de un muestreo y cuantización [32].

Cuando una señal no es muestreada produce aliasing, con el fin de evitar este fenómeno, Nyquist formuló el teorema del muestreo. Este teorema establece que, para que una señal analógica

pueda ser recuperada teóricamente sin pérdida de información, es necesario utilizar una tasa de muestreo que sea al menos el doble de la frecuencia más alta muestreada [33]. A continuación, la Ecuación 1 representa el teorema del muestreo de Nyquist, anteriormente explicada.

$$f_s \geq 2f_{max} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

f_s es la frecuencia de muestreo.

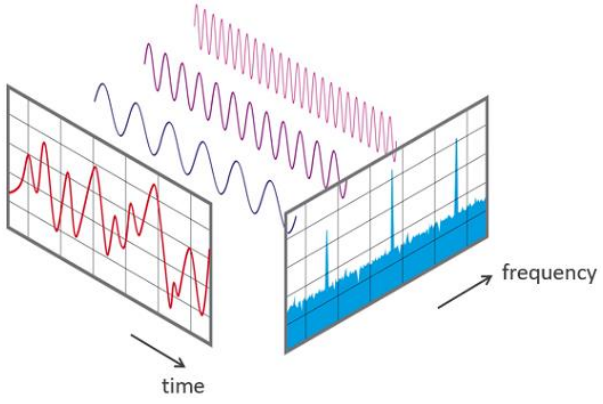
f_{max} es la frecuencia más alta presente en la señal muestreada.

En el proceso de conversión de señales analógicas a digitales, las amplitudes pueden asumir valores infinitos. Por tanto, al convertir señales continuas en datos digitales, es necesario que estas tengan una precisión finita; este proceso se conoce como cuantización. En este proceso, cualquier señal digitalizada puede tener un error máximo de ±½ LSB (Bit Menos Significativo) [32], [33].

2.3.1.2 Técnicas de DSP en Audio. Uno de los métodos más utilizados para el procesamiento de señales digitales en audio es la Transformada Rápida de Fourier (FFT), permite transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, para lograr realizar un análisis espectral de una señal de audio. Aplicar la FFT, resulta esencial para el análisis y la caracterización de patrones sonoros [34].

Figura 2.6

Vista de una Señal en el Dominio del Tiempo y la Frecuencia [35].

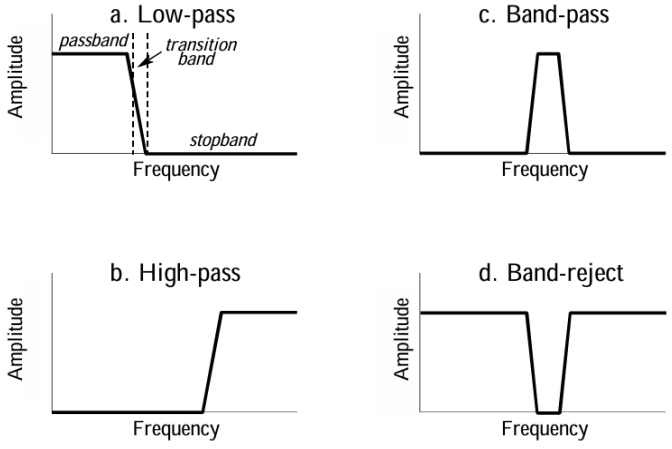


Los filtros digitales son una parte fundamental del DSP, empleados para separar señales del ruido y restaurar señales distorsionadas. Existen filtros analógicos como digitales, sin embargo, los filtros digitales han demostrado ser superiores. Los filtros digitales también destacan debido a la forma tan sencilla de implementarlos, que es mediante la convolución de la señal de entrada con la respuesta impulsiva del filtro. Dentro de la clasificación de los filtros están, los filtros de Respuesta Infinita al Impulso (IIR), cuya reacción a cambios se extiende en el tiempo, y los filtros de Respuesta Finita al Impulso (FIR), que operan con una duración limitada, pero más preciso. [32].

Los filtros pueden clasificarse según como manipulan las frecuencias dentro de una señal, tenemos filtros pasa bajos, que actúan dejando pasar las frecuencias bajas y atenuando las frecuencias altas, filtros pasa altos, permiten el paso de frecuencias altas y atenuando las frecuencias bajas, filtros pasa banda, que dejan pasar las frecuencias dentro de un rango específico y atenúan las frecuencias fuera de este rango. Finalmente, filtros rechaza banda, operan de forma inversa al filtro pasa banda, es decir permiten el paso de las frecuencias fuera de un rango [32]. En la siguiente figura se presentan gráficamente los filtros, con respecto a la frecuencia y amplitud.

Figura 2.7

Filtros de Frecuencia: a. Pasa Bajo, b. Pasa Alto, c. Pasa Banda y d. Rechaza Banda [32].



3. CAPÍTULO III - MARCO METODOLÓGICO

En el presente capitulo se especifica la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo de investigación, proporcionando de forma secuencial y clara pasos para realizar un diseño y construcción de un sistema de medición acústica para el monitoreo del grado de tostado del café.

3.1 Método de la Investigación

En el presente trabajo se emplea una investigación experimental, debido a la resolución de un problema presentando [36], a través de la construcción de un sistema de sonido para monitoreo del grado de tostado de café. Para realizar este tipo de investigación es esencial contar con un conocimiento profundo de los fundamentos teóricos y de estudios previos relacionados, respaldada mediante una investigación documental. Esto lleva a la necesidad de utilizar la metodología de investigación documental, encargada de recopilar y seleccionar información de revistar, libros, artículos resultados de investigación, entre otros [37]. Además, la recopilación de datos sonoros durante el proceso de tostado del café y el método de validación del sistema indican un aspecto importante de la metodología de la investigación de campo [38].

Al diseñar una solución, se detalla cada uno de los componentes del sistema propuesto. Este proceso se lleva a cabo utilizando métodos asociados a la investigación descriptiva [38]. Finalmente, una investigación experimental para recopilar datos y verificar que el sistema cumple con los aspectos analizados en el problema [39].

3.2 Diseño de la Investigación

En esta sección, se describen las fases y actividades necesarias para desarrollar un sistema de medición de sonido destinado al monitoreo del grado de tostado del café, alineadas con los objetivos específicos de la investigación.

3.2.1 Fase 1: Adquisición de Información

En esta fase, se recopila información sobre el sonido durante el proceso de tostado de café, a la par que se busca la determinación de los requerimientos del sistema a construir.

Actividad 1: Investigación de la acústica en el proceso de tostado del café; la actividad permite obtener información sobre la influencia del sonido durante el tostado de café.

Actividad 2: Grabación y análisis del sonido durante el proceso de tostado; en esta actividad se realiza la captura de audios en un ambiente real de tostado de café.

Actividad 3. Procesamiento y caracterización de señales de audio obtenidas durante el tostado del café; esta actividad se analiza los sonidos capturados para caracterizarlos y describir los diferentes sonidos presentes

Actividad 4: Especificaciones del sistema a diseñar; en esta actividad se establecen los requerimientos del sistema a diseñar.

3.2.2 Fase 2: Diseño del Sistema Acústico

Se realiza el diseño sistema acústico a partir de los requerimientos previamente establecidos. También se realiza el diseño electrónico y diagrama de conexión para su construcción.

Actividad 5: Selección de componentes; en la actividad se seleccionan los componentes más apropiados para el sistema acústico.

Actividad 6: Diseño electrónico.

Actividad 7: Diseño diagrama de conexión.

3.2.3 Fase 3: Construcción del Dispositivo

En esta fase se realiza la construcción del dispositivo, verificando su correcto funcionamiento de manera individual y luego intégralos, posteriormente se programa sus funciones.

Actividad 8: Integración de componentes.

Actividad 9: Programaciones de funcionamiento del sistema; en la actividad se programan las funciones del sistema acústico.

3.2.4 Fase 4: Pruebas de Funcionamiento

En esta fase se realiza pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo, además de la verificación de la solución de la problemática. Adicional se realizan ajuste para garantizar su eficiencia.

Actividad 10: Realización de pruebas de funcionamiento; se valida el sistema acústico por medio de pruebas.

Actividad 11: Ajustes de funciones; se realiza ajustes al sistema para un conseguir un funcionamiento adecuado.

4. CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Recolección de Datos del Proceso de Tostado

En esta sección, se detallan los materiales y configuración experimental utilizada para la recolección de datos durante el proceso de tostado de café.

4.1.1 Materiales y Configuración Experimental

4.1.1.1 Materiales Utilizados. Para llevar a cabo la captación de los sonidos durante el proceso de tostado, se emplearon los siguientes materiales:

- Tostadora de café eléctrica: JAVA STARR modelo BH8080, diseñada para uso doméstico.
- Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0xxx, equipada con un micrófono integrado.
- Micrófono integrado: Utilizado para la captación inicial de los sonidos generados durante el tostado, gestionado por Intel Smart Sound Technology (Intel SST).
- Software de grabación de audio: Audacity, un programa gratuito [40].
- Balanza: Con una precisión de 0.01g.
- Café verde: Especie arábica, 30 g. Con humedad del 10 a 11%.

4.1.1.2 Configuración de Grabación en Audacity. La captura de los sonidos del tostado se realizó utilizando Audacity, configurando el software con:

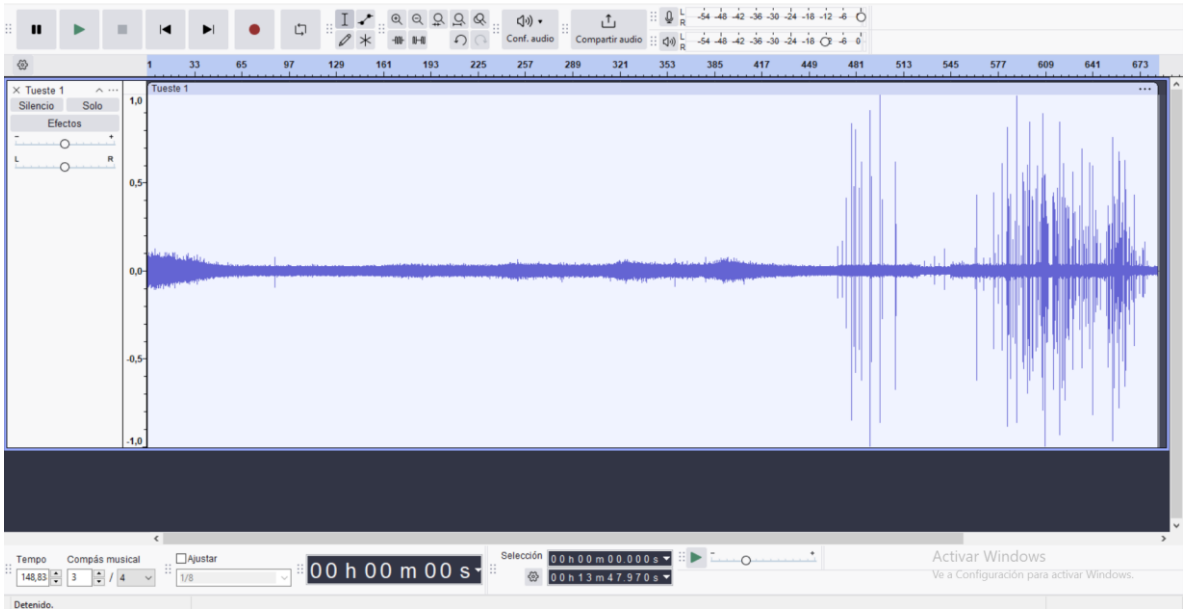
- Canal de audio: Mono (único canal).
- Formato de muestra: 32 bits, flotante.
- Frecuencia de muestreo: 44,100 Hz.
- Latencia:
    - Duración del búfer: 100 ms.
    - Compensación de latencia: -130 ms.

4.1.1.3 Justificación del Proceso Experimental. El micrófono integrado del laptop fue seleccionado por su disponibilidad y fue colocado a menos de 15 cm de la tostadora, con el objetivo de maximizar la amplitud de los cracks frente al ruido del tostado. Audacity seleccionado por ser ampliamente utilizado para grabaciones acústicas de calidad, con la configuración de grabación en un canal (mono) para simplificar la señal acústica sin sacrificar calidad, se empleó una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz, superando el espectro auditivo humano de 20 kHz según el teorema de Nyquist. Además, se seleccionó un formato de muestra de 32 bits flotantes para conservar el rango dinámico reducido del micrófono integrado.

Se empleó una materia prima uniforme, obtenida mediante una clasificación visual que seleccionó granos de tamaños similares, garantizando así la consistencia en el proceso de tostado. Adicionalmente, las grabaciones se realizaron en un ambiente controlado, minimizando fuentes sonoras externas para asegurar la calidad de los datos acústicos.

Figura 4.1

Grabación del Proceso de Tostado del Café Especie Arábiga en Audacity (Configuración Experimental) – Tueste 1.



4.2 Identificación y Caracterización de los Sonidos del proceso de Tostado

En esta sección, se realiza la caracterización de los sonidos generados durante el proceso de tostado de café. Para ello, se analizaron dos grabaciones, denominadas “Tueste 1” y “Tueste 2”, utilizando la misma materia prima y configuración experimental. El procesamiento de las señales acústicas se llevó a cabo mediante herramientas en Python, se utilizaron las bibliotecas Librosa [41] y SciPy [42], aplicando un análisis de forma de onda y frecuencia, se identificaron y caracterizaron los cracks generados durante el tostado, distinguiéndolos del ruido de fondo.

4.2.1 Análisis Inicial de la Forma de Onda del Primer y Segundo Crack

Se implementó un algoritmo de detección de picos en Python utilizando estas bibliotecas. La señal de audio se normalizó al dividir cada muestra por el valor máximo absoluto, manteniendo la amplitud en el rango de -1 a 1 para facilitar la comparación y detección de picos. Con un umbral de amplitud de 0.2 y una distancia mínima de 0.5 segundos entre picos, evitando la detección de múltiples picos cercanos correspondientes al mismo crack. Este enfoque permitió identificar claramente los picos asociados con los cracks, como se aprecia en las figuras.

Figura 4.2

Identificación de los Picos Asociados al Primer Crack y Segundo Crack (Tueste 1).

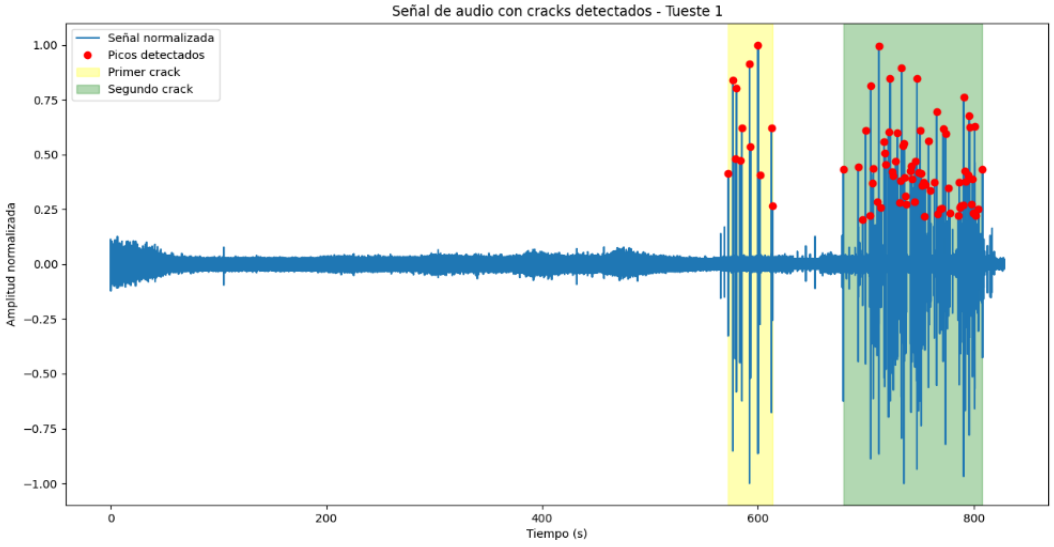
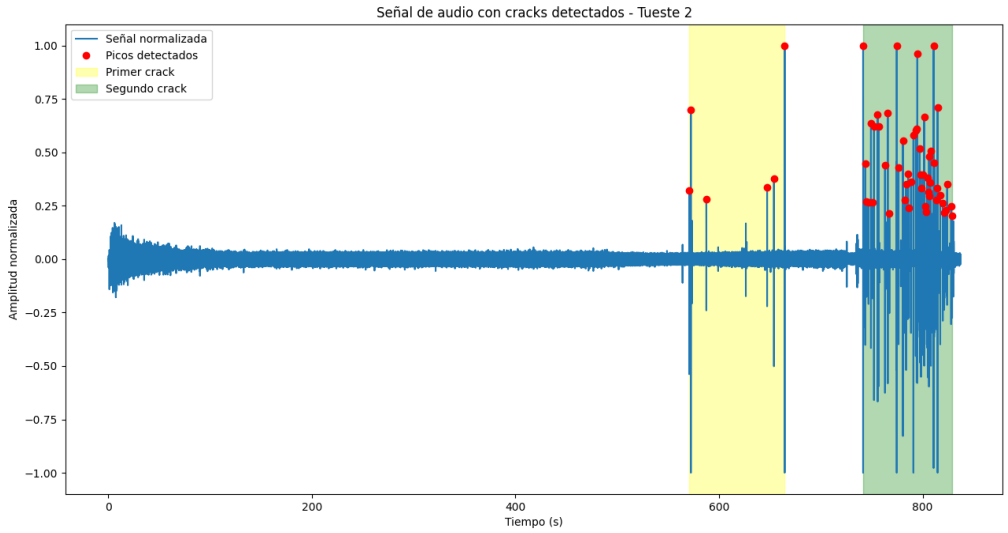


Figura 4.3

Identificación de los Picos Asociados al Primer Crack y Segundo Crack (Tueste 2).



En Figura 4.2 y Figura 4.3, se pueden apreciar claramente los picos asociados al primer y segundo crack de cada tueste. Estos picos sobresalen del ruido de fondo, lo cual concuerda con lo que se logró percibir auditivamente. Además, los picos detectados se visualizan como puntos rojos superpuestos a la señal normalizada, esta representación permite observar la distribución temporal de los cracks, mostrando eventos aislados para el primer crack y agrupaciones densas para el segundo.

Para complementar esta información visual y auditiva, se presenta la siguiente tabla con datos comparativos de los procesos tostado de café, identificados como Tueste 1 y Tueste 2. En la tabla se detallan los tiempos durante el proceso, como el inicio y fin tanto del primer crack como del segundo crack, tiempo entre cracks, la duración de cada crack, el número de picos detectados durante ambos cracks y la tasa de ocurrencia de cracks para cada tueste.

Tabla 4.1

Datos Comparativos de los Procesos de Tostado en Función de los Cracks (Tueste 1 y Tueste 2).

Parámetro	Tueste 1	Tueste 2
Inicio Primer Crack	9:32	9:30
Fin Primer Crack	10:13	11:04
Tiempo entre cracks	1:06	1:17
Inicio Segundo Crack	11:19	12:21
Fin Segundo Crack	13:28	13:48
Duración Primer Crack	0:41	1:34
Duración Segundo Crack	2:09	1:27
Picos Detectados	82	55
Picos Primer crack	12	6
Picos Segundo Crack	70	49
Tasa de ocurrencia (Primer Crack)	0.29/s	0.06/s
Tasa de ocurrencia (Segundo Crack)	0.54/s	0.56/s

Nota. Todos los tiempos de duración expresados en minutos: segundos (mm:ss) y la tasa de ocurrencia se presenta en cracks por segundo (cracks/s).

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4.1, el inicio del primer crack presenta |una diferencia de solo 2 segundos entre los dos tuestes. La tasa de ocurrencia del segundo crack es prácticamente igual en ambos casos, con una variación mínima, lo que sugiere un comportamiento similar durante esta fase. A pesar de haberse utilizado los mismos parámetros en ambos tuestes, se aprecian diferencias significativas en los tiempos registrados.

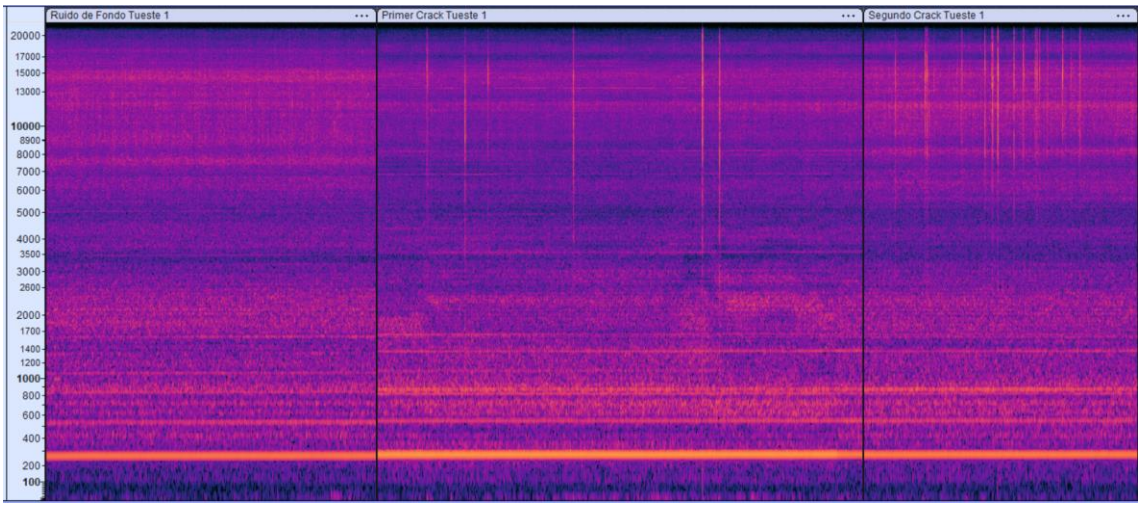
En resumen, el primer crack se caracteriza por una menor repetitividad de eventos, con picos más aislados, mientras que el segundo crack presenta una mayor repetitividad eventos, evidenciada por una mayor concentración de picos.

4.2.2 Análisis Espectral de los Sonidos del Proceso de Tostado

Para estimar dónde se ubican las frecuencias dominantes correspondientes al ruido de fondo, el primer crack y el segundo crack durante el proceso de tueste, se utilizó el software Audacity. Los archivos de audio de los tuestes se dividieron en segmentos específicos para cada evento: ruido de fondo, primer crack y segundo crack. Empleando la vista de espectrograma en Audacity, se identificaron visualmente las frecuencias dominantes asociadas a cada componente, permitiendo estimar las frecuencias correspondientes a estos eventos acústicos durante el tueste del café. En la Figura 4.4 se presenta un espectrograma del audio segmento del Tueste 1.

Figura 4.4

Espectrograma en Audacity del Tueste 1 – Audio segmentado en ruido de fondo, primer crack y segundo crack.



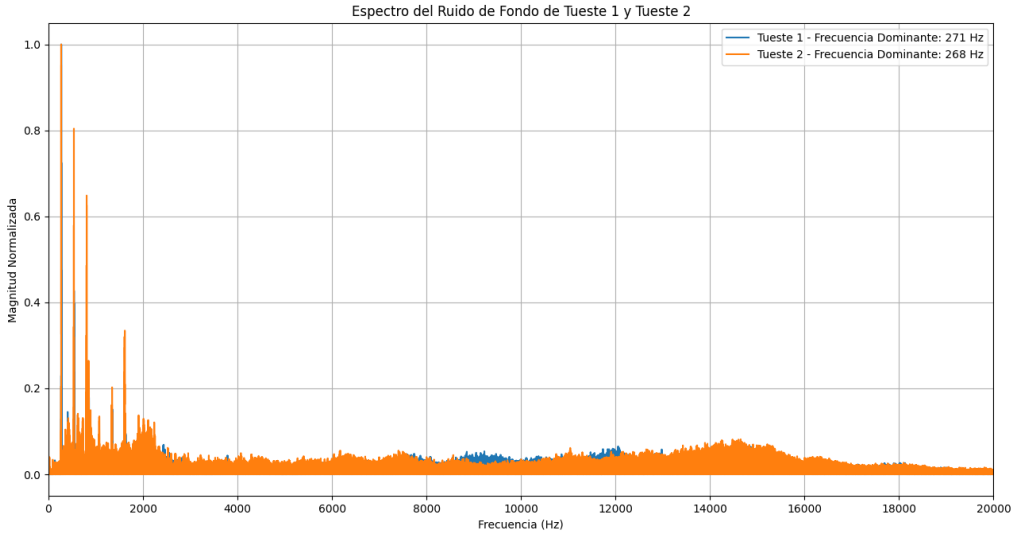
Nota. Parámetros del espectrograma: Ventana de 1024 puntos, rango de 100 Hz a 20 kHz, escala de colores en dB. Las regiones de interés se identifican visualmente basándose en la intensidad del color (mayor intensidad = tonos cálidos).

En la Figura 4.4, se observa una línea predominante alrededor de 270 Hz en todos los segmentos, perteneciente a la frecuencia dominante de la tostadora. Durante el primer y segundo crack, se identifican líneas con una mayor intensidad tonal, ubicadas por encima de los 2,5 kHz, las cuales están asociadas a los eventos de los cracks.

Para validar las observaciones realizadas en Audacity, se llevó a cabo un análisis espectral en Python. En primer lugar, se extrajo el segmento correspondiente al ruido de fondo de las grabaciones de ambos tuestes. Posteriormente, se aplicó una FFT con una ventana de Hamming con 2048 muestras para generar el espectro de frecuencias, para lograr identificar la frecuencia dominante, en la siguiente figura se presenta el espectro del ruido de fondo de cada tueste.

Figura 4.5

Espectro del ruido de fondo del Tueste 2 y Tueste 2 con su frecuencia dominante.



En la Figura 4.5, se puede apreciar que las frecuencias con mayor magnitud se concentran por debajo de los 2,5 kHz. Al extraer la frecuencia dominante, se obtuvieron valores de 271 Hz para el Tueste 1 y 268 Hz para el Tueste 2. Estos resultados validan las observaciones realizadas previamente en el espectrograma generado con Audacity.

Para caracterizar las frecuencias dominantes de los cracks durante el proceso de tostado, se reutilizo el algoritmo utilizado para generar la Figura 4.2 y Figura 4.3. Seguidamente, se realizó la FFT en cada pico detectado. Dado que estos eventos ocurren de manera muy rápida, se utilizaron 512 muestras alrededor de cada pico detectado. Además, se aplicó un filtro pasa-alta con un corte en 2,5 kHz en el dominio de la frecuencia para aislar las componentes de interés. Los valores de frecuencia dominante obtenidos se analizaron para cada etapa del proceso (primer y segundo crack), los resultados se encuentran en la Tabla 4.2 y

Tabla ***4.3***.

Tabla 4.2

Distribución Frecuencial de Picos Asociados al Primer Crack (Tueste 1 y Tueste 2).

Evento Acústico	Rango Frecuencia (kHz)	Número de picos	Porcentaje
Primer Crack	8 a 9	1	6%
	9 a 10	2	11%
	14 a 15	15	83%
Total		18	100%

Tabla 4.3

Distribución Frecuencial de Picos Asociados al Segundo Crack (Tueste 1 y Tueste 2).

Evento Acústico	Rango Frecuencia (kHz)	Número de picos	Porcentaje
Segundo Crack	9 a 10	3	3%
	10 a 14	2	2%
	14 a 15	104	87%
	15 a 18	10	8%
Total		119	100%

Nota. Los porcentajes fueron redondeados al entero más cercano para facilitar su interpretación.

En la Tabla 4.2 y

Tabla ***4.3***, se comprar el primer crack y segundo crack, mostrando la distribución de picos en distintos rangos de frecuencia debido a que las más dominantes son muy cambiantes. De acuerdo con los datos en las tablas, el rango de 14 a 15 kHz es predominante, concentrando el 83% de los cracks en el primer crack y el 87% en el Segundo Crack, de modo que la mayor actividad acústica durante ambos cracks se encuentra en este rango de frecuencia.

4.2.3 Resumen de los Resultados Acústicos

El análisis acústico del proceso de tostado de café permitió identificar y caracterizar los sonidos denominamos como primer y segundo crack, así como diferenciarlos del ruido de fondo y el sonido de la tostadora. Mediante un enfoque combinado en los dominios del tiempo y la frecuencia, a partir de estos se cuantificaron parámetros como la tasa de ocurrencia de cracks y bandas de frecuencia dominantes. Estos resultados se resumen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4

Caracterización de Eventos Acústicos Durante el Proceso de Tostado de Café: Frecuencias, Tasa de Ocurrencia Media y Observaciones.

Evento Acústico	Rango de Frecuencias	Porcentaje	Tasa de Ocurrencia Media (cracks/segundo)	Observación
Sonido Tostadora	268 Hz - 271 Hz	-	-	Frecuencia constante durante todo el proceso.
Ruido de fondo	<2,5 kHz	-	-	Ruido, sin interferir con cracks.
Primer Crack	8 kHz a 10 kHz	100%	0.18	Menor repetitividad de cracks y aislados.
Segundo Crack	14 kHz a 15 kHz	90%	0.55	Mayor repetitividad de cracks, con mayor concentración.

El primer crack se caracteriza por una menor repetitividad y cracks aislados, mientras que el segundo crack se distingue por una mayor repetitividad y concentración de cracks. Esta variación en la repetitividad permite distinguir claramente entre ambos eventos acústicos. El primer crack se captura en su totalidad dentro del rango de 8 a 15 kHz. Por otro lado, el segundo crack, aunque presenta un 90% de los cracks en este mismo rango, cuenta con una mayor repetitividad. Estos resultados validan que la frecuencia de 15 kHz es óptima para la identificación de los cracks, ya que permite priorizar la detección del primer crack y, al mismo tiempo, aprovechar la repetibilidad elevada del segundo crack para diferenciarlos. En conclusión, este análisis confirma la efectividad del rango de 15 kHz para caracterizar y distinguir el primer crack del segundo crack.

4.3 Requerimientos del Sistema

Una vez caracterizados los sonidos asociados al primer crack y segundo crack durante el proceso de tostado del café, se definen los requisitos funcionales y técnicos del sistema. Estos requisitos garantizan que el sistema sea capaz de identificar el grado de tostado.

4.3.1 Requerimientos Funcionales

- Detectar los sonidos del primer y segundo crack del café durante el proceso de tueste.
- Identificar el grado de tostado mediante los sonidos del primer y segundo crack.
- Indicar el grado de tostado.

4.3.2 Requerimientos Técnicos

- Micrófono que capte frecuencias hasta de 15 kHz, asegurando la detección de los cracks.
- Frecuencia de muestreo mínima de 30 kHz, cumpliendo el teorema de Nyquist.
- Unidad de procesamiento con capacidad de procesamiento de audio.
- Salida visual para indicar el grado de tostado.

4.4 Selección de Protocolo y Hardware

A partir de los requisitos funcionales y técnicos definidos para el sistema, se procede a la selección de los protocolo y hardware adecuados que permitan cumplir con las especificaciones establecidas.

4.4.1 Selección del Protocolo

La detección de sonido durante el proceso de tostado requiere un protocolo de comunicación capaz de transmitir datos de audio a altas velocidades y con baja latencia. Para determinar cuál es el más adecuado para esta aplicación se evaluarán los siguientes protocolos.

4.4.1.1 Inter-IC Sound Bus (I2S). Desarrollado por Philips Semiconductores en 1986, el bus I2S es un estándar de comunicación en serie diseñado específicamente para la transferencia de datos de audio digital. El bus I2S utiliza tres líneas de señal: un reloj de trama, un reloj de bits y una línea dedicada únicamente a los datos [43].

Los datos pueden transmitirse en modo mono por un canal izquierdo un canal derecho, también en ambos canales en modo estéreo. Las velocidades de reloj varían, podemos tener 512 kHz para una tasa de muestreo de 8 kHz y 12,288 MHz para una tasa de 192 kHz, usando modo estéreo [43], [44].

Tabla 4.5

Características del Protocolo I2S [43], [44].

Características	I2S
Uso Principal	Transmisión de audio digital
Número de Líneas	3 líneas principales (SD, WS, SCK)
Velocidad de transmisión	12,288 MHz
Longitud de Palabra de datos	16, 24 o 32 bits
Latencia	Baja

4.4.1.2 Circuito Inter-Integrado (I2C). Cuenta una presencia significativa a nivel global, siendo una tecnología de comunicación clave en sectores como la electrónica de consumo, las telecomunicaciones y la electrónica industrial. Permite la transferencia bidireccional de datos, de modo que requiere de dos líneas línea de datos en serie (SDA) y línea de reloj en serie (SCL), también tiene incorporado una detección de colisiones y arbitraje, buscando evitar la corrupción de datos cuando se intentan iniciar la transferencia simultáneamente.

El I2C puede operar bidireccionalmente a 8 bits en serie, con velocidades de hasta 100 kBits/s en modo estándar, 400 kBits/s en modo rápido, y hasta 3,4 Mbit/s en modo de alta velocidad, cuando se transmiten datos en serie de 8 bits en una única dirección, es posible alcanzar velocidades de hasta 5 Mbit/s en el modo ultrarrápido [45].

Tabla 4.6

Características del Protocolo I2C [45].

Características	I2C
Uso Principal	Electrónica de consumo, telecomunicaciones, electrónica industrial
Número de Líneas	2 líneas (SDA, SCL)
Velocidad de transmisión	Hasta 3,4 Mbit/s (Bidireccional), Hasta 5 Mbit/s (unidireccional)
Longitud de Palabra de datos	8 bits en serie
Latencia	Dependiendo de la velocidad de transmisión

4.4.1.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. Para seleccionar el protocolo más adecuado, se evaluarán los protocolos I2S e I2C mediante el método de criterios ponderados, priorizando tres aspectos:

- Aplicación: Es importante seleccionar un protocolo que tenga afinidad con el propósito del proyecto.

- Velocidad de Transmisión: Es crucial que el protocolo pueda manejar la cantidad de datos y la precisión requerida por la aplicación.
- Número de Líneas: Este criterio evalúa el impacto del número de líneas en la simplicidad del diseño.

La Tabla 4.7 evalúa varios criterios para determinar su importancia en la selección del protocolo. Los criterios evaluados son Aplicación, Velocidad de transmisión y Número de líneas. Cada criterio ha sido ponderado según su nivel de importancia.

Tabla 4.7

Evaluación de Protocolos por Criterios Ponderados.

Criterio	Aplicación	Velocidad de Transmisión	Número de Líneas	∑+1	Ponderación
Aplicación	-	1	1	3	0,50
Velocidad de Transmisión	0	-	1	2	0,33
Número de Líneas	0	0	-	1	0,17
Suma				6	1

De acuerdo con los datos de la Tabla 4.7, el criterio de Aplicación tiene la mayor ponderación, reflejando su importancia crucial en la selección del protocolo adecuado para el procesamiento de audio. La Velocidad de Transmisión, con una ponderación de 0.33, es esencial para manejar altos volúmenes de datos y mantener la precisión requerida. Por otro lado, el Número de Líneas, ponderado con 0.17, evalúa la simplicidad de implementación.

Criterios ordenados por importancia:

Aplicación > Velocidad de Transmisión > Número de Líneas

Tabla 4.8

Ponderación de las Alternativas para el Criterio de Aplicación.

Aplicación				
Alternativa	I2S	I2C	∑+1	Ponderación
I2S	-	1	2	0,67
I2C	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
I2S>I2C				

La evaluación de acuerdo con el criterio de ampliación muestra que I2S, con una puntuación ponderada de 0.67, supera al I2C.

Tabla 4.9

Ponderación de las Alternativas para el criterio Velocidad de Transmisión.

Velocidad de Transmisión				
Alternativa	I2S	I2C	∑+1	Ponderación
I2S	0	1	2	0,67
I2C	0	0	1	0,33
	Suma		3	1
I2S>I2C				

La evaluación de acuerdo con el criterio de velocidad de transmisión muestra que I2S, con una ponderación de 0,67, es significativamente más rápido que I2C.

Tabla 4.10

Ponderación de las Alternativas para el Criterio Número de Líneas.

Número de Líneas				
Alternativa	I2S	I2C	∑+1	Ponderación
I2S	0	0	1	0,33
I2C	1	0	2	0,67
	Suma		3	1
I2C>I2S				

La evaluación del número de líneas entre I2S e I2C revela que el I2C que resulta más práctico debido a la menor cantidad de líneas necesarias para su implementación. Donde el I2C tiene una ponderación de 0,67 en comparación con la ponderación de 0,33 para I2S.

Tabla 4.11

Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Protocolos.

Criterio / Alternativa	Aplicación	Velocidad de Transmisión	Número de Líneas	Ponderación	Prioridad
I2S	0,33	0,22	0,06	0,61	1
I2C	0,17	0,11	0,11	0,39	2
			Suma	1	

De acuerdo con la Tabla 4.11, el protocolo I2S tiene una prioridad de 1 debido a su mayor puntuación según los criterios ponderados. Con una ponderación total de 0,61, el I2S se selecciona como el protocolo más adecuado en comparación con I2C. Esta selección se basa en el mejor desempeño de I2S en los criterios de aplicación y velocidad de transmisión.

4.4.2 Selección de la Unidad de Procesamiento

Para el procesamiento de audio, es esencial contar con un hardware que ofrezca un rendimiento óptimo y una latencia mínima. Debido a que el protocolo I2S ya ha sido seleccionado, es fundamental que la unidad de procesamiento sea compatible con este protocolo.

4.4.2.1 ESP32-WROOM-32D. El ESP32 está diseñado para un óptimo rendimiento de potencia, además de contar con robustez, versatilidad y confiabilidad para diversas aplicaciones con bajo consumo energético. Por lo que, es ampliamente utilizado en aplicaciones de automatización industrial, agricultura inteligente, dispositivos de audio, reconocimiento de voz, reconocimiento de imágenes, entre otros. Cuenta con dos interfaces I2S: I2S0 e I2S1 (con modos full dúplex y half dúplex), proporcionando un alto rendimiento para canales de transmisión y recepción debido a que están separados [46], [47].

En el libro *Practical Audio DSP Projects with the ESP32* [48], los autores D. Ibrahim y A. Ibrahim destacan que el protocolo I2S puede alcanzar una velocidad máxima de 3.125 MHz. Esta restricción establece un límite en la frecuencia del reloj serial (f_{SCLK}), dicha frecuencia se determinó utilizando la Ecuación 2 y además fue verificada con un osciloscopio:

$$f_{BCLK} = f_s \cdot n \cdot C \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

f_{BCLK}: Frecuencia de reloj de bits (BCLK)

f_s: Frecuencia de muestreo (Hz)

n: Bits por canal (8,16,24,32 bits)

C: Canal (mono=1, estéreo=2)

Para garantizar el funcionamiento dentro de los límites del protocolo, se debe cumplir que:

$$f_{\mathrm{SCLK}} \leq 3.125 \text{ MHz}.$$

Tabla 4.12

Características del ESP32-WROOM-32D [46], [47], [48].

ESP32-WROOM-32D	
Procesador	Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit LX6, hasta 240 MHz
Frecuencia del Reloj	40 MHz.
Memoria ROOM	448 KB.
Memoria SRAM	520 KB
Interfaces	UART, SPI, SDIO, I2C, PWM LED/Motor, I2S, GPIO, ADC, DAC
I2S Velocidad	3,125 MHz (Máxima)
Voltaje de alimentación	3.3 V (máx 3.6 V)
Consumo de corriente	Típico: 80mA, Sleep mode: 5 μA
Compiladores	Arduino IDE, ESP-IDF
Nivel de programación	Bajo a Medio: Muy accesible para principiantes (Arduino IDE)
Precio	$12

4.4.2.2 STM32H7. Los microcontroladores STM32F405xx y STM32F407xx, destacan por su alto rendimiento, estos están integrados con un procesador Cortex-M4 de 32 bits realmente potente, capaz de operar a velocidades de hasta 168 MHz. Además, cuentan con una unidad de punto flotante incorporada, empleada para realizar cálculos complejos. Empleados para proyectos que necesitan un control muy rápido y preciso en tiempo real, destacando un rendimiento bueno en tareas de DSP. Disponen de dos interfaces I2S estándar, permitiendo una gran flexibilidad, que pueden ser configurados con frecuencias de muestreo de 8 kHz hasta 192 kHz, con una resolución de 16/32 bits [49]. Si se empleamos la ecuación 2 con una configuración de canal estéreo, la frecuencia de reloj máxima es de 12.28 MHz.

Tabla 4.13

Características del STM32H7 [49].

	STM32H7
Procesador	CPU Arm32-bit Cortex-M4 con FPU, acelerador en tiempo real adaptable (ART Accelerator) con frecuencia de hasta 168 MHz
Flash Memory	Hasta 1 Mbyte
SRAM	Hasta 192+4 Kbytes
Interfaces	I2C, USART/UART, SPI/I2S, CAN, SDIO
I2S Velocidad	12.28 MHz (Máxima)
Compiladores	STM32CubeIDE, IAR Embedded Workbench
Nivel de programación	Alto: Requiere conocimientos en programación embebida, (STM32CubeIDE).
Precio	45$

4.4.2.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. Para la selección de la unidad de procesamiento más adecuada, se han considerado los siguientes criterios:

- Velocidad I2S: Es esencial para garantizar un procesamiento sin latencia.
- Rendimiento del Procesador: La velocidad del procesador es fundamental para un procesamiento eficiente, especialmente en aplicaciones de procesamiento de señales.
- Facilidad de programación: Permiten el desarrollo e implementación rápida y eficientes de los componentes.
- Costo: Permite optimizar los recursos sin comprometer las características.

La Tabla 4.14 evalúa los criterios considerados para determinar su importancia en la selección de hardware para el procesamiento de audio. Cada criterio ha sido ponderado según su nivel de importancia.

Tabla 4.14

Evaluación de la Unidad de Procesamiento por Criterios Ponderados.

Criterio	Velocidad I2S	Rendimiento del Procesador	Facilidad de Programación	Costo	∑+1	Ponderación
Velocidad I2S	-	0,5	1	1	2,5	0,42
Rendimiento del procesador	0,5	-	1	1	2,5	0,42
Facilidad de Programación	0	0	-	0,5	0,5	0,08
Costo	0	0	0,5	-	0,5	0,08
		Suma			6	1

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4.14, los criterios de Velocidad I2S y Rendimiento del procesador son los factores más relevantes, ambos con una ponderación de 0,42. Por otro lado, los criterios de Facilidad de programación y Costo tienen una ponderación significativamente menor, con un valor de 0,08 cada uno.

En función de estos resultados, se establece el siguiente orden de prioridad entre los criterios evaluados:

Velocidad I2S > Rendimiento del procesador > Facilidad de programación > Costo.

Tabla 4.15

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Velocidad I2S.

Velocidad I2S				
Alternativa	ESP32-WROOM-32D	STM32H7	∑+1	Ponderación
ESP32-WROOM-32D	-	0	1	0,33
STM32H7	1	-	2	0,67
	Suma		3	1
STM32H7>ESP32-WROOM-32D				

Los resultados de la Tabla 4.15 y Tabla 4.10, indican que el STM32H7 cuenta con mejor desempeño en velocidad I2S, con una ponderación de 0,67 frente a 0,33 del ESP32-WROOM-32D, de modo que es la mejor opción en cuando a velocidad del I2S.

Tabla 4.16

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Facilidad de Programación.

Facilidad de Programación				
Alternativa	ESP32-WROOM-32D	STM32H7	∑+1	Ponderación
ESP32-WROOM-32D	-	1	2	0,67
STM32H7	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
ESP32-WROOM-32D>STM32H7				

Los datos de la Tabla 4.16, indican que ESP32-WROOM-32D es la mejor opción de acuerdo con el criterio de facilidad de programación, con una ponderación de 0,67 frente a 0,33 del STM32H7. Su compatibilidad con diversos copiladores, como Arduino IDE, facilita el desarrollo e la implementación de algoritmos.

Tabla 4.17

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Costo.

Costo				
Alternativa	ESP32-WROOM-32D	STM32H7	∑+1	Ponderación
ESP32-WROOM-32D	-	1	2	0,67
STM32H7	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
ESP32-WROOM-32D>STM32H7				

De acuerdo con los datos de la Tabla 4.17, el ESP32-WROOM-32D se destaca como la opción más rentable. Con una mayor ponderación total de 0,67, en comparación con el 0,33 del STM32H7, por lo tanto, el ESP32-WROOM-32D demuestra ser la mejor opción en costo.

Tabla 4.18

Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Unidad de Procesamiento.

Criterio / Alternativa	Velocidad I2S	Rendimiento del Procesador	Facilidad de programación	Costo	Ponderación	Prioridad
ESP32-WROOM-32D	0,14	0,28	0,06	0,06	0,53	1
STM32H7	0,28	0,14	0,03	0,03	0,47	2
		Suma			1	
ESP32-WROOM-32D>STM32H7						

De acuerdo con los datos de la Tabla 4.18, el ESP32-WROOM-32D tiene una mayor prioridad 1, frente al STM32H7, esto de acuerdo varios criterios de evaluación, como velocidad I2S, rendimiento del procesador, facilidad de programación y costo. Por lo tanto, se selecciona el ESP32-WROOM-32D como unidad de procesamiento, para el sistema de medición de sonido.

4.4.3 Selección del Micrófono

Debido a que anteriormente se seleccionó el protocolo I2S, es coherente elegir un micrófono compatible con este protocolo, para garantizar una comunicación efectiva y una alta calidad de sonido.

4.4.3.1 INMP441. Este es un micrófono digital, basado en tecnología MEMS, destaca por su capacidad de recibir sonidos desde cualquier dirección con gran precisión y eficiencia. Este micrófono integra en su interior un convertidor analógico-digital (ADC), filtros anti-aliasing para reducir ruido y optimizar la calidad del audio. Opera con frecuencias nominales de muestreo de 16 kHz y 48 kHz, complementado con una interfaz I2S de 24 bits. No obstante, el protocolo requiere tramas de 32 bits, donde 24 bits con información importante y los 8 bits completados con ceros, tanto en modo mono como estéreo, es decir que para una sincronización correcta es necesario de 32 ciclos de SCK por trama [50].

Tabla 4.19

Características del Micrófono Omnidireccional INMP441 [50].

INMP441	
Característica	Detalle
Interfaz digital	I²S con datos de 24 bits
Relación señal/ruido (SNR)	61 dBA
Sensibilidad	-26 dBFS
Respuesta de frecuencia	Plana de 60 Hz a 15 kHz
Consumo de corriente	1,4 mA
Relación señal/ruido (PSR)	-75 dBFS
Filtro digital Pasa Banda	0,423xFs
Temperatura de operación	-40 a 85°C
Costo	5$

4.4.3.2 SPH0645LM4H. Es un micrófono digital de muy bajo consumo y eficiente, que combina un sensor MEMS de alta precisión con un circuito integrado de procesamiento de señal. Este proceso comienza con el sensor MEMS que convierte la presión acústica en una señal eléctrica analógica, la cual es amplificada y transformada en digital mediante un convertidor sigma-delta (ADC). Posteriormente, un decimador reduce la frecuencia de muestreo por un factor de 64, generando una señal PCM de 24 bits (con 18 bits de precisión y 86 bits sobrantes en cero). Un filtro pasa-bajos elimina componentes de alta frecuencia, finalmente cuenta con un control triestado sincroniza la salida de datos (DATA) con las señales WS y SELECT, permitiendo la operación simultánea de dos micrófonos en un único bus I2S [51].

Tabla 4.20

Características del Micrófono PH0645LM4H-B [51].

SPH0645LM4H	
Característica	Detalle
Interfaz digital	I²S con datos de 24 bits
Relación señal/ruido (SNR)	65dBA
Sensibilidad	-29 dBFS
Respuesta de frecuencia	50Hz – 15 KHz
Consumo de corriente	100mA
Relación señal/ruido (PSR)	-86 dB
Temperatura de operación	-40 a 100°C
Costo	7$

4.4.3.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. Para la selección del micrófono digital (I2S) más adecuado, se han considerado los siguientes criterios:

- Respuesta de frecuencia. El micrófono debe cubrir el rango de frecuencias hasta un máximo de 15 kHz.

- Consumo de corriente. Importante para una gestión eficiente de la energía, especialmente en dispositivos con limitaciones energéticas.
- Costo. El costo debe estar equilibrado para optimizar los recursos sin comprometer las características

En la siguiente Tabla 4.20 se comparan los criterios considerados para la selección de un micrófono que se utilizará en el sistema de medición de sonido para el monitoreo del grado de tostado de café. Cada criterio ha sido ponderado en función de su relevancia.

Tabla 4.21

Evaluación de Micrófono por Criterios Ponderados.

Criterio	Respuesta de frecuencia	Consumo de corriente	Costo	∑+1	Ponderación
Respuesta de frecuencia	-	1	1	3	0,50
Consumo de corriente	0	-	1	2	0,33
Costo	0	0	-	1	0,17
	Suma			6	1

De acuerdo con los datos de la Tabla 4.21, la respuesta de frecuencia es el criterio más importante, ya que garantiza la captura precisa de los sonidos. En segundo lugar, el consumo de corriente es importante para dispositivos que necesitan alta eficiencia energética. Finalmente, el costo tiene menor prioridad en esta evaluación, al ser menos crítico que los aspectos técnicos.

Criterios ordenados de acuerdo con su importancia:

Respuesta de frecuencia > Consumo de corriente > Costo

Tabla 4.22

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Respuesta de Frecuencia.

Respuesta de Frecuencia				
Alternativa	INMP441	SPH0645LM4H	∑+1	Ponderación
INMP441	-	0,5	1,5	0,50
SPH0645LM4H	0,5	-	1,5	0,50
	Suma		3	1
INMP441 = SPH0645LM4H				

De acuerdo con los datos de la Tabla 4.22, el INMP441 y el SPH0645LM4H tienen igual ponderación en respuesta de frecuencia, tal que los dos micrófonos son igualmente eficaces debido a que cuenta con similares características. Por lo tanto, cualquiera de los dos es una opción válida.

Tabla 4.23

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Consumo de Corriente.

Consumo de Corriente				
Alternativa	INMP441	SPH0645LM4H	∑+1	Ponderación
INMP441	-	1	2	0,67
SPH0645LM4H	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
INMP441 > SPH0645LM4H				

Los datos de la Tabla 4.23, indican que el consumo del INMP441 tiene un valor de ponderación de 0,67, mientras que el SPH0645LM4H presenta un valor de 0,33. Con base en estos

resultados, el INMP441 es la mejor opción debido a su menor consumo de corriente en comparación con el SPH0645LM4H.

Tabla 4.24

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Costo.

Costo				
Alternativa	INMP441	SPH0645LM4H	∑+1	Ponderación
INMP441	-	1	2	0,67
SPH0645LM4H	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
INMP441 > SPH0645LM4H				

Los datos de la Tabla 4.24, indican que el costo del INMP441 tiene un valor de ponderación de 0,67, mientras que el SPH0645LM4H presenta un valor de 0,33. De acuerdo con estos resultados el INMP441 es la mejor opción debido a su menor costo en comparación con el SPH0645LM4H.

Tabla 4.25

Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Micrófonos.

Criterio / Alternativa	Respuesta de frecuencia	Consumo de corriente	Costo	Ponderación	Prioridad
INMP441	0,25	0,22	0,11	0,58	1
SPH0645LM4H	0,25	0,11	0,06	0,42	2
		Suma		1	

Los datos de la **Tabla *4.25***Tabla 4.25, indican que el micrófono INMP441, cuenta una ponderación total de 0,58, obtiene la prioridad 1, mientras que el micrófono SPH0645LM4H, con

una ponderación de 0,42, recibe la prioridad 2. Con base en estos resultados, se selecciona como micrófono el INMP441.

4.4.4 Selección de la Visualización

Para asegurar una visualización clara del grado de tostado y cumpliendo con los requerimientos técnicos, se proponen las siguientes alternativas.

4.4.4.1 Módulo Semáforo LED. Este módulo está equipado con tres diodos emisores de luz (LEDs) de 8 mm de alta luminosidad, diferenciados por color: verde, amarillo y rojo. Incluye resistencias integradas, lo que permite su conexión directa a fuentes de alimentación de 3.3V o 5V sin necesidad de componentes adicionales para limitar la corriente de los LEDs [52].

Tabla 4.26

Características del Módulo Semáforo LED.

Módulo Semáforo LED	
Característica	Especificación
Alimentación	5 voltios 3.3 voltios
Corriente típica	Rojo 13mA Amarillo 13mA Verde 25mA
Ángulo de visión	45º
Diámetro	10mm
Número de pines	4 (Tierra, VCC)
Leds	Difusos
Precio	2$

4.4.4.2 Pantalla OLED 128×64. Esta pantalla OLED cuenta con una excelente relación entre calidad y costo. Con una resolución de 128x64 píxeles y un bajo consumo de energía, eficiente para aplicaciones que requieren visualización gráfica. Además, utiliza una interfaz de comunicación I2C**.**

Tabla 4.27

Características de la Pantalla Oled 128x64.

Pantalla Oled 128×64	
Característica	Especificación
Color del LED	Azul
Resolución	128×64
Potencia	0.06W
Rango de fuente de suministro	DC 3V-5V
Temperatura de funcionamiento	-30~70°C
Dimensiones	29.28 x 27.1 mm
Compatibilidad de nivel I/O	3.3V y 5V
Chip de control OLED	SSD136
Pines	- Tierra - 2.2V-5.5V - CLK (clock) - MOSI data
Precio	6,40 $

4.4.4.3 Selección por el Método de Criterios Ponderados. Los criterios considerados para la selección de la representación visual son los siguientes:

- Visibilidad: Garantiza que la información sea clara y fácil de interpretar, incluso a distancias considerables.

- Facilidad de Implementación: Permite una integración sencilla a dispositivos y otros sistemas, reduciendo la complejidad de instalación.
- Costo: Optimiza los recursos económicos y técnicos sin comprometer la claridad visual, asegurando una solución eficiente y rentable.

En la siguiente Tabla 4.28 se evalúan los criterios considerados para la selección de visualización que se utilizará en el sistema de medición de sonido para el monitoreo del grado de tostado de café. Cada criterio ha sido ponderado en función de su relevancia.

Tabla 4.28

Evaluación de Visualización por Criterios Ponderados.

Criterio	Visibilidad	Facilidad de Implementación	Costo	∑+1	Ponderación
Visibilidad	-	1	1	3	0,50
Facilidad de Implementación	0	-	1	2	0,33
Costo	0	0	-	1	0,17
		Suma		6	1

Los datos de la Tabla 4.28, indican que la Visibilidad y Facilidad de Implementación son los criterios más relevantes, con ponderaciones de 0,50 y 0,33 respectivamente. Por otro lado, el Costo tiene una ponderación menor, con un valor de 0,17.

De acuerdo con estos resultados los criterios ordenados según su prioridad son:

Visibilidad > Facilidad de Implementación > Costo

Tabla 4.29

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Visibilidad.

Visibilidad				
Alternativa	Módulo Semáforo LED	Pantalla OLED 128x64	∑+1	Ponderación
Módulo Semáforo LED	-	1	2	0,67
Pantalla OLED 128x64	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
Módulo Semáforo LED >Pantalla OLED 128x64				

Los datos de la Tabla 4.29, presenta la ponderación de las alternativas evaluadas bajo el criterio de Visibilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, el Módulo Semáforo LED tiene una ponderación de 0,67, mientras que la Pantalla OLED 128x6 obtiene 0,33. Esta comparación determina que el Módulo Semáforo Led es la opción más favorable en visibilidad.

Tabla 4.30

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Facilidad de Implementación.

Facilidad de Implementación				
Alternativa	Módulo Semáforo LED	Pantalla OLED 128X64	∑+1	Ponderación
Módulo Semáforo LED	-	1	2	0,67
Pantalla OLED 128X64	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
Módulo Semáforo LED>Pantalla OLED 128x6				

Los datos de la Tabla 4.30, presentan la ponderación de las alternativas evaluadas bajo el criterio de Facilidad de Implementación. De acuerdo con los resultados, el Módulo Semáforo LED obtiene una ponderación de 0,67, mientras que la Pantalla OLED 218x6 alcanza un valor de 0,33. De modo que, el Módulo Semáforo LED es la alternativa más favorable en términos de facilidad de implementación.

Tabla 4.31

Ponderación de Alternativas según el Criterio de Costo.

Costo				
Alternativa	Módulo Semáforo LED	Pantalla OLED 128x6	∑+1	Ponderación
Módulo Semáforo LED	-	1	2	0,67
Pantalla OLED 128x6	0	-	1	0,33
	Suma		3	1
Módulo Semáforo LED >Pantalla OLED 128x6				

Los datos de la Tabla 4.31, presentan la ponderación de las alternativas evaluadas bajo el criterio de Costo. El Módulo Semáforo LED obtiene una ponderación de 0,67, mientras que la Pantalla OLED 128x64 alcanza un valor de 0,33. Con base en estos datos, se concluye que el Módulo Semáforo LED representa la alternativa más favorable en términos de costo.

Tabla 4.32

Resultados de las Ponderaciones de las Alternativas de Visualización.

Criterio / Alternativa	Visibilidad	Facilidad de Implementación	Costo	Ponderación	Prioridad
Módulo Semáforo LED	0,33	0,22	0,11	0,67	1
Pantalla OLED 128x6	0,17	0,11	0,06	0,33	2
Suma				1	

Los datos de la Tabla 4.32, resume las ponderaciones de las alternativas de visualización. El Módulo Semáforo LED obtiene una ponderación global de 0,67, siendo la opción de prioridad 1. Por el contrario, la Pantalla OLED 128x6, con una ponderación global de 0,33 obtiene una prioridad 2. Estos resultados confirman que el Módulo Semáforo LED es la alternativa más viable.

4.4.5 Solución Mediante Criterios Ponderados

La solución propuesta integra componentes seleccionados mediante un análisis multicriterio con ponderaciones específicas para cada selección, para la comunicación de audio, se seleccionó el protocolo I2S, debido a su diseño especializado en la transmisión de audio digital a alta velocidad. Como unidad de procesamiento, se eligió el módulo ESP32-WROOM-32D, destacado por su capacidad de procesamiento, facilidad de programación y bajo costo. Para la captura de sonido, el micrófono INMP441 es seleccionado por respuesta de frecuencia, eficiencia energética y bajo costo. Finalmente, el Módulo Semáforo LED fue seleccionado por su visibilidad, simplicidad de implementación y bajo costo.

Esta selección estructurada de componentes garantiza un sistema alineado con los requerimientos funcionales y técnicos definidos, asegurando su operatividad durante el proceso de tostado de café.

4.5 Desarrollo y Diseño del Hardware

Este apartado describe el diseño e implementación del hardware para el sistema de medición acústica orientado al monitoreo del grado de tostado del café, cumpliendo con los requerimientos funcionales y técnicos predefinidos. Se incluye una descripción detallada del funcionamiento del sistema, junto con la integración de los componentes electrónicos y el diseño de la caja contenido. Finalmente, se proporciona información sobre el consumo de corriente total del sistema. Cabe destacar que, a partir de esta mención, el módulo ESP32-WROOM-32D se denominará ESP32 en este documento, con el fin de simplificar la nomenclatura.

4.5.1 Diagrama de Funcionamiento del Sistema de Monitoreo Acústico

El diseño del diagrama de funcionamiento del sistema permite comprender la interacción entre los componentes que conforman el sistema de monitoreo acústico. Este sistema está compuesto por tres etapas: adquisición de señales, procesamiento y visualización. Cada una de estas etapas desempeña un papel crucial en el objetivo del sistema, para determinar el grado de tostado del café durante el proceso de tueste, a través de la identificación de los sonidos conocidos como primer y segundo crack.

En la siguiente Figura 4.6, se presenta el diagrama funcional del sistema, en el cual se muestran de manera gráfica y secuencial las tres etapas.

Figura 4.6

Diagrama de Funcionamiento del Sistema de Medición de Sonido para Monitoreo del Grado de Tostado de Café.

En la etapa adquisición de señales, se emplea el micrófono INMP441, el cual es el encargado de captura los sonidos generados durante el proceso de tostado. Este componente registra señales acústicas con alta sensibilidad, asegurando una calidad óptima para el análisis posterior.

En la etapa de procesamiento, el microcontrolador ESP32 recibe los datos provenientes del micrófono y se encarga del procesamiento de la señal, para lograr identificar los sonidos del primer y segundo crack, de otros sonidos generados durante el proceso de tostado, para lograr así el grado de tostado del café durante el proceso de tueste. Además, el microcontrolador gestiona el módulo semáforo LED, activando las luces correspondientes según el estado del tostado.

En la etapa de visualización, el sistema utiliza un módulo semáforo LED para proporcionar una indicación visual del estado del tostado. Este módulo consta de tres colores, cada uno con un significado específico: el color verde indica que el sistema está encendido y monitoreando, el color amarillo señala el tueste claro (primer crack), y el color rojo indica el tueste oscuro (segundo crack).

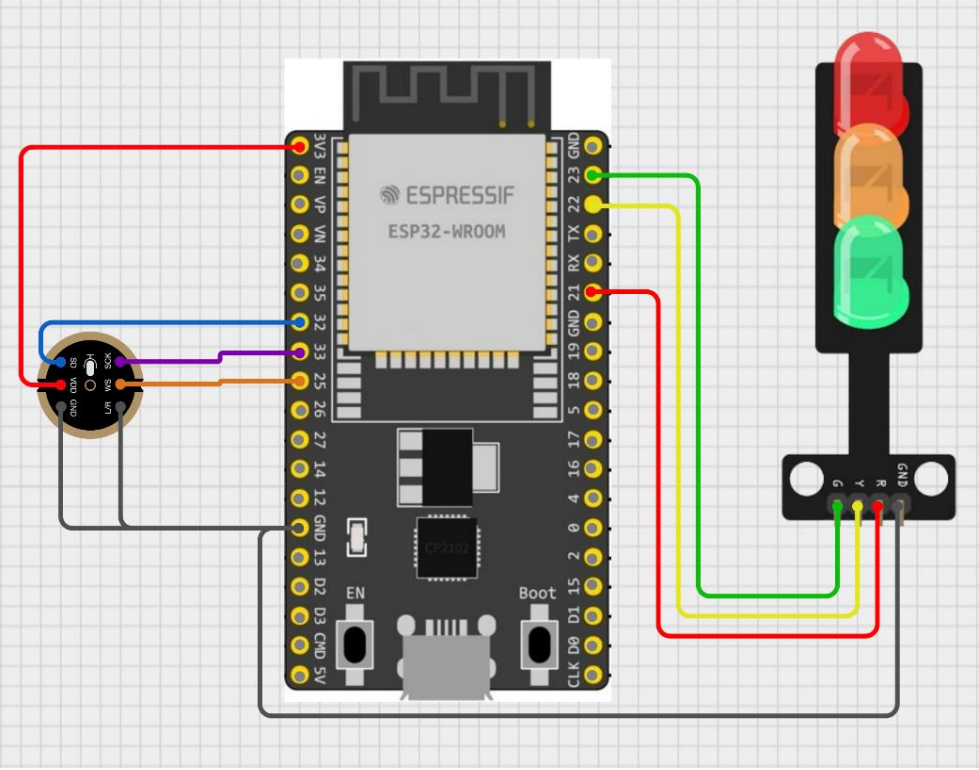
4.5.2 Diagrama de Conexión del Hardware

En esta sección se describe la conexión de los componentes del sistema. Cada componente se conecta a pines específicos del ESP32, asegurando tanto la comunicación adecuada como el correcto funcionamiento del circuito. Es importante destacar que todas las conexiones a tierra (GND) están unificadas para garantizar la estabilidad y funcionamiento del sistema. En la siguiente Figura 4.7, se muestra un diagrama visual que ilustra estas conexiones.

Para una interpretación más precisa y detallada de las asignaciones de pines, se recomienda consultar Tabla 4.33.

Figura 4.7

Diagrama de Conexión del Sistema de Monitoreo Acústico para Monitoreo del Grado de Tostado de Café.



En la siguiente Tabla 4.33, se detallan las conexiones específicas entre los pines de cada componente y el microcontrolador ESP32. Esta tabla proporciona una descripción clara y organizada de las asignaciones de pines, lo que permite la replicación del circuito y la verificación de las conexiones de manera eficiente.

Tabla 4.33

Conexión de Pines al ESP32 (ESP32-WROOM-32D).

Componente	Pin Componente	Pin del ESP32	Descripción
Micrófono INMP441	SD	GPIO32	Reloj de datos para I2S,
	SCK	GPIO33	Salida de datos para I2S.
	WS	GPIO25	Selección de palabra (Word Select) para I2S.
	GND	GND	Conexión a tierra común.
	L/R	GND	Configura el micrófono en modo mono (canal izquierdo).
Módulo Semáforo LED	LED Roja (R)	GPIO21	Control de la luz roja del semáforo.
	LED Amarillo (Y)	GPIO22	Control del LED rojo.
	LED Verde (G)	GPIO23	Control del LED amarillo.
	GND	GND	Conexión a tierra común.

Nota. El sistema se alimenta a través del puerto Micro USB del módulo ESP32, eliminando la necesidad de una fuente de alimentación externa. En la sección 4.6.3, se realizará un análisis energético para verificar que la alimentación del Micro USB es suficiente para el correcto funcionamiento de todos los componentes.

4.5.3 Análisis Energético

En esta sección se evalúa la capacidad del ESP32 para alimentar tanto su propio consumo como el de cada componente conectado, para garantizar que la fuente de alimentación por Micro USB pueda soportar la carga total del sistema sin comprometer su rendimiento. Para ello, se utilizan las ecuaciones de potencia (Ecuaciones 3 y 4) y los valores de consumo proporcionados por las hojas de datos de los componentes.

$$P = V * R \qquad \text{Ecuación 3}$$

$$P = I^2 * R \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

P: Potencia [Watts]

V: Voltaje [Voltios]

I: Corriente [Amperios]

4.5.3.1 Cálculo del Consumo de Corriente. El consumo de corriente total de un sistema es determinado sumando los consumos individuales de cada componente, teniendo encuenta que en un circuito en paralelo, el voltaje permanece constante, mientras que la corriente varía. Por lo tanto, la corriente total se expresa como:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{ESP32}} + I_{\text{LED}} + I_{\text{INMP441}}$$

Donde:

I_{total} es el consumo total del sistema.

I_{ESP32} es el consumo del ESP32-WROOM-32D (100mA)

I_{LED} es el consumo del módulo de semáforo LED (60 mA)

I_{INMP441} es el consumo del micrófono INMP441 (1.4mA)

Sustituyendo los valores, se obtiene:

$$I_{\text{total}} = 100\,\text{mA} + 60\,\text{mA} + 1.4\,\text{mA} = 161.4\,\text{mA}$$

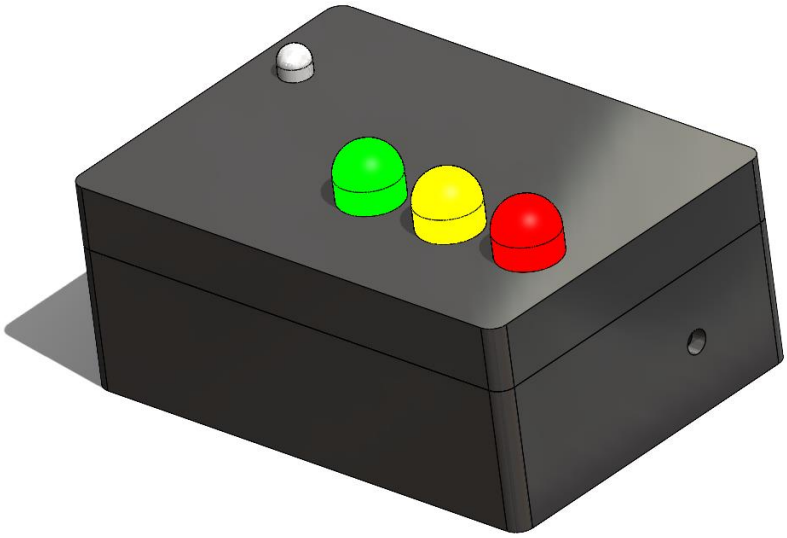
4.5.3.2 Verificación de la Fuente de Alimentación. De acuerdo con la hoja de datos del ESP32 [46], el consumo de corriente puede alcanzar hasta 240 mA cuando el dispositivo transmite en 802.11b a 1 Mbps. Sin embargo, el consumo total del sistema 161.4 mA, esto confirma que la alimentación Micro USB es suficiente para garantizar un funcionamiento estable y eficiente del sistema.

4.5.4 Diseño de Caja Contenedora para el Sistema de Medición de Sonido para el Monitoreo del Tostado de Café

El diseño de la caja se desarrolló utilizando el software SolidWorks Education 2021-2022, seleccionado por contar con conocimientos previos de su manejo. En la siguiente Figura 4.8, se ilustra el modelo en 3D de la caja contenedora diseñada para albergar el sistema de medición acústica para monitoreo del grado de tostado del café.

Figura 4.8

Caja Contenedora para el Sistema de Medición Acústica para el Monitoreo de Grado de Tostado de Café.



Nota. La caja está compuesta por dos piezas principales: la base y la tapa, las cuales se diferencian visualmente por el color negro. Adicionalmente, se diseñó un botón de reinicio de color blanco.

Para la fabricación de las piezas, se optó por la impresión en 3D. El material seleccionado fue el PLA, un polímero biodegradable compuesto por almidón de maíz, seleccionado por ser versátil, sostenible y fácil de emplear [53].

4.6 Desarrollo del Algoritmo e Implementación

En esta sección, se desarrolla y valida un algoritmo en Python para la clasificación de los sonidos producidos por el grano de café al ser tostado, basado en los rangos de frecuencia y repetitividad de estos, para lograr identificar el primer y segundo crac. Una vez validado el algoritmo, se implementa ajustándolo a los componentes seleccionados para el sistema.

4.6.1 Diseño del Algoritmo en Python

El algoritmo se fundamenta en los parámetros acústicos derivados del análisis final del resumen de los resultados acústicos, que sustentan la elección de los rangos de frecuencia y los criterios de clasificación para la detección del primer y segundo crack.

El algoritmo inicia con la carga de un archivo de audio formato wave (.wav), seguidamente se aplica un filtro pasaban, diseño mediante el método de Butterworth, permitiendo conservas frecuencias en el rango de 2.5 kHz a 18 kHz. Posteriormente se establece un superior al ruido para iniciar con detección si no supera el umbral será considerado como un archivo de ruido

La señal se procesa por segmentos en ventanas de 1 segundo para detección de sonidos que superen el umbral. Dentro de cada ventana se establece que la detección mínima entre sonidos debe ser 0.5 segundos, para evitar detecciones falsas.

Cuando el umbral definido es superado, se realiza un análisis espectral individual de picos que superan el umbral para esto se empela la FFT usando una venta de Hamming con 512 muestras, una vez generado el espectro se extraer la frecuencia dominante, si las frecuencias dominantes se encuentran en rango de 8 kHz a 10 kHz o en el rango14 kHz a 15 kHz, los sonidos son válidos

como cracks, si no están dentro de los rangos anteriormente establecido los picos no son validados como cracks, por lo sigue la detección del siguiente pico.

Con los cracks validados, a partir del primero se genera una ventana de 3 segundos para la clasificación de los mismos. Empleando la repetibilidad de los cracks se cuenta, durante la ventana generada de 3 segundos, tal modo que si se tiene 2 o menos cracks validos se clasifica como primer crack, por el contrario si durante la ventana se tiene 3 o más cracks se clasifica como segundo crack, dicha estrategia que se fundamenta gracias a que los crack pertenecientes al primer crack son dispersos, por el contrario los del segundo crack se presentan con más repetibilidad, esto evidenciado durante el análisis preliminar.

4.6.1.1 Validación del Algoritmo. Para validar el algoritmo, se llevaron a cabo pruebas utilizando dos nuevas grabaciones (“Tueste 3” y “Tueste 4”), obtenidas en condiciones similares a las empleadas en la caracterización acústica inicial.

Una vez obtenidas las grabaciones, se realizó una extracción manual de los segmentos correspondientes al primer y segundo crack. Para optimizar el proceso de validación, estos sonidos característicos se dividieron en fragmentos de 6 segundos que abarcan tres etapas clave: inicio, medio y final de cada crack. Esta segmentación permitirá evaluar la capacidad del algoritmo para identificar los patrones acústicos en las distintas fases del proceso, garantizando una validación integral tanto para el primer como para el segundo crack.

Los resultados se respaldan con evidencia visual a través de la Figura 4.9 y Figura 4.10, las misma presentan las identificaciones correctas del primer y segundo crack, mientras que la Tabla 4.34 y Tabla 4.35, sintetizan el desempeño global del algoritmo de acuerdo la fragmentación de las grabaciones para el primer y segundo crack.

Figura 4.9

Validación del Algoritmo en Etapa Inicial del Primer Crack - Fragmento Perteneciente al Tueste 3 con Identificación Correcta.

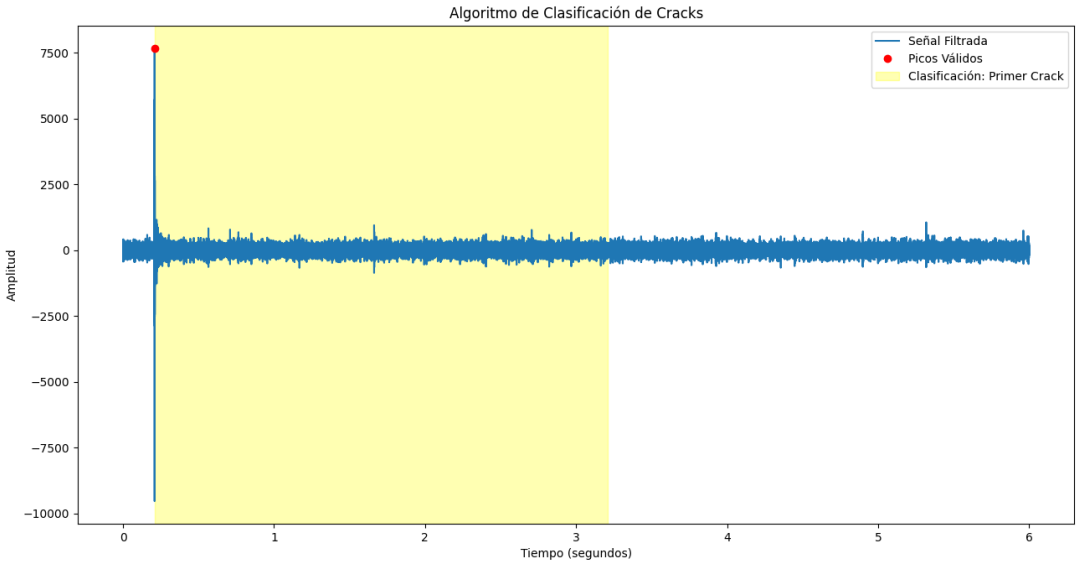


Figura 4.10

Validación del Algoritmo en Etapa Media del Segundo Crack - Fragmento Perteneciente al Tueste 4 con Identificación Correcta.

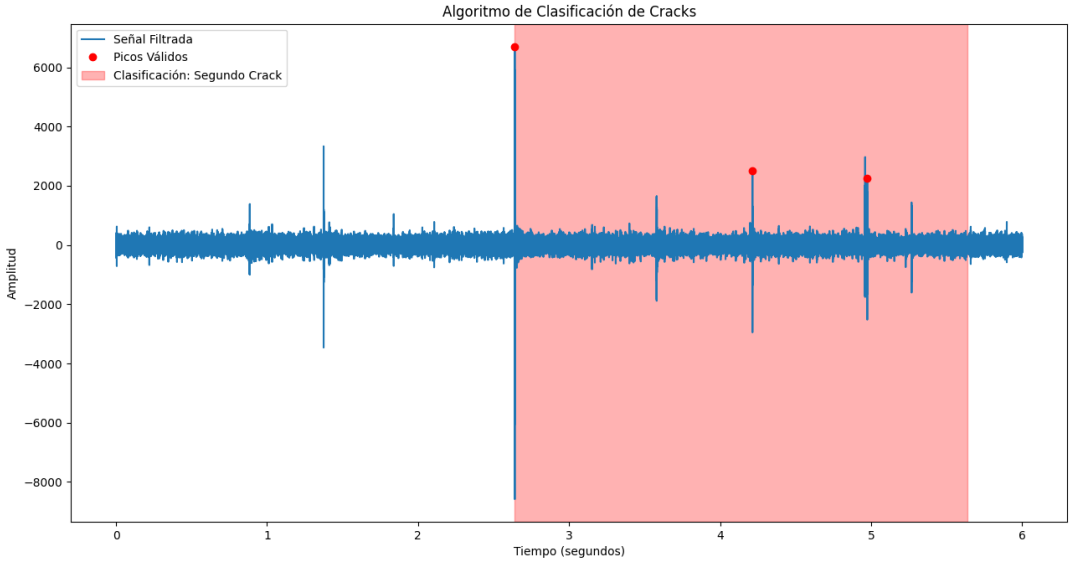


Tabla 4.34

Resultados de la Validación del Algoritmo para la Identificación del Primer Crack.

Tueste	Fragmento	Primer Crack Detectado	Identificación Correcta
3	Inicial	Si	Si
	Medio	Si	Si
	Final	Si	Si
4	Inicial	Si	Si
	Medio	Si	Si
	Final	Si	Si

Tabla 4.35

Resultados de la Validación del Algoritmo para la Identificación del Segundo Crack.

Tueste	Fragmento	Segundo Crack Detectado	Identificación Correcta
3	Inicial	No	No
	Medio	Si	Si
	Final	Si	Si
4	Inicial	No	No
	Medio	Si	Si
	Final	Si	Si

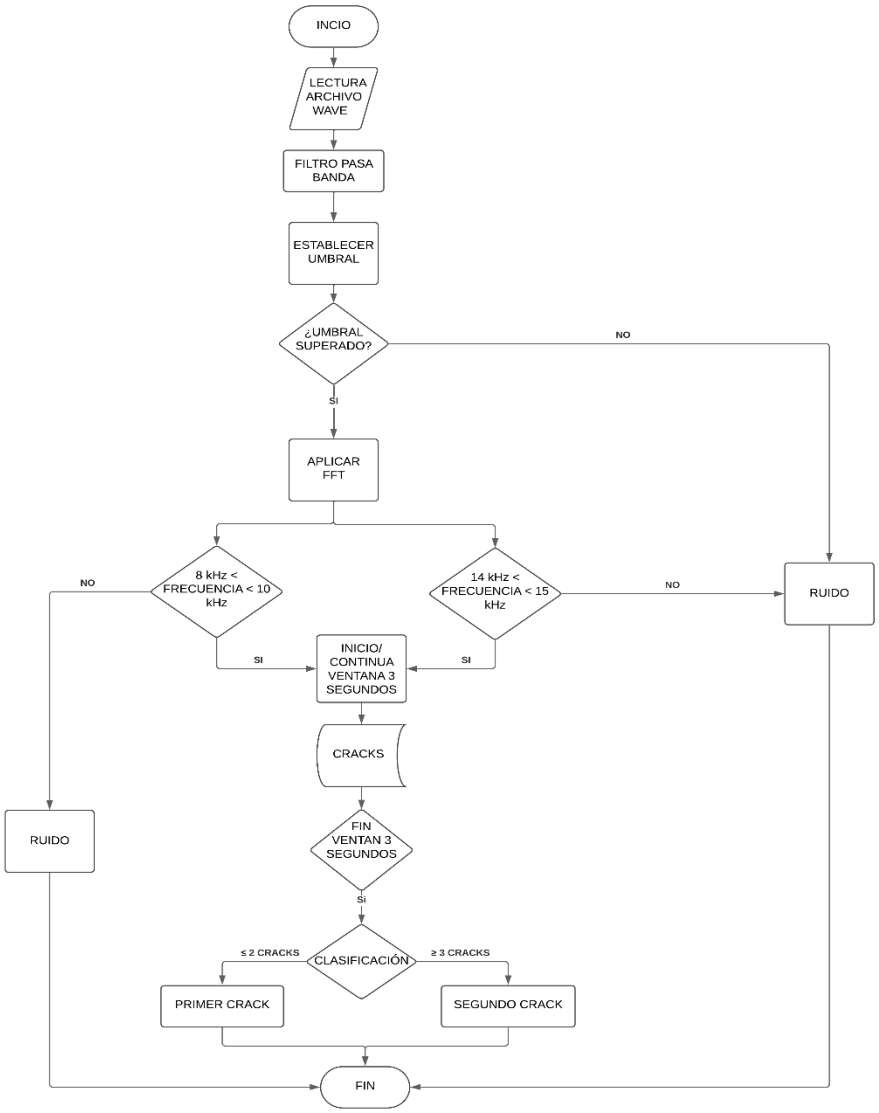
Las tablas Tabla 4.34 y Tabla 4.35 junto con las figuras Figura 4.9 y Figura 4.10, presentan los resultados de la validación del algoritmo para la identificación del primer y segundo crack durante el proceso de tueste. Los datos muestran que el algoritmo identifico correctamente todos los fragmentos del primer crack en ambos tuestes. Para el segundo crack, en los fragmentos iniciales se identificó como primer crack en ambos tuestes, esto debido a los cracks se presentan de forma

dispersa y baja repetibilidad, sin embargo, en los siguientes segmentos se realiza la identificación correcta. Estos resultados validan la eficacia del algoritmo para la detección del primer y segundo crack.

4.6.1.2 Diagrama Funcional del Algoritmo. Tras validar la eficacia del algoritmo, la Figura 4.11 muestra su diagrama funcional. Este diagrama ilustra el flujo del algoritmo, desde la carga del audio hasta la clasificación final.

Figura 4.11

Diagrama de Flujo del Algoritmo en Python para la Identificación del Primer y Segundo Crack.



4.6.2 Implementación del Algoritmo

Con el algoritmo validado para la clasificación del primer y segundo crack se implementó en un microcontrolador ESP32, adaptándose a sus limitaciones de hardware. Físicamente, se utilizó el micrófono INMP441 para la adquisición acústica, y un módulo LED para visualizar resultados. Se utilizó el entorno de desarrollo Arduino IDE, empleando las bibliotecas driver/i2s.h (comunicación I2S) y arduinoFFT.h (versión 2.0.4 [54]). La selección de estas bibliotecas se fundamentó en su compatibilidad con el microcontrolador y su demostrada efectividad en trabajos previos con procesamiento de señales y análisis espectral, obteniendo resultados satisfactorios como se evidencia en sistemas de monitoreo respiratorio y análisis de audio [55], [56]. Esto asegura un análisis espectral correcto dentro de las restricciones del hardware.

4.6.2.1 Configuración Técnica y Adquisición de Señales. La frecuencia de muestreo empleada fue de 48 kHz, valor nominal para el micrófono INMP441 y superior al doble de la frecuencia máxima de interés (15 kHz), cumpliendo con el teorema de Nyquist. Además, esta frecuencia de muestreo cubre adecuadamente el rango de audición humana, que generalmente va de 20 Hz a 20 kHz. Esto implica que cada muestra se adquiere cada:

$$Ts \approx 20.83\mu s$$

Para la correcta sincronización del protocolo I2S, se requieren 32 ciclos de reloj SCK por cada palabra de datos (32 bits, de los cuales 24 son útiles y 8 son de relleno de ceros). Empleando la Ecuación 2 se obtiene:

$$F_{SCK} = F_{BLCK} = 1.536\ MHz$$

Este valor que se encuentra dentro de los límites operativos tanto del micrófono como del ESP32, asegurando la transmisión estable de datos en modo mono.

El ESP32 emplea un mecanismo de acceso directo a memoria (DMA) permitiendo leer los datos del micrófono sin intervención del continua del CPU. Empleando un tamaño de buffer de 512 muestras, se obtiene la siguiente tasa de llenado:

$$T_{buffer} \approx 10{,}67\ ms$$

4.6.2.2 Procesamiento Digital de Señales. Para eliminar el ruido de frecuencias no relevantes para la detección de cracks, se implementó un filtro digital IIR pasa-banda de segundo orden. Los coeficientes se calcularon mediante el método de diseño Butterworth, conocido por su respuesta plana en la banda de paso. Para la implementación eficiente de este filtro en el microcontrolador, se utilizó el Algorithm 3: Band-pass filter [57] propuesto por V.-K. Tran, B.-T. Thai, H. Pham, V.-K. Nguyen, y V.-K. Nguyen.

Para el análisis espectral de la señal de audio digitalizada, se implementó la FFT utilizando la biblioteca arduinofft. Con el objetivo de mitigar el efecto de discontinuidades en los bordes de la ventana temporal, se aplicó una ventana de Hamming. El análisis FFT se realizó sobre ventanas de 512 muestras, dada la frecuencia de muestreo de 48 kHz, resulta en una resolución espectral de 93.73 Hz.

4.6.2.3 Detección de Cracks. Para la detección de cracks, se implementó un método basado en umbral y análisis frecuencial. Inicialmente, se define un umbral de amplitud para la señal de audio filtrada. Cuando las muestras filtradas exceden este umbral preestablecido, se activa el procesamiento de la FFT para identificar la frecuencia dominante. Para la detección de la frecuencia dominante, se emplea la función FFT.majorPeak().

Una vez extraída la frecuencia dominante, se verifica si esta se encuentra dentro de los rangos de frecuencia de interés para la detección de cracks. En caso de detección afirmativa, se activa una ventana de tres segundos. Durante este periodo, se contabilizan las detecciones válidas,

implementando un tiempo de quinientos milisegundos entre cada detección válida para minimizar falsos positivos, y al finalizar dicha ventana, se procede a la clasificación en función a las detecciones acumuladas.

Si las detecciones acumuladas nos menores o igual a dos se identifica como primer crack, por el contrario, si son superiores o iguales a tres se identifica como segundo crack.

4.6.2.4 Determinación del Grado de Tostado. La determinación el grado de tostado del café, se basó en la identificación del primer crack y segundo crack. Según Robert Rusinek et al., el primer crack indica la llegada a un tueste claro [14]. Por otro lado, el segundo crack, de acuerdo con Yergenson, marca la transición entre un tueste medio y un tueste oscuro [58].

El sistema desarrollado se basa en la identificación de los tuestes claro y oscuro, debido a su relación clara y consistente con los cracks. La identificación del tueste claro se registrará en el momento en que se detecte el primer crack. Por su parte, para la identificación del tueste oscuro se empleará un tiempo de retardo tras la detección del segundo crack, con el objetivo de mejorar la transición hacia el tueste oscuro.

4.6.2.5 Visualización y Control del Proceso. El estado del sistema y el progreso del tueste se indican visualmente mediante un módulo semáforo LED. Al inicio de la operación, se activa un doble parpadeo del LED verde, señalizando que el sistema está en funcionamiento.

Una vez identificado el tueste claro, se activa el LED amarillo, representando visualmente este grado de tostado. Posteriormente, al alcanzarse el tueste oscuro, se activa el LED rojo, proporcionando una señalización de la transición hacia este grado de tostado.

De esta manera, el sistema ofrece una representación visual del progreso del tueste, permitiendo un seguimiento del grado de tostado durante el proceso.

4.6.2.6 Diagrama Funcional del Algoritmo Implementado. En la Figura 4.12 y Figura 4.13 muestran el flujo de datos del sistema de medición de sonido para el monitoreo del grado de tostado de café, desde la captura en el micrófono, el procesamiento digital y la activación de los indicadores LED.

Figura 4.12

Diagrama de Etapa de Adquisición y Filtrado del Sistema de Medición Acústica para el Monitoreo del Grado de Tostado de Café.

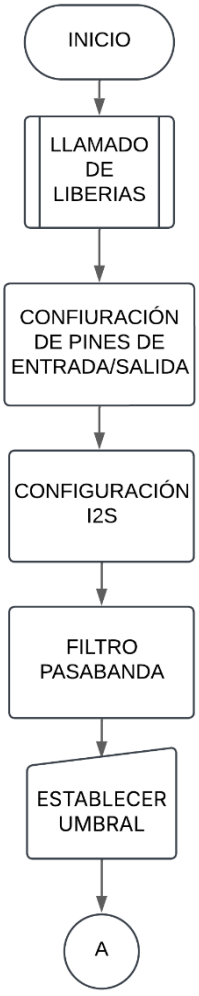
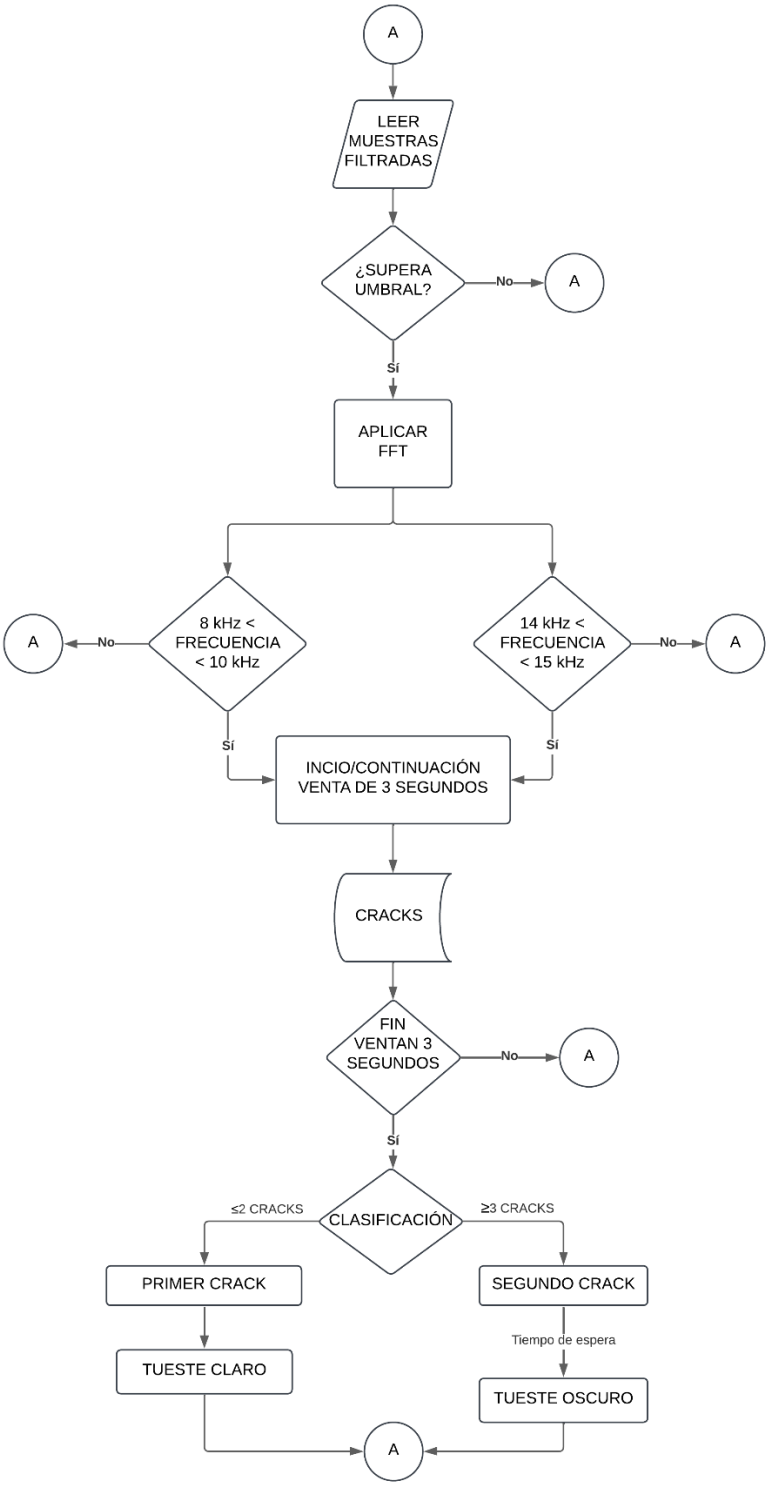


Figura 4.13

Diagrama de Flujo del Sistema de Clasificación de Cracks e Identificación del Tueste Claro y Oscuro.



4.7 Análisis de Costos

El desarrollo de un sistema de medición de sonido para el monitoreo del grado de tostado de café implica la integración de varios componentes electrónicos y piezas impresas en 3D. En la siguiente Tabla 4.36 se presentan los costos detallados de todo el sistema.

Tabla 4.36

Costos Totales del Sistema de Medición Acústica para el Monitore de Grado de Tostado de Café.

Descripción	Cantidad	Costo Unitario ($)	Costo Total ($)
Componentes Electrónicos			
ESP32-WROOM-32D	1	$12,00	$12,00
Micrófono INMP441	1	$5,00	$5,00
Módulo Semáforo LED	1	$2,00	$2,00
Otros componentes (cables, tornillos, etc.)	1	$3,00	$3,00
Componentes Impresos en 3D			
Caja	1	$2,50	$2,50
Tapa	1	$1,50	$1,50
Soporte Caja Contenedora			
Trípode	1	$3,00	$3,00
Total			$29

El costo total del sistema de medición acústica para el monitoreo del grado de tostado de café tiene un costo total de $29.00. Este análisis refleja que el sistema es económicamente accesible, con un balance razonable entre los costos de los componentes electrónicos y las demás piezas.

4.8 Pruebas de Funcionamiento

Para validar el sistema de medición acústica para el monitoreo del grado de tostado, se realizaron tres pruebas de funcionamiento independientes, cada una con tres muestras de 30 g de café verde especie arábica. Las condiciones experimentales se mantuvieron consistentes con las empleadas durante la caracterización acústica inicial y la validación del algoritmo en Python:

Muestra: Clasificada visualmente para garantizar uniformidad (30 g por muestra).

Equipamiento: Tostadora eléctrica de uso doméstico (JAVASTARR modelo BH8080)

Configuración experimental: Ambiente acústicamente aislado, sin interferencias sonoras externas significativas.

El sistema de medición acústica se montó sobre un trípode, tal que el micrófono quede ubicado encima y paralelo a la cámara de tostado de la máquina y a una distancia de seguridad de 3cm para evitar efectos térmicos en los componentes. Esta disposición se ilustra en la Figura 4.14.

Figura 4.14

Posicionamiento del Sistema de Medición Acústica para el Monitoreo del Grado de Tostado de Café.

4.8.1 Prueba 1: Identificación del Primer y Segundo Crack

Objetivo:

Verificar que el sistema de medición acústica detecte de forma precisa el primer y segundo crack durante el proceso de tostado, registrando automáticamente el tiempo.

El procedimiento detallado para la identificación del primer y segundo crack se presenta en la Tabla 4.37.

Tabla 4.37

Procedimiento para la Identificación del Primer y Segundo Crack.

Paso	Descripción	Notas
1	Verificar que se cumplan las condiciones experimentales establecidas.	Asegurar la uniformidad en cada muestra.
2	Verificar que se cumpla el posicionamiento del sistema de medición acústica.	Mantener la posición en cada prueba.
3	Iniciar el proceso de tostado, monitorear la detección del primer y segundo crack	Los eventos se visualizarán en el monitor serie.
4	Validar los cracks detectados mediante la audición y la activación de las LED.	Verificar si la detección realizada por el sistema coincide con la audición.
5	Registrar los tiempos en que se detectan válidos.	Anotar los tiempos.
6	Repetir la prueba en tres ocasiones para evaluar la consistencia de los resultados.	Evaluar la consistencia de los resultados.

Figura 4.15

Muestras Tostadas Después de la Identificación del Primer y Segundo crack.

Tabla 4.38

Resultados de la prueba 1: Identificación del Primer y Segundo crack.

Muestra	Tiempo Primer Crack (Sistema)	Tiempo Segundo Crack (Sistema)	Validación Primer Crack (Auditiva)	Validación Segundo Crack (Auditiva)	Observación General
1	9:29	13:07	Correcta	Correcta	Durante el inicio del segundo crack, se realizan falsos positivos del primer crack.
2	9:11	12:47	Correcta	Correcta	
3	9:30	13:05	Correcta	Correcta	

La Figura 4.15 muestra las muestras extraídas automáticamente en el momento en que se identificó el segundo crack. Estas presentan una coloración marrón medio-oscuro y una mínima presencia de aceite, posiblemente de un grado de tueste medio.

De acuerdo con los datos registrados en la Tabla 4.38, el sistema identificó correctamente el primer crack en todas las muestras. Sin embargo, durante el inicio del segundo crack, el sistema presentó falsos positivos, debido a que los cracks se presentan en forma dispersa y con baja repetitividad, identificándolos como primer crack. No obstante, cuando los cracks alcanzan una alta repetitividad, el sistema logra detectar correctamente el segundo crack.

Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos durante la validación del algoritmo de clasificación en Python. Así, se puede concluir que el sistema de detección es confiable, ya que identifica de manera efectiva ambos cracks de acuerdo con su caracterización.

Dado que las muestras extraídas al momento presentan las características físicas de un tueste medio-oscuro, se implementará un retraso de 15 segundos antes de la activación del indicador LED, con el fin de mejorar la identificación del tueste oscuro y permitir que este se desarrolle completamente.

4.8.2 Prueba 2: Detección del Tueste Claro

Objetivo:

Confirmar la indicación visual del tueste claro mediante la activación del LED amarillo y validar el grado de tueste mediante la evaluación del color del tostado, la superficie de los granos y el análisis del porcentaje de pérdida de peso.

El procedimiento detallado para la identificación del grado de tueste claro se presenta en la Tabla 4.39.

Tabla 4.39

Procedimiento para la Identificación del Tueste Claro.

Paso	Descripción	Notas
1	Verificar que se cumplan las condiciones experimentales establecidas.	Asegurar la uniformidad en cada muestra.
2	Verificar que se cumplan el posicionamiento del sistema de medición acústica.	Mantener la posición en cada prueba.
3	Iniciar el proceso de tostado y monitorear la activación del LED amarillo, indicador del tueste claro.	Observar el momento de activación del LED.
4	Detener el proceso de tostado en el instante en que se indique el tueste claro.	Esperar el proceso de enfriamiento.
5	Validar el grado de tueste el color del grano, la superficie del grano y el porcentaje de pérdida de peso.	Comparar los resultados con los estándares establecidos para un tueste claro.

Figura 4.16

Muestras Después de la Identificación del Tueste Claro.

Tabla 4.40

Resultados de la Prueba 2: Identificación del Tueste Claro.

Muestra	Activación LED Amarillo	Color del Grano	Superficie	Peso Final de la Muestra (g)	% Pérdida de Peso	Observaciones
4	Si	Marrón Claro	Seca	26,66	11,13	Funcionamiento correcto
5	Si	Marrón Claro	Seca	26,15	12,83	Funcionamiento correcto
6	Si	Marrón Claro	Seca	26,86	10,47	Funcionamiento correcto

Los resultados de la prueba 2, evidencian la activación del LED amarillo en todas las muestras analizadas. El color de los granos se mantuvo en un tono marrón claro, con una superficie seca y sin aceite, lo que es consistente con las características esperadas de un tueste ligero [14]. En cuanto a la pérdida de peso, los valores oscilaron entre el 10,47% y el 12,83%, lo que se encuentra dentro del rango esperado para tuestes claros de 11 a 13% [59]. Estos resultados indican que el sistema logra identificar el tueste claro, ya que su activación coincide con las características esperadas para este nivel de tostado.

4.8.3 Prueba 3: Detección del Tueste Oscuro

Objetivo:

Confirmar la indicación visual del tueste oscuro mediante la activación del LED rojo y validar el grado de tueste mediante la evaluación del color del tostado, la presencia de aceite en los granos y el análisis del porcentaje de pérdida de peso.

El procedimiento detallado para la identificación del grado de tueste oscuro se presenta en la Tabla 4.41.

Tabla 4.41

Procedimiento para la Identificación del Tueste Oscuro.

Paso	Descripción	Notas
1	Verificar que se cumplan las condiciones experimentales establecidas.	Asegurar la uniformidad en cada muestra.
2	Verificar que se cumplan el posicionamiento del sistema de medición acústica.	Mantener la posición en cada prueba.
3	Iniciar el proceso de tostado y monitorear la activación del LED rojo, indicador del tueste oscuro.	Observar el momento de activación del LED.
4	Detener el proceso de tostado en el instante en que se indique el tueste oscuro.	Esperar el proceso de enfriamiento.
5	Validar el grado de tueste el color del grano, la presencia de aceite y el porcentaje de pérdida de peso.	Comparar los resultados con los estándares establecidos para un tueste oscuro.

Figura 4.17

Muestras Después de la Identificación del Tueste Oscuro.

Tabla 4.42

Resultados de la Prueba 3: Identificación del Tueste Oscuro.

Muestra	Activación LED Rojo	Color del Grano	Presencia de Aceite	Peso Final (g)	% Pérdida de Peso	Observaciones
7	Si	Marrón Oscuro	Si	24,31	18,97	Funcionamiento correcto
8	Si	Marrón Oscuro	Si	24,00	20,00	Funcionamiento correcto
9	Si	Marrón Oscuro	Si	23,90	20,33	Funcionamiento correcto

En la Prueba 3, el sistema activo el LED rojo en todas las muestras. Los granos presentaron un color marrón oscuro y una superficie aceitosa, características propias de un tueste oscuro [14]. La pérdida de peso registrada de 18,97% a 20,33%, supera ligeramente el rango de 17%-18% asociado al inicio del segundo crack, esto sugiere que el proceso se extendió más allá de la fase inicial de del segundo crack, acercándose a valores propios de tuestes oscuros, que pueden presentar un rango superior al 22% para tueste muy oscuros [59]. Estos resultados indican que el sistema logra identificar el tueste oscuro, ya que su activación coincide con las características esperadas para este nivel de tostado.

5. CAPITULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de medición acústica para monitorear el grado de tostado del café cumplió con los objetivos planteados. En primer lugar, se determinaron los requisitos del sistema mediante la caracterización acústicas de los sonidos producidos durante el tueste, identificando que el primer y segundo crack ocurren en rangos de frecuencia entre 8 a 10 kHz y 14 a 15 kHz, diferenciando al primer crack que presenta una menor repetitividad, mientras que el segundo crack muestra una mayor repetibilidad. Esto permitió definir parámetros técnicos, como la respuesta frecuencial del micrófono, una unidad de procesamiento capaz de procesar señales. La clasificación visual de materia prima fue fundamental para garantizar la consistencia en las mediciones, además mantener un ambiente reducido de fuentes sonoras fuertes externas, permitieron obtener un sistema optimo.

El sistema se estructuró en adquisición, procesamiento y visualización. Para la adquisición, se implementó el protocolo I2S y el micrófono INMP441, asegurando una captura precisa de las señales sonoras. El procesamiento incluyó un filtro IIR Butterworth pasa-banda y un análisis espectral mediante FFT con ventana de Hamming, permitiendo la identificación del primer y segundo crack. La visualización se logró con un módulo semáforo LED que indica el grado de tueste, basado en la identificación previa de los cracks.

Durante la fase de diseño y construcción, primero se priorizó el consumo energético del sistema, el cual es de 161.4 mA, permitiendo su correcta alimentación mediante Micro USB. Posteriormente, se enfocó en la integración física de los componentes. Para ello, se diseñó una caja contenedora en SolidWorks Education 2021-2022, esta caja fue impresa en 3D utilizando material PLA, logrando una correcta integración física.

Las pruebas demostraron el correcto funcionamiento del sistema, logrando una precisión apropiada en la detección del primer y segundo crack. Sin embargo, la identificación del grado de tostado presentó limitaciones, ya que este depende no solo de los cracks, sino de variables no acústicas como el tiempo de desarrollo posterior a los cracks. No obstante, el utilizar la misma materia prima con una clasificación visual y un ambiente aislado para minimizar las fuentes sonoras externas, aseguraron que las pruebas tuvieran un desempeño consistente y replicable.

5.2 RECOMENDACIONES

Replicar la configuración experimental y los materiales empleados, para obtener resultados similares.

No instalar el sistema de monitoreo demasiado cerca a la tostadora, para evitar daños producidos por el calor generado durante el proceso de tueste.

Ampliar las pruebas de funcionamiento empleando una materia prima distinta (no uniforme) y en condiciones con interferencias sonora, para evaluar el funcionamiento del sistema en diferentes escenarios.

Integrar de sensores adicionales como temperatura y tiempo para mejorar la identificación del grado de tostado del café.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Rikolto, "Café ecuatoriano, aromatizando la economía nacional. | Rikolto en Latinoamérica." Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: https://latinoamerica.rikolto.org/proyectos/cafe-ecuatoriano-aromatizando-la-economia-nacional

[2] V. Osorio, J. Pabón, C. P. Gallego, and L. F. Echeverri, "Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la composición química del café," *Revista Cenicafé*, vol. 72, no. 1, p. e72103, 2021, doi: 10.38141/10778/72103.

[3] N. Yergenson and D. E. Aston, "Monitoring coffee roasting cracks and predicting with in situ near-infrared spectroscopy," *J Food Process Eng*, vol. 43, no. 2, p. e13305, Feb. 2020, doi: 10.1111/JFPE.13305.

[4] H. Siebald, M. Möller, F. Lenz, S. Kirchner, and O. Hensel, "Acoustic condition monitoring of coffee beans, during the roasting process," *LWT*, vol. 199, p. 116119, May 2024, doi: 10.1016/j.lwt.2024.116119.

[5] J. W. Wibowo, A. Munandar, O. Mahendra, J. V. Josary, D. I. S. Ningrum, and B. Sejati, "A review of a smart coffee roaster: electronics, design, and artificial intelligence," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1116, no. 1, p. 012011, Dec. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1116/1/012011.

[6] J. W. Wibowo *et al.*, "Preliminary Studies for Cracking Sound Identification During Coffee Roasting," in *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 729–734. doi: 10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427683.

[7] A. H. Falah, M. Rivai, and D. Purwanto, “Implementation of Gas and Sound Sensors on Temperature Control of Coffee Roaster Using Fuzzy Logic Method,” in *2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, IEEE, Aug. 2019, pp. 80–85. doi: 10.1109/ISITIA.2019.8937148.

[8] M. Münchow, J. Alstrup, I. Steen, and D. Giacalone, “Roasting Conditions and Coffee Flavor: A Multi-Study Empirical Investigation,” *Beverages 2020, Vol. 6, Page 29*, vol. 6, no. 2, p. 29, May 2020, doi: 10.3390/BEVERAGES6020029.

[9] D. Andrés, C. Ceballos, C. Alberto, and G. López, “OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TIEMPO Y TEMPERATURA EN EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ DEL CAUCA, TENIENDO EN CUENTA LA PERCEPCIÓN DEL CONSUMIDOR,” *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, Aug. 2019, doi: 10.26507/PONENCIA.264.

[10] S. Schenker and T. Rothgeb, “The Roast—Creating the Beans’ Signature,” in *The Craft and Science of Coffee*, Elsevier, 2017, pp. 245–271. doi: 10.1016/B978-0-12-803520-7.00011-6.

[11] C. Yeretzian, A. Jordan, R. Badoud, and W. Lindinger, “From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles,” *European Food Research and Technology*, vol. 214, no. 2, pp. 92–104, Feb. 2002, doi: 10.1007/s00217-001-0424-7.

[12] V. Vera and Y. Chacón, “EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TOSTADO EN GRANOS DE CAFÉ (Coffea arabica L.) VARIEDAD CATUAI CON EL BENEFICIO ‘HONEY ROJO’ DE LA EMPRESA CAFÉ TRINIDAD C.A.,” Aug. 2018.

[13] G. Rodríguez *et al.*, “Manual básico del catador de café Tueste de café Volumen 5 Manual Básico del Catador de Café MANUAL BASICO DEL CATADOR DE CAFÉ Volumen 5: Tueste del café Créditos”.

[14] R. Rusinek *et al.*, “Effect of the roasting level on the content of bioactive and aromatic compounds in Arabica coffee beans,” *Int Agrophys*, vol. 38, no. 1, pp. 31–42, Dec. 2023, doi: 10.31545/INTAGR/176300.

[15] Sabora, “Diferentes tuestes en los Cafés | SABORA Cafés Tostados no día.” Accessed: Nov. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.cafesabora.com/es/diferentes-tuestes-en-los-cafes

[16] P. S. Wilson, “Coffee roasting acoustics,” *J Acoust Soc Am*, vol. 135, no. 6, pp. EL265–EL269, Jun. 2014, doi: 10.1121/1.4874355.

[17] T. Kocadağlı and V. Gökmen, “Formation of acrylamide in coffee,” *Curr Opin Food Sci*, vol. 45, p. 100842, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.COFS.2022.100842.

[18] A. D. Pierce, *Acoustics*. Maidenhead, England: McGraw Hill Higher Education, 1981.

[19] E. De and L. Ciencias, “Dificultades de aprendizaje del modelo de sonido: una revisión de la literatura Learning difficulties about the sound model: a review of the literature,” pp. 5–23, 2021, doi: 10.5565/rev/ensciencias.3217.

[20] J. A. María, “Acústica: la ciencia del sonido,” 2007. Accessed: Nov. 02, 2024. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/20.500.12622/1763

[21] J. C. Asinsten, “El sonido Teoría y práctica,” *Educ. ar*, 2015.

[22] M. Caetano, C. Saitis, K. Siedenburg, M. Caetano, C. Saitis, and K. Siedenburg, “Timbre: Acoustics, Perception, and Cognition, Springer Handbook of Auditory Research 69,” pp. 2020–2025, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-14832-4_11.

[23] N. Trigueiros, J. Rue, L. Jean, and P. Gil, “Exploración funcional.” Accessed: Nov. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.cochlea.eu/es/exploracion-funcional

[24] J. Borrallo, “Diseño de sonómetro de medición continua con conectividad Wi-Fi,” Trabajo Fin de Grado, Universidad de Extremadura Escuela Politécnica, 2018.

[25] Ó. E. Acosta Agudelo, “Propuesta de un modelo para la predicción de ruido por tráfico rodado a partir de aprendizaje automático que ofrezca información potencialmente útil en los procesos de gestión ambiental del ruido en entornos urbanos de Bogotá,” 2024. Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/11349/42510

[26] R. M. Murata Arca, F. M. Santos López, and J. M. P. Delgado, “Sistema ciber-físico en la nube para monitoreo de contaminación acústica urbana bajo plataforma IoT”.

[27] DoctorAudio, “Ponderaciones (weightings) en frecuencia: A, B, C y Z.” Accessed: Nov. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.doctorproaudio.com/content.php?145-ponderaciones-weightings-frecuencia-ABC

[28] M. de J. Martínez, T. López, J. Hernández, and J. Horta, “Desarrollo de un Panel con Caucho Reciclado para Mejorar la Absorción Acústica,” *Ciencia Nicolaita*, no. 87, Mar. 2023, doi: 10.35830/CN.VI87.631.

[29] SINTEC, “Conceptos fundamentales del sonido.” Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.acdacustics.com/files/conceptos.pdf

[30] K. E. Choquecota Labra, “Análisis del riesgo físico de ruido y correcta elección de protectores auditivos en Ilave de impacto aplicando método de bandas de octava en el taller de mantenimiento en la empresa R&J Interoceanica S.A.C. 2019,” Tesis de grado, Universidad Tecnológica del Perú, Perú, 2019. Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8899

[31] B. Mulgrew, P. Grandt, and J. Thompson, *Digital Signal Processing: Concepts and Applications*, Second. 2003.

[32] S. W. Smith, *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. 1999.

[33] L. Tan, *Digital Signal Processing*. San Diego, CA: Academic Press, 2007.

[34] J. Abajo Magro, "Mejora de rendimiento de la transformada rápida de Fourier," Grado en Ingeniería Informática, Universidad Complutense De Madrid, Madrid, 2024. Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/20.500.14352/106085

[35] NTI AUDIO, "Transformación rápida de Fourier FFT - Conceptos básicos." Accessed: Nov. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.nti-audio.com/es/servicio/conocimientos/transformacion-rapida-de-fourier-fft

[36] C. L. Polanía Reyes, F. A. Cardona Olaya, G. I. Castañeda Gamboa, I. A. Vargas, O. A. Calvache Salazar, and W. I. Abanto Vélez, *Metodología de Investigación Cuantitativa & Cualitativa. Aspectos conceptuales y prácticos para la aplicación en niveles de educación superior*. Institución Universitaria Antonio José Camacho, 2020. doi: 10.54278/9789588292991.

[37] G. Guerrero Dávila and M. C. Guerrero Dávila, *Metodología de la investigación / Guerrero Dávila Guadalupe, Guerrero Dávila María Concepción*. in Bachillerato general. Serie integral por competencias. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2014.

[38] C. E. Nájera Galeas and B. A. Paredes Calderón, "Identidad e Identificación: Investigación de Campo como Herramienta de Aprendizaje en el Diseño de Marcas," *INNOVA Research Journal*, vol. 2, no. 10.1, pp. 155–164, Oct. 2017, doi: 10.33890/innova.v2.n10.1.2017.465.

[39] P. M. Vallejo, *Investigación experimental, diseños y contraste de medias*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2013. Accessed: Jun. 08, 2024. [Online]. Available:

http://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/A4t2k2_diseno%20investigacion.pdf

[40] "Audacity ® | Free Audio editor, recorder, music making and more!" Accessed: Nov. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.audacityteam.org/

[41] B. McFee *et al.*, "librosa/librosa: 0.10.2.post1," May 2024, *Zenodo*. doi: 10.5281/zenodo.11192913.

[42] P. Virtanen *et al.*, "SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python," *Nat Methods*, vol. 17, no. 3, pp. 261–272, 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.

[43] J. Lewis, "Common Inter-IC Digital Interfaces for Audio Data Transfer", Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/ms-2275.pdf

[44] NXP, "UM11732 I2S bus specification," Feb. 2022, Accessed: Dec. 07, 2024. [Online]. Available: https://www.nxp.com/docs/en/user-manual/UM11732.pdf

[45] NXP, "UM10204 I2C-bus specification," Oct. 2021, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf

[46] Espressif, "ESP32 Series Datasheet Version 4.8." Accessed: Dec. 10, 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

[47] Espressif, "ESP32 - Technical Reference Manual About This Manual", Accessed: Dec. 10, 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

[48] D. Ibrahim and A. Ibrahim, *Practical Audio DSP Projects with the ESP32 Easy and Affordable Digital Signal Processing*. Susteren - Países Bajos: Elektor, 2023.

[49] ST, "STM32F405xx STM32F407xx," Nov. 2024, Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf

[50] Invensense, "INMP441 Omnidirectional Microphone," May 2014, Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/INMP441.pdf

[51] Knowles, "SPH0645LM4H-B," Jul. 2015, Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3421/i2S+Datasheet.PDF

[52] ELIPSE TIENDAELECTRONICA, "Modulo Semáforo LED." Accessed: Dec. 17, 2024. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-534769426-modulo-semaforo-led-_JM#polycard_client=search-nordic&position=7&search_layout=stack&type=item&tracking_id=456fb4b3-c575-4669-be60-0767b119fac3

[53] J. W. Arteaga Velez, B. I. Toala Angueta, and C. J. Ortiz Caaspa, "Determinación de la resistencia mecánica del PLA en impresiones 3D mediante ensayos de tracción: Determination of the mechanical resistance of PLA in 3d prints through tensile tests," *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, vol. 5, no. 1, pp. 288–306, Jun. 2024, doi: 10.60100/rcmg.v5i1.197.

[54] E. Condes, "arduinoFFT | Arduino Documentation." Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/libraries/arduinofft/

[55] A. Manuel *et al.*, "SISTEMA DE MONITOREO REMOTO DE RESPIRACIÓN Y NIVELES DE GASES PARA PACIENTES RECUPERADOS DE COVID-19," *Revista*

Investigación & Desarrollo, vol. 22, no. 1, pp. 109–123, Jul. 2022, doi: 10.23881/IDUPBO.022.1-9I.

[56] M. Graudins, “Designing a First Stage of a Practical and Affordable Automated Tuning System for Traditional Pianos.,” 2024.

[57] V.-K. Tran, B.-T. Thai, H. Pham, V.-K. Nguyen, and V.-K. Nguyen, “A proposed approach to utilizing Esp32 microcontroller for data acquisition,” *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 56, no. 04, pp. 474–488, 2024, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.4.4.

[58] N. Yergenson, “COFFEE ROASTING PROCESS MONITORING WITH IN SITU NIR SPECTROSCOPY,” Master of Science, University of Idaho, 2019.

[59] S. Rao, *The Coffee Roaster’s Companion*. Canadá.

ANEXOS

Anexos A: Materiales y Equipos Empleados

Figura A1

Materia prima - 30 gramos de café verde especie arábica, clasificada manualmente para mantener uniformidad.

Figura A2

Equipo de Medición- Balanza digital 200g, con una precisión de dos decimales.

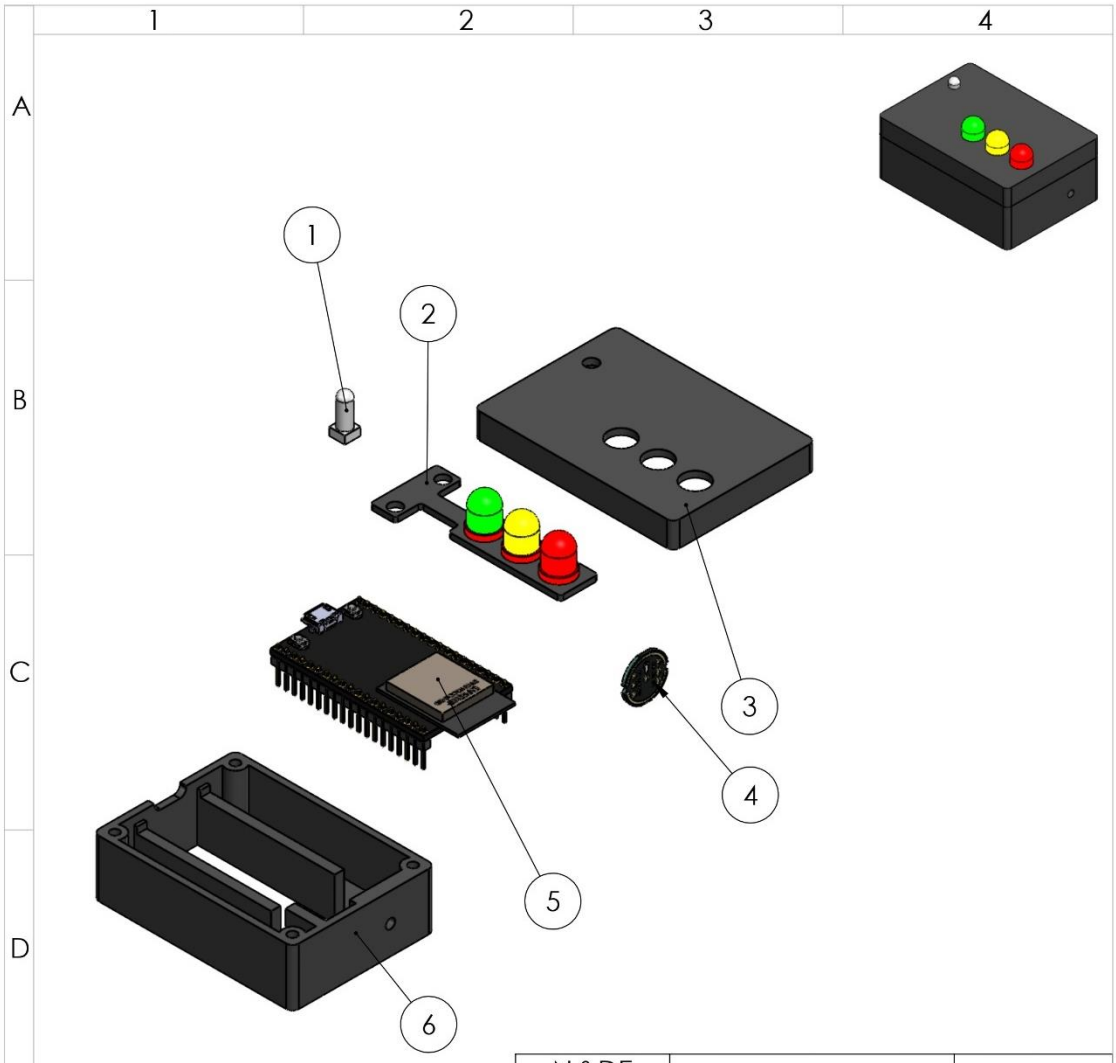
Figura A3

Tostadora doméstica JAVA STARR, modelo BH8080.

Figura A3

Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0xxx, equipada con un micrófono integrado.

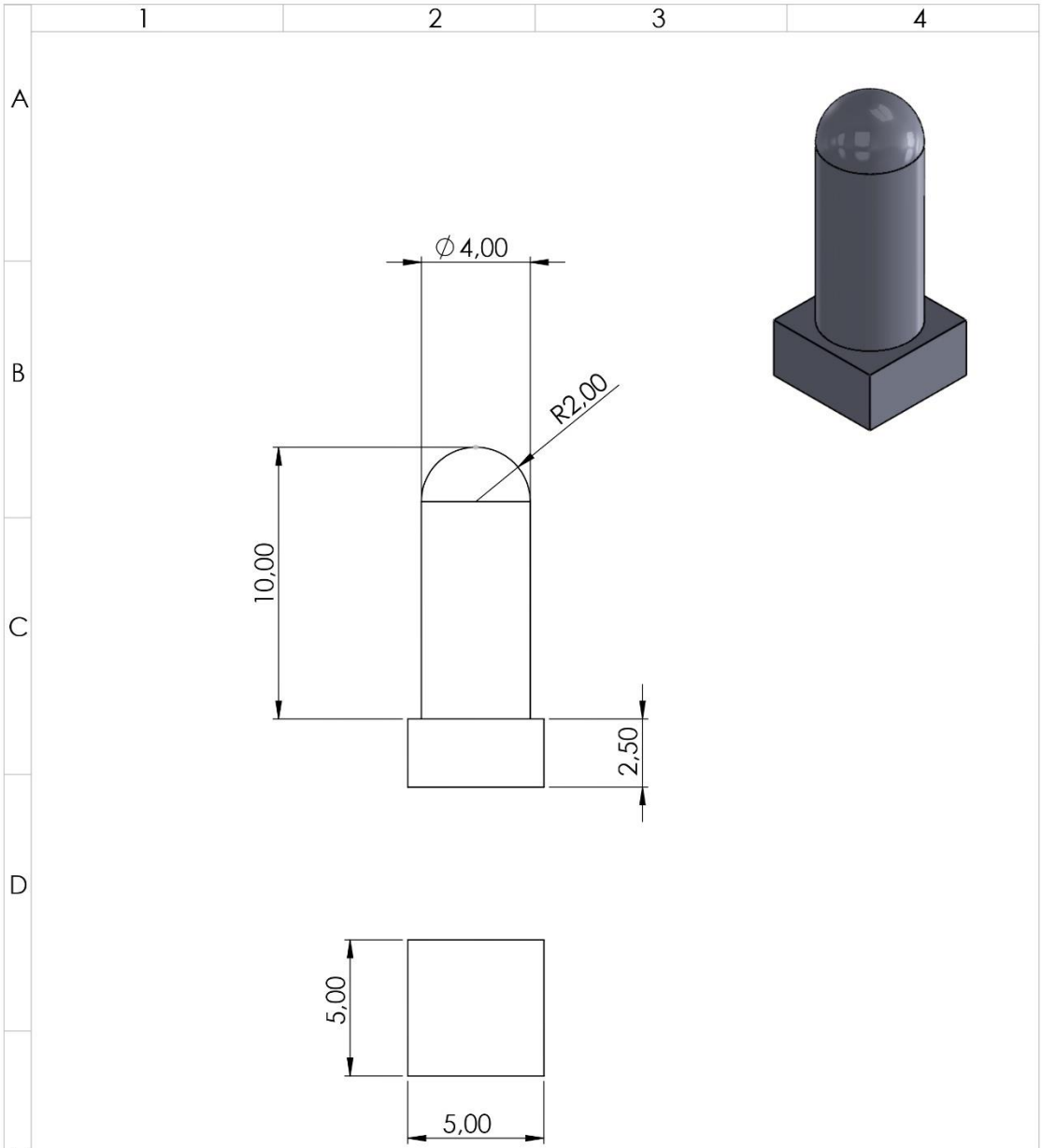
Anexo B: Planos de Pieza Impresa en 3D



N.° DE ELEMENTO	N.° DE PIEZA	CANTIDAD
1	Botón	1
2	Módulo Semáforo LED	1
3	Tapa	1
4	Micrófono inmp441	1
5	ESP32-WROOM-32D	1
6	Base	1

Tolerancias		(Peso)	Plastico
±1 mm			
	Fecha	Nombre	
Dib.	19/02/2025	Inlago E.	Plano Ensamble
Rev.	19/02/2025	Inlago E.	Escala 1:1.3
Apro.	19/02/2025	Ing. Salazar H.	
Edi_ción	Modifi_cación	Fecha	Nombre
			Dibujo 1

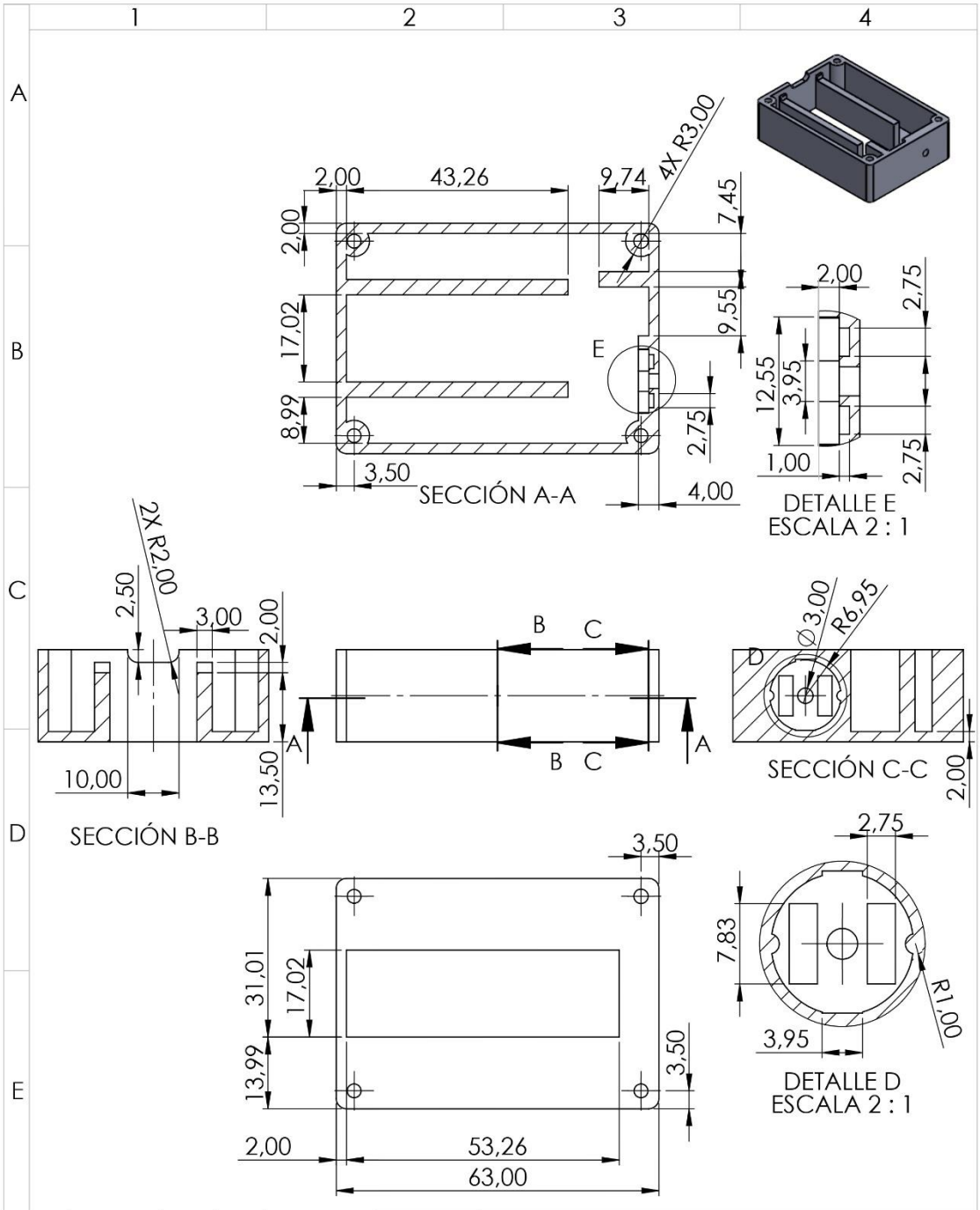
Ingeniería Mecatrónica

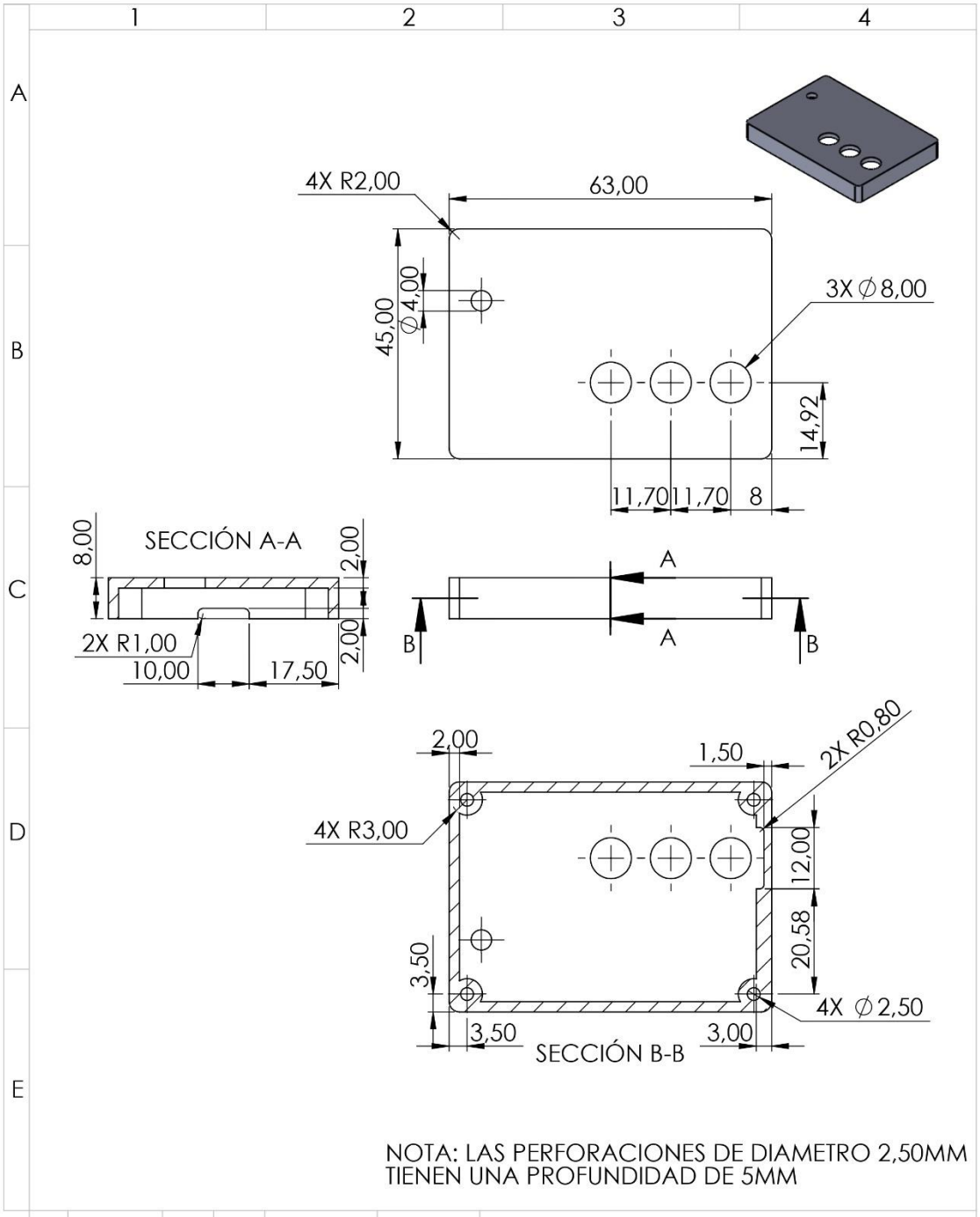


				Tolerancias		(Peso)	PLA
				±1 mm			
					Fecha	Nombre	Escala
				Dib.	19/02/2025	Inlago E.	5:1
				Rev.	19/02/2025	Inlago E.	
				Apro.	19/02/2025	Ing. Hugo S.	
Edi_ ción	Modifi_ cación	Fecha	Nombre				Dibujo 2

Botón

Ingeniería Mecatrónica

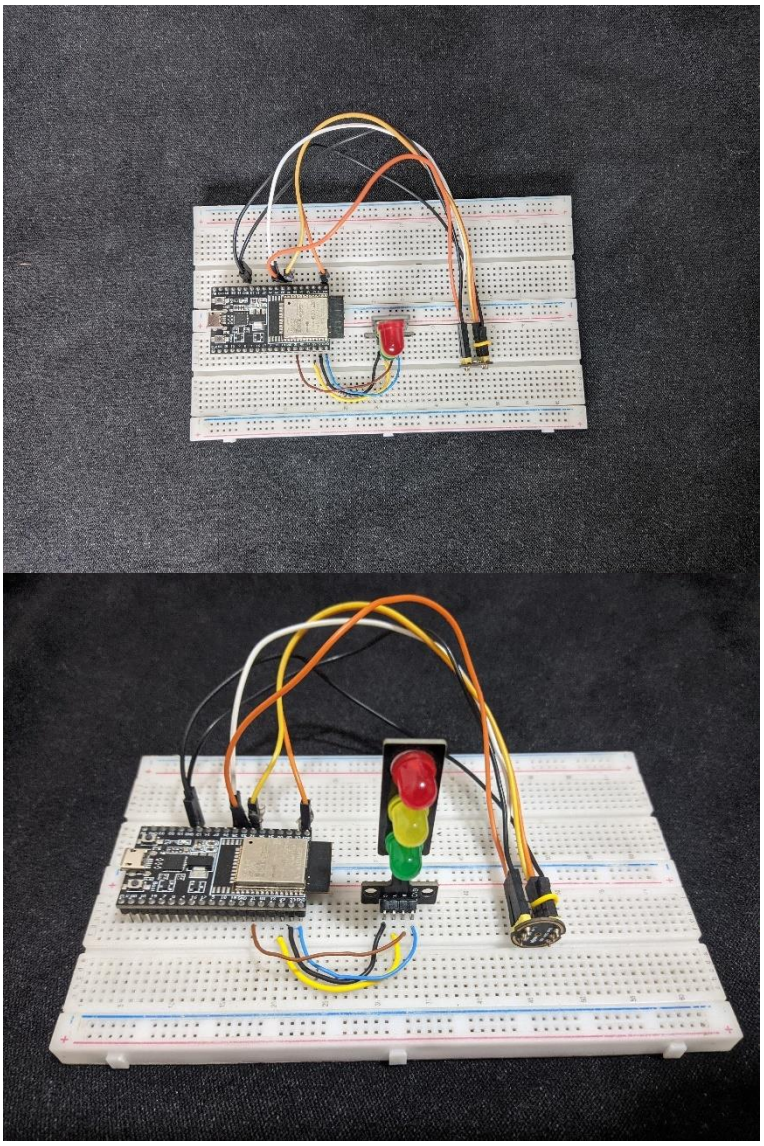

1
2
3
4
A
B
C
D
E
2,00
43,26
9,74
4X R3,00
7,45
2,00
17,02
9,55
E
8,99
2,75
3,50
4,00
SECCIÓN A-A
2,00
2,75
12,55
3,95
1,00
2,75
DETALLE E
ESCALA 2 : 1
2X R2,00
2,50
3,00
2,00
B
C
A
B
C
A
10,00
13,50
SECCIÓN B-B
Ø3,00
R6,95
D
SECCIÓN C-C
2,00
3,50
2,75
31,01
17,02
7,83
R1,00
13,99
3,50
3,95
DETALLE D
ESCALA 2 : 1
2,00
53,26
63,00
Tolerancias
±1 mm
(Peso)
PLA
Fecha
Nombre
Dib. 19/02/2025 Inlago E.
Rev. 19/02/2025 Inlago E.
Apro. 19/02/2025 Ing. Hugo S.
Plano Base
Escala
1:1
Dibujo 3
Edi_ ción
Modifi_ cación
Fecha
Nombre
Ingeniería Mecatrónica


1
2
3
4
A
B
C
D
E
4X R2,00
63,00
45,00
Ø4,00
3X Ø8,00
14,92
11,70
11,70
8
8,00
SECCIÓN A-A
2,00
2,00
2X R1,00
10,00
17,50
A
A
B
B
2,00
1,50
2X R0,80
4X R3,00
12,00
20,58
3,50
4X Ø2,50
3,50
3,00
SECCIÓN B-B
NOTA: LAS PERFORACIONES DE DIAMETRO 2,50MM
TIENEN UNA PROFUNDIDAD DE 5MM
Tolerancias
±1 mm
(Peso)
PLA
Fecha
Nombre
Dib. 19/02/2025 Inlago E.
Rev. 19/02/2025 Inlago E.
Apro. 19/02/2025 Ing. Salazar H.
Tapa
Escala
1:1
Dibujo 4
Edi_ ción
Modifi_ cación
Fecha
Nombre
Ingeniería Mecatrónica

Anexo C: Verificación de Funcionamiento de los Componentes

Figura C1

Montaje en protoboard del micrófono INMP441, el ESP32-WROOM-32D y el módulo semáforo LED.



Nota: La figura muestra la disposición de los componentes (micrófono INMP441, ESP32-WROOM-32D y módulo semáforo LED) en una protoboard, verificando su funcionamiento conjunto.

Anexo D: Piezas Impresas y Montaje de Componentes

Figura D1

Piezas impresas en 3D - botón, caja y tapa.

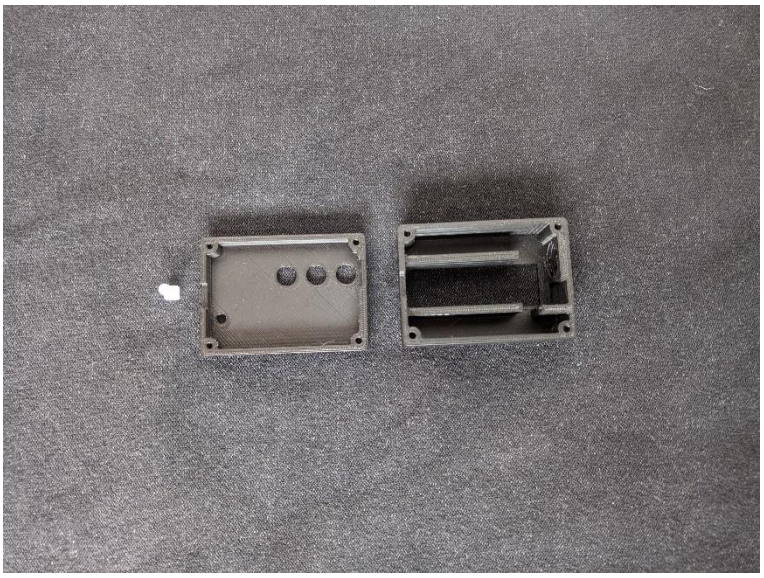


Figura D2

Integración de componentes con la caja contenedora.

Nota. Montaje de los componentes (micrófono INMP441, ESP32-WROOM-32D y módulo semáforo LED) integrados en la caja contenedora impresa en 3D.

Anexo F: Configuraciones I2S

Código F1

Configuración del I2S en el ESP32 para la captura de audio.

```
// Configuración de pines de I2S
#define SCK_PIN 33
#define WS_PIN 25
#define SD_PIN 32

// Configuración de audio
#define BUFFER_SIZE 512
#define SAMPLE_RATE 48000

// Configuración de I2S
i2s_config_t i2s_config = {
.mode = (i2s_mode_t)(I2S_MODE_MASTER | I2S_MODE_RX),
.sample_rate = SAMPLE_RATE,
.bits_per_sample = I2S_BITS_PER_SAMPLE_32BIT,
.channel_format = I2S_CHANNEL_FMT_ONLY_LEFT,
.communication_format=                    (i2s_comm_format_t)(I2S_COMM_FORMAT_I2S|
I2S_COMM_FORMAT_I2S_MSB),
.intr_alloc_flags = ESP_INTR_FLAG_LEVEL1,
.dma_buf_count = 4,
.dma_buf_len = BUFFER_SIZE,
.use_apll = false
};

i2s_pin_config_t pin_config = {
.bck_io_num = SCK_PIN,
.ws_io_num = WS_PIN,
.data_out_num = I2S_PIN_NO_CHANGE,
.data_in_num = SD_PIN
};

i2s_driver_install(I2S_PORT, &i2s_config, 0, NULL);
i2s_set_pin(I2S_PORT, &pin_config);
}
```

Repositorio Git_Hub

https://github.com/EmerIACH/Monitero_Tueste_Cafe

Anexo E: Pruebas de Funcionamiento del Sistema de Monitoreo.

E.1 Identificación del Primer Crack y Segundo Crack

Figura E.1.1

Muestra 1 Tiempo de identificación primer crack y segundo crack.

Nota. Primer crack identificado 9:29 y Segundo Crack identificado 13:07 (mm:ss).

Figura E.1.2

Muestra 2 Tiempo de identificación primer crack y segundo crack.

Nota. Primer crack identificado 9:11 y Segundo Crack identificado 12:47 (mm:ss).

Figura E.1.2

Muestra 3 Tiempo de identificación primer crack y segundo crack.

Nota. Primer crack identificado 10:30 y Segundo Crack identificado 13:05 (mm:ss).

E.2 Identificación del Tueste Claro

Muestra 4

Figura E2.1

Muestra 4 antes del proceso de tostado. Peso: 30,00 g.

Figura E2.2

Muestra 4 después del proceso de tostado. Peso: 26,66 g.

Muestra 5

Figura E2.3

Muestra 5 antes del proceso de tostado. Peso: 30,00 g.

Figura E2.24

Muestra 5 después del proceso de tostado. Peso: 26,15 g.

Muestra 6

Figura E2.5

Muestra 6 antes del proceso de tostado. Peso: 30,00 g.

Figura E2.6

Muestra 6 después del proceso de tostado. Peso: 26,83 g.

E.3 Identificación del Tueste Oscuro

Muestra 7

Figura E.3.1

Muestra 7 antes del proceso de tostado. Peso: 30,00g.

Figura E.3.2

Muestra 7 después del proceso de tostado. Peso: 24,31g.

Muestra 8

Figura E.3.3

Muestra 8 antes del proceso de tostado. Peso: 30,00g.

Figura E.3.4

Muestra 8 después del proceso de tostado. Peso: 24,00g.

Muestra 9

Figura E.3.5

Muestra 9 antes del proceso de tostado. Peso: 30,00g.

Figura E.3.6

Muestra 9 después del proceso de tostado. Peso: 23.90g.