



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TEMA:

**“IDENTIFICACIÓN DE LA ACÚSTICA (CRACK) PARA EL
CONTROL DE TOSTADO DE CAFÉ”**

Trabajo de grado previo a la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Producción industrial y tecnológica sostenible

Autor:

Dylan Steeven Ruiz Gómez

Director:

MSc. Hugo Eduardo Salazar García

Asesor:

MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría

Ibarra - Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004812382		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Ruiz Gómez Dylan Steeven		
DIRECCIÓN:	Imbabura, Otavalo		
EMAIL:	dsruizg@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	-	TELÉFONO MÓVIL:	0967835195

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Identificación de la acústica (crack) para el control de tostado de café
AUTOR (ES):	Dylan Steeven Ruiz Gómez
FECHA: DD/MM/AAAA	27/Febrero/2026
SOLO PARA TRABAJO DE GRADO	
PROGRAMA	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR/ DIRECTOR:	MSc. Hugo Salazar / MSc. Cosme Mejía

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de febrero de 2026.

EL AUTOR:



**Dylan Steeven Ruiz
Gomez**



(Firma).....

Nombre: Dylan Steeven Ruiz Gómez



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

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Ibarra, 27 de febrero de 2026

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.



Firmado electrónicamente por:
**HUGO EDUARDO
SALAZAR GARCIA**

Validar únicamente con FirmaEC

(f)

MSc. Hugo Eduardo Salazar García

C.C.: 1002582177



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

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular “IDENTIFICACIÓN DE LA ACÚSTICA (CRACK) PARA EL CONTROL DE TOSTADO DE CAFÉ” elaborado por Dylan Steeven Ruiz Gómez, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



Firmado electrónicamente por:
**HUGO EDUARDO
SALAZAR GARCIA**
Validar únicamente con FirmaEC

(f).....

MSc. Hugo Eduardo Salazar García

C.C.: 1002582177



Firmado electrónicamente por:
**COSME DAMIAN MEJIA
ECHEVERRIA**
Validar únicamente con FirmaEC

(f).....

MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría

C.C.: 1002641288

DEDICATORIA

A todos mis seres queridos.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, por su guía constante, su paciencia y sus valiosos aportes académicos durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Su orientación fue fundamental para la culminación exitosa de esta etapa.

A la Universidad, por brindarme la formación académica, los recursos y el entorno adecuado para fortalecer mis conocimientos y competencias profesionales.

A todos los docentes que formaron parte de mi proceso académico, quienes con su dedicación y compromiso contribuyeron significativamente a mi crecimiento intelectual y personal.

RESUMEN

El proceso de tueste del café genera sonidos característicos conocidos como cracks, que indican fases críticas en la transformación del grano, como el primer y segundo crack. Estos eventos acústicos permiten al tostador determinar el punto óptimo de tueste, por lo que su detección es fundamental para lograr consistencia y calidad en el producto final. Esta tesis tiene como objetivo desarrollar un software capaz de identificar estos sonidos característicos mediante el análisis de señales de audio captadas durante el proceso de tueste. Se utilizó un enfoque basado en el análisis de energía, el cual permite detectar aumentos abruptos de energía asociados a los sonidos producidos por los cracks. A través del uso de Matlab, se procesaron archivos de audio mediante técnicas como conversión a mono, normalización, filtrado pasa banda, cálculo de energía RMS y detección de picos. Este método permite identificar los eventos sonoros de interés de forma eficiente con un bajo uso computacional. Como resultado se pretende obtener un sistema capaz de marcar los momentos en los que ocurren los cracks, facilitando su uso como referencia para el control del proceso de tueste del café.

Palabras clave: Cracks, café, señales, filtro pasa banda, RMS, picos, acústica.

ABSTRACT

The coffee roasting process produces distinctive sounds known as "cracks," which signal critical stages in the transformation of the beans specifically the first and second crack. These acoustic cues help the roaster determine the optimal roast level, making accurate detection essential for consistency and quality in the final product. This thesis aims to develop software capable of identifying these characteristic sounds by analysing audio signals recorded during the roasting process. An energy-based analysis approach was employed, enabling the detection of sudden energy increases associated with the sounds generated by cracks. Using MATLAB, audio files were processed through techniques such as mono conversion, normalization, band-pass filtering, RMS energy calculation, and peak detection. This method allows for efficient identification of relevant acoustic events while maintaining low computational requirements. The expected outcome is a system capable of marking the moments when cracks occur, thereby providing a reference for monitoring and controlling the coffee roasting process.

Keywords: Cracks, coffee, signals, band-pass filter, RMS, peaks, acoustics.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
2. CONSTANCIAS	III
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD.....	IV
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR.....	V
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR	VI
DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTO	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	X
ÍNDICE DE CONTENIDOS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 General.....	2
1.2.2 Específicos	2

1.3	Alcance y delimitación.....	2
1.4	Justificación.....	2
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....		4
2.1	Antecedentes	4
2.2	Bases Teóricas.....	5
2.2.1	Tueste del café	5
2.2.2	Fases del tueste del café.....	6
2.2.3	Frecuencia.....	9
2.2.4	Amplitud	11
2.2.5	Energía acústica	13
2.2.6	Señales de Audio Digital	14
2.2.7	Dominio del Tiempo en el Análisis de Señales	15
2.2.8	Eventos Acústicos Transitorios: Cracks	16
2.2.9	Preprocesamiento de Señales de Audio	16
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.....		18
3.1	Enfoque y tipos de investigación.....	18
3.2	Diseño de la Investigación	18
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		22
4.1	Adquisición y descripción inicial de las señales de sonido.....	22
4.1.1	Presentación de las primeras señales de sonido sin procesar	22

4.1.2 Condiciones de tueste: temperatura, tipo de grano	24
4.2 Análisis preliminar de las señales acústicas	25
4.2.1 Identificación de picos relevantes en el audio sin procesar	25
4.2.2 Relación entre tiempo del proceso y eventos acústicos iniciales.....	28
4.2.3 Identificación de ruidos mecánicos y externos presentes	31
4.2.4 Establecer las variaciones entre distintos lotes y perfiles de tueste	33
4.3 Procesamiento digital y filtrado	34
4.3.1 Aplicación de filtros y reducción de ruido	35
4.3.2 Comparación entre señal original y señal filtrada	41
4.4 Extracción de las características	45
4.4.1 Identificación de patrones únicos del primer crack	46
4.4.2 Identificación de patrones únicos del segundo crack.....	47
4.5 Estadísticas: intensidad, ocurrencia, distancia entre eventos	49
4.6 Clasificación de eventos acústicos	51
4.6.1 Separación entre primer crack y segundo crack mediante parámetros acústicos.	51
4.7 Funcionamiento del código	53
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1	Grado de tueste.....	6
Fig. 2.2	Intensidad y frecuencia audible.....	10
Fig. 2.3	Partes de las ondas.....	12
Fig. 2.4	Proceso acústico	13
Fig. 2.5	Niveles de tueste.....	16
Fig. 2.6	Filtro pasa banda.....	17
Fig. 4.1	Intensidad y energía de muestras sin procesar	26
Fig. 4.2	Comparativa del efecto atenuante producido por los filtros.....	33
Fig. 4.3	Espectrograma de frecuencias	37
Fig. 4.4	Energía RMS de la señal sin filtros	39
Fig. 4.5	Energía RMS de la señal filtrada.....	40
Fig. 4.6	Energía RMS sin filtrar y filtrada primer crack	42
Fig. 4.7	Energía RMS filtrada y sin filtrar segundo crack.....	42
Fig. 4.8	Detección de picos relevantes primer crack	47
Fig. 4.9	Detección de picos relevantes segundo crack	48
Fig. 4.10	Estadística de la evolución temporal de la acústica en muestras adquiridas.....	51
Fig. 4.11	Validación del software, primer y segundo crack	53
Fig. 4.12	Diagrama de flujo del código	54
Fig. Anexo A.1	Niveles de tueste.....	64
Fig. Anexo A.2	Café sin tostar	64
Fig. Anexo A.3	Tueste Claro.....	65
Fig. Anexo A.4	Tueste Medio	65

Fig. Anexo A.5 Tueste Medio - Oscuro	65
Fig. Anexo A.6 Tueste Oscuro	65
Fig. Anexo A.7 Tueste Crítico	66
Fig. Anexo A.8 Pesaje café sin tostar.....	66
Fig. Anexo A.9 Pesaje tueste claro.....	67
Fig. Anexo A.10 Pesaje tueste medio.....	67
Fig. Anexo A.11 Pesaje tueste medio - oscuro.....	68
Fig. Anexo A.12 Pesaje tueste crítico	68
Fig. Anexo A.13 Tostadora de muestras	69
Fig. Anexo A.14 Tostadora Industrial.....	69
Fig. Anexo A.15 Copa tostadora de muestras	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Características del micrófono	22
Tabla 4.2 Comparativa de cafés ecuatorianos	24
Tabla 4.3 Patrones acústicos promedio.....	31
Tabla 4.4 Estadística de la acústica primer crack	49
Tabla 4.5 Estadística de la acústica segundo crack.....	50
Tabla 4.6 Principales características de los audios	55
Tabla 4.7 Caracterización de la acústica	56

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Lograr el equilibrio adecuado entre el tiempo de tueste y la temperatura es esencial para crear una experiencia de café completa y placentera, donde los sabores se desarrollen por completo sin ninguna característica indeseable.

Se necesita mucho entrenamiento para convertirse en un tostador experto con la capacidad de "leer" los granos y tomar decisiones en una fracción de segundo. El intervalo entre un café perfectamente tostado y un lote arruinado tiene una duración de muy pocos segundos (National Coffee Association of U.S.A, 2022).

Existen algunas variables que pueden ser monitoreadas para obtener el nivel de tueste deseado (tiempo, color, aroma, temperatura), usando procesos de medición especializados o a cargo de un experto que determina cuando el café está listo.

Una de las formas más precisas de monitorear el proceso de tueste es de forma auditiva, escuchando lo que colectivamente se ha denominado “Primer y segundo crack”, sonidos asociados con la fase final del proceso de tueste.

Un correcto análisis del sonido emitido durante el proceso de tueste del café nos ayudará a identificar el “Primer y segundo crack” estableciendo así la etapa de tueste en la que se encuentra el café de manera automática.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Caracterizar la acústica del proceso de tostado del café.

1.2.2 Específicos

- Determinar los requerimientos necesarios para analizar el sonido emitido durante el proceso de tostado de café.
- Registrar las muestras de sonido necesarias para realizar el análisis.
- Procesar las muestras mediante software.
- Discriminar las diferentes acústicas del proceso de tostado de café.

1.3 Alcance y delimitación

El proyecto permitirá identificar el momento en el cual se da el “Primer y segundo crack” en el proceso de tueste del café mediante el análisis del sonido producido durante el tueste. El programa de monitoreo será creado y ejecutado en la computadora personal del autor. Se identificarán las características del sonido producido en el primer y segundo crack, diferenciándolos del ruido producido durante el proceso de tueste.

1.4 Justificación

El tueste del café es un proceso de calor que convierte el café en los granos fragantes de color marrón oscuro que conocemos.

El proceso de tueste del café es fundamental en el desarrollo de varios perfiles y sabores de tueste, lo que hace que la temperatura y el tiempo sean factores cruciales. El tueste rápido puede producir

granos que parecen oscuros por fuera, pero permanecen verdes por dentro, lo que genera un sabor desagradable y una producción excesiva de ácido clorogénico, que puede ser desfavorable para el estómago. Por el contrario, tostar granos durante un período prolongado puede resultar en una infusión amarga y carbonizada, lo que disminuye los sabores deseados (Nescafé, 2020).

La mayoría de los métodos de tueste de café que se ofrecen en el mercado se basan en la temperatura y el intervalo de tiempo que dura el tueste, en el caso de pequeños productores el método de monitoreo del tueste es de forma visual cada pocos segundos lo que lo convierte en un método deficiente si no se cuenta con una gran experiencia.

El “primer y segundo crack” son momentos precisos en el proceso de tueste del café, los cuales son asociados con el tueste claro (primer crack), tueste oscuro (segundo crack).

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Para este proyecto se realizó una investigación de diversos artículos científicos con el objetivo de tener información detallada del tema junto con los posibles obstáculos que se le presentaron a los autores de los artículos y así poder plantear una solución al problema de manera más eficiente basado en la información obtenida.

Preston S. Wilson, investigador de la Universidad de Texas, realizó un estudio pionero en el que analizó cuantitativamente los sonidos emitidos por los granos de café durante el tueste. Encontró que el "primer crack" presenta una mayor amplitud acústica y frecuencias más bajas en comparación con el "segundo crack", que ocurre a un ritmo más rápido. Estos hallazgos sugieren la viabilidad de desarrollar técnicas automatizadas de monitoreo acústico para controlar el proceso de tueste del café [1].

En Indonesia desarrollaron un sistema de identificación automática de los sonidos de "crack" utilizando redes neuronales. El sistema emplea la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para extraer características de las señales de audio, las cuales son procesadas por una red neuronal entrenada para reconocer los eventos de "crack" durante el tueste. El modelo logró una tasa de éxito del 100% en la identificación de estos sonidos en grabaciones de un segundo de duración [2].

Nathan Yergenson y Eric Aston, de la Universidad de Idaho, exploraron el uso de la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) in situ para predecir los momentos de inicio y fin de los eventos de "crack" durante el tueste del café. Al combinar datos espectrales con grabaciones de audio, desarrollaron modelos de regresión que permiten una monitorización en tiempo real del proceso de tueste, mejorando la precisión y consistencia del producto final [3].

Utilizando espectrogramas como características de entrada, se entrenaron varias arquitecturas de redes neuronales profundas para clasificar sonidos producidos durante el tueste de café. El modelo más efectivo alcanzó una precisión del 84.7% y un AUC de 0.886, demostrando el potencial de las redes neuronales en la detección automática de eventos acústicos en el tueste del café [4].

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Tueste del café

El tueste del café es una etapa esencial en la transformación de los granos verdes en el producto aromático y sabroso que consumimos diariamente. Este proceso térmico desencadena una serie de complejas reacciones químicas, como la reacción de Maillard y la caramelización, que son responsables del desarrollo del aroma, sabor, color y otras propiedades funcionales del café [5].

Dependiendo del grado de tueste ya sea claro, medio u oscuro, varían significativamente las características sensoriales y químicas del grano. En general, los tuestes más ligeros conservan una mayor proporción de compuestos bioactivos, como los antioxidantes, y permiten una mayor apreciación de los matices originales del grano, lo que los hace atractivos para los catadores especializados. Por otro lado, los tuestes más oscuros generan sabores más intensos, con notas amargas y ahumadas, aunque con menor presencia de algunos compuestos beneficiosos para la salud [6].

Además, la elección del método de tueste (por aire caliente, tambor, lecho fluido, etc.) y el control preciso de variables como temperatura, flujo de aire y tiempo, son factores clave para obtener un café con propiedades organolépticas deseadas, sin comprometer su inocuidad ni valor nutricional [6].

Por ello, el proceso de tueste no solo define el perfil sensorial del café, sino que también influye en sus efectos para la salud y en su aceptación por parte del consumidor. La comprensión detallada de esta etapa permite optimizar los procesos industriales y artesanales, logrando un equilibrio entre calidad, seguridad y beneficios funcionales del producto final.

2.2.2 Fases del tueste del café

El proceso del tueste del café tiene varias etapas importantes, las cuales le dan las características finales al café tanto químicas como sensoriales, es por esta razón la importancia que se le da a la precisión en las distintas fases del tueste de café.

Existen varios niveles de tueste, como se puede observar en la Fig. 2.1, en los cuales se presentan múltiples variaciones en aroma, dulzura y sabor, características que, durante el proceso de tueste, pueden cambiar muy rápidamente, por lo cual es necesario un monitoreo constante.

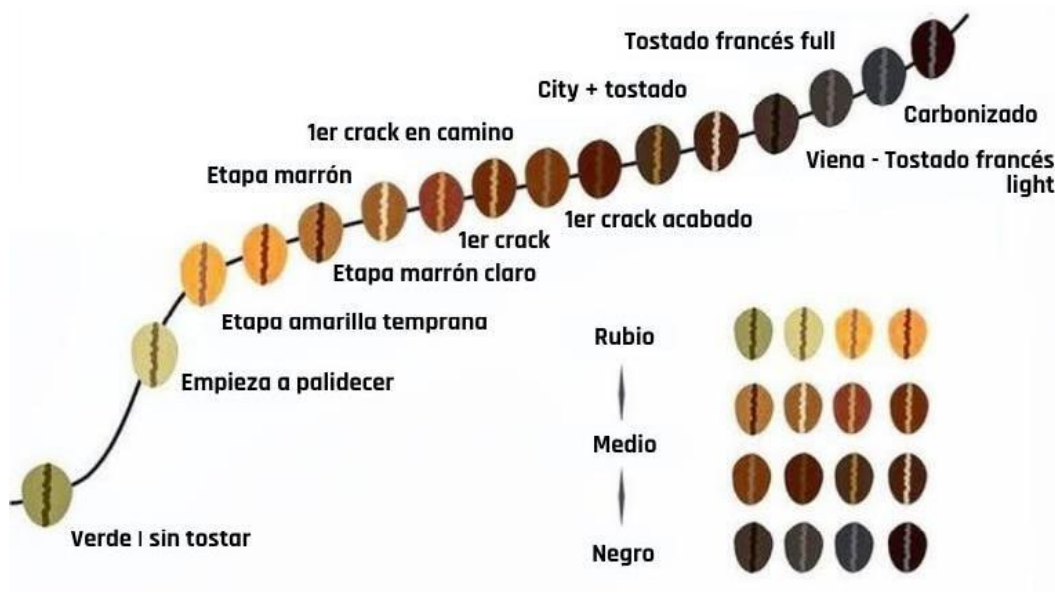


Fig. 2.1 Grado de tueste [7].

- **Fase de secado**

Durante esta etapa inicial, el objetivo principal es eliminar la humedad interna de los granos, que suele estar entre el 8 y 12% en su estado verde. Esta fase suele alcanzar los 160 °C y puede durar entre 4 y 8 minutos. Aunque aún no hay reacciones químicas intensas, es una fase crítica para evitar un tueste desigual [8].

- **Fase de dorado**

En esta etapa, los granos comienzan a cambiar de color (verde a amarillo) debido a las primeras reacciones de Maillard entre azúcares reductores y aminoácidos. Comienza la generación de compuestos aromáticos y el grano empieza a hincharse [9].

- **Primer crack**

Es una etapa crítica en la que la presión del vapor acumulado en el interior del grano produce una fractura audible (crack), usualmente alrededor de los 196–204°C. Esto es causado por la rápida expansión del vapor de agua y los gases dentro del grano, visiblemente también notamos una expansión de los granos. Este suceso marca el inicio del desarrollo del perfil final del café y es aquí donde se puede optar por detener el tueste si se busca un perfil más ácido y afrutado (tueste claro o medio) [10] [11].

- **Fase de desarrollo**

Después del primer crack, los cambios químicos se aceleran y la caramelización de azúcares produce sabores dulces y achocolatados. El control del tiempo en esta etapa define si se obtendrá un tueste claro, medio o oscuro. Si se prolonga demasiado, pueden generarse notas carbonizadas o quemadas [12].

- **Segundo crack**

El llamado segundo crack representa una etapa crucial en el proceso de tueste del café, ya que marca la transición entre un tueste medio-oscuro y un tueste oscuro. Este fenómeno se manifiesta mediante una serie de sonidos secos y agudos, similares a pequeños estallidos, que indican transformaciones físicas y químicas significativas en el interior del grano [10].

- **Enfriamiento**

Una vez alcanzado el grado de tueste deseado, es fundamental detener inmediatamente la transferencia de calor al grano para evitar una cocción excesiva. Esta fase, conocida como enfriamiento, tiene como objetivo eliminar el calor residual acumulado durante el proceso de tueste, que de no ser disipado rápidamente, puede continuar provocando reacciones químicas internas que modifican negativamente el perfil del café [9].

- **Ondas de sonido**

Las ondas sonoras son perturbaciones mecánicas que se propagan a través de un medio físico, como el aire, el agua o los sólidos. Este fenómeno ocurre porque las partículas del medio vibran en la misma dirección en la que se desplaza la onda, generando zonas alternadas de alta y baja presión, conocidas respectivamente como compresiones y rarefacciones. Debido a esta característica, las ondas sonoras se clasifican como ondas longitudinales, ya que las oscilaciones de las partículas son paralelas al sentido del movimiento de la onda [13].

Es importante destacar que las ondas de sonido no transportan materia, sino energía. La velocidad con la que viajan depende directamente del tipo de medio a través del cual se propagan. Por ejemplo, en el aire a temperatura ambiente (alrededor de 20 °C), el sonido se desplaza a una velocidad aproximada de 343 metros por segundo. Sin embargo, en líquidos y sólidos esta velocidad es

considerablemente mayor, ya que las moléculas están más cercanas entre sí, facilitando una transmisión más eficiente de las vibraciones [13] [14].

Dos propiedades fundamentales de las ondas sonoras son la frecuencia y la amplitud. La frecuencia está relacionada con el tono o altura del sonido; una frecuencia más alta produce un sonido más agudo, mientras que una frecuencia más baja genera un sonido más grave. Por otro lado, la amplitud está asociada con la intensidad o volumen del sonido: cuanto mayor es la amplitud, más fuerte percibimos el sonido [15].

2.2.3 Frecuencia

La frecuencia se refiere al número de ciclos completos o vibraciones que una onda sonora realiza por segundo, y se mide en Hertz (Hz). En otras palabras, indica cuántas veces las partículas del medio oscilan hacia adelante y hacia atrás en un segundo mientras el sonido se propaga. Esta propiedad está directamente relacionada con la longitud de onda, que es la distancia que recorre una onda durante un ciclo completo de vibración. A mayor frecuencia, menor es la longitud de onda, y viceversa [16] [17].

El oído humano es capaz de percibir, en condiciones normales, sonidos cuyas frecuencias se encuentran aproximadamente entre los 20 Hz y los 20 kHz, aunque este intervalo puede verse reducido por factores como la edad o la exposición prolongada a ruidos intensos [18].

La capacidad auditiva humana presenta umbrales definidos en función del nivel de intensidad del sonido [18]. En la Fig. 2.2 se observa que existe un límite a partir del cual el sonido comienza a ser perceptible y que, al aumentar su intensidad, puede alcanzarse un punto en el que resulta molesto e incluso puede provocar dolor.

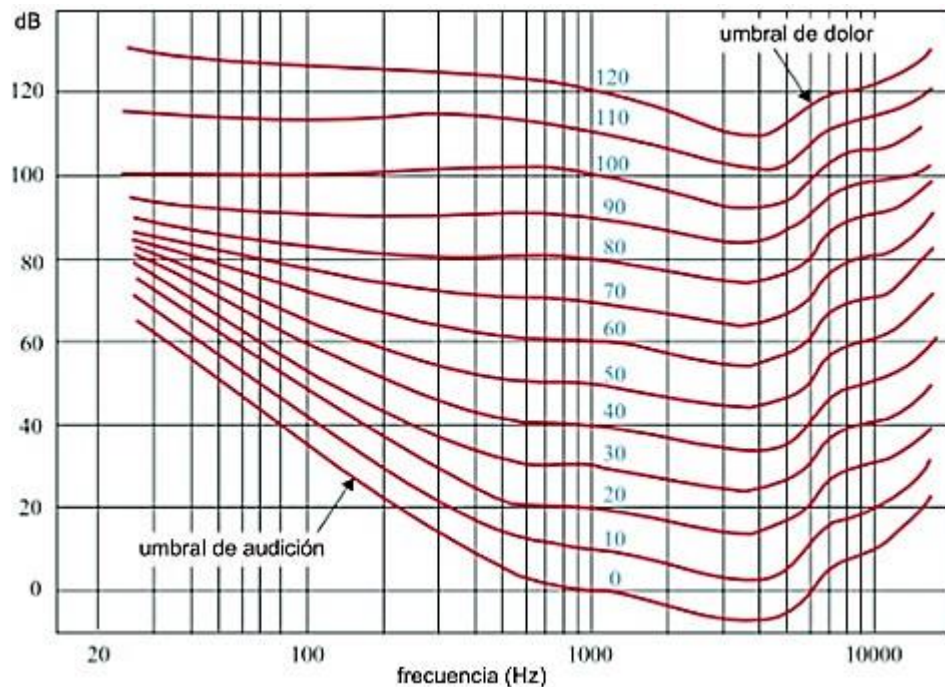


Fig. 2.2 Intensidad y frecuencia audible [19]

Existe una relación inversa entre la frecuencia de una onda sonora y su longitud de onda, de manera que, al incrementarse la frecuencia, la longitud de onda disminuye. Esta característica tiene un efecto directo en la propagación del sonido en diferentes entornos: las ondas de baja frecuencia, al poseer longitudes de onda mayores, presentan una mayor capacidad para rodear obstáculos y atravesar ciertos materiales, mientras que las componentes de alta frecuencia suelen reflejarse o atenuarse con mayor facilidad al interactuar con superficies y estructuras [20].

En el campo de la acústica arquitectónica, la frecuencia del sonido desempeña un papel fundamental en el diseño de espacios que buscan una adecuada calidad auditiva. Los materiales utilizados en un recinto no interactúan de manera uniforme con todo el espectro sonoro, ya que algunos presentan mayor capacidad de absorción en frecuencias altas, mientras que otros resultan más eficaces para el control de frecuencias bajas. Por esta razón, en espacios como auditorios, teatros o establecimientos de uso público, se emplean soluciones constructivas y criterios

geométricos orientados a lograr una propagación equilibrada del sonido, minimizando la aparición de efectos no deseados como ecos, resonancias o niveles excesivos de reverberación [21].

De manera complementaria, el análisis en frecuencia resulta especialmente útil en entornos con altos niveles de ruido ambiental, como oficinas, zonas urbanas o locales comerciales. A través de este enfoque es posible identificar la naturaleza dominante de las fuentes sonoras y aplicar medidas de control específicas. Por ejemplo, cuando el ruido predominante corresponde a la voz humana, la mayor concentración de energía acústica suele localizarse en el rango de frecuencias medias, aproximadamente entre 500 y 3000 Hz. El conocimiento de esta distribución espectral permite implementar tratamientos acústicos dirigidos, contribuyendo a mejorar el confort auditivo y a reducir la fatiga sonora de los usuarios del espacio [20].

2.2.4 Amplitud

La amplitud de una onda se refiere al desplazamiento máximo que alcanzan las partículas de un medio respecto a su posición de equilibrio cuando una onda las atraviesa. En el caso de las ondas sonoras, esta amplitud representa el grado de variación de la presión del aire en comparación con su valor normal [22].

A mayor amplitud, mayor es la compresión del aire, lo que se traduce en un sonido más fuerte o intenso. Por el contrario, cuando la amplitud es menor, el cambio de presión es más leve y el sonido se percibe como más débil o suave. Por eso, la amplitud está directamente relacionada con el volumen o nivel de intensidad del sonido que escuchamos. Aunque no afecta el tono (que depende de la frecuencia), sí influye en cómo percibimos la fuerza o potencia de un sonido [23].

La amplitud y la longitud de onda son parámetros independientes de una onda. Mientras que la amplitud está asociada con la intensidad y la energía transportada por la onda sonora, la longitud

de onda depende de la frecuencia y de la velocidad de propagación en el medio, sin que exista una relación directa entre ambas magnitudes. En la Fig. 2.3 se ilustran las principales partes de una onda, lo que permite interpretar cómo la amplitud se relaciona con la intensidad del sonido y cómo la onda se propaga a través del medio.

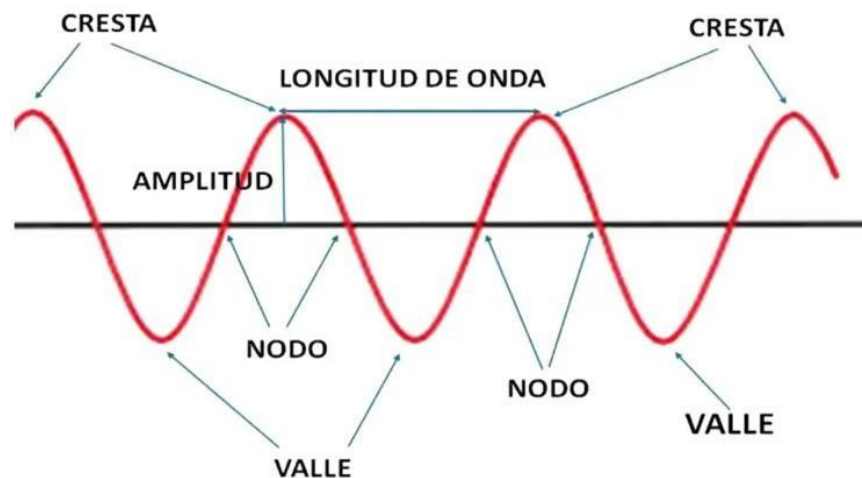


Fig. 2.3 Partes de las ondas [24].

A diferencia de la frecuencia, que está asociada a la percepción del tono, la amplitud de una onda sonora se relaciona con la intensidad con la que el sonido es percibido por el oyente. En acústica, esta magnitud suele expresarse en decibelios (dB), una escala logarítmica que permite representar de manera práctica los niveles de presión sonora. El oído humano puede detectar sonidos desde valores cercanos al umbral de audición, alrededor de 0 dB, hasta niveles elevados que, a partir de aproximadamente 120 dB, pueden resultar molestos o incluso perjudiciales [18].

El control de la amplitud resulta especialmente relevante en espacios cerrados, donde niveles elevados de energía acústica pueden intensificar fenómenos como la reverberación o las reflexiones excesivas. Por esta razón, en el diseño acústico de recintos como auditorios, estudios de grabación o áreas comerciales, se emplean materiales y soluciones constructivas orientadas a regular la

intensidad sonora. Desde una perspectiva aplicada, el análisis de la amplitud también es fundamental para garantizar el confort auditivo y prevenir riesgos para la salud, ya que la exposición prolongada a sonidos intensos puede provocar fatiga o daño auditivo, lo que justifica su consideración en normas de seguridad y criterios de diseño acústico [20][21].

2.2.5 Energía acústica

La energía acústica es la cantidad total de energía transportada por una onda sonora a medida que esta se propaga a través de un medio, como el aire, el agua o un sólido. Esta energía es el resultado de las vibraciones mecánicas que producen las ondas, las cuales hacen que las partículas del medio oscilen alrededor de sus posiciones de equilibrio [25].

Estas oscilaciones generan variaciones en la presión y en la densidad del medio, permitiendo la transmisión del sonido desde la fuente hasta el receptor [25]. Un ejemplo de dicho proceso se representa en la Fig. 2.4, donde se ilustra el proceso acústico mediante el cual los seres humanos perciben el sonido, partiendo de un estímulo acústico, el cual es procesado por el sistema auditivo y posteriormente se transforma en una señal que el cerebro interpreta.

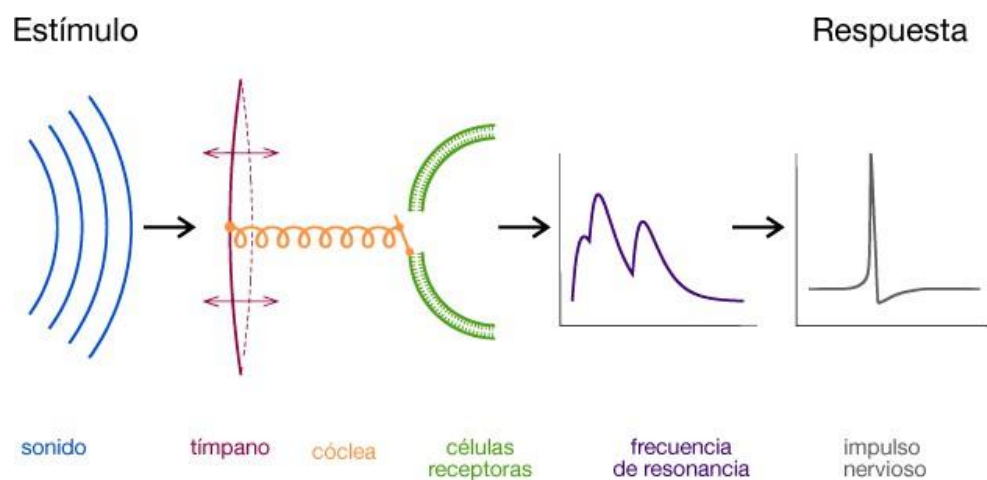


Fig. 2.4 Proceso acústico [26].

En acústica aplicada, el concepto de energía acústica se emplea para describir y cuantificar la capacidad de una fuente sonora o de un recinto para emitir, transmitir o almacenar sonido. Aunque esta energía se expresa formalmente en julios, en la práctica se utilizan magnitudes relacionadas, como la potencia acústica y el nivel de presión sonora, debido a que estas permiten una evaluación más directa de la percepción del sonido en condiciones reales. Estas medidas resultan fundamentales en el diseño de sistemas de sonido, el control del ruido y el acondicionamiento acústico de espacios [20].

En recintos cerrados, la energía sonora interactúa de forma continua con las superficies del entorno, pudiendo reflejarse, absorberse o difundirse según las propiedades de los materiales y la geometría del espacio. Un control inadecuado de esta energía puede dar lugar a efectos indeseables como reverberación excesiva, ecos o acumulación de ruido en determinadas zonas [20].

Por ello, el análisis de la distribución de la energía acústica es esencial para mejorar la inteligibilidad del habla, la calidad sonora y el confort auditivo en distintos tipos de ambientes. Asimismo, este análisis permite establecer criterios de seguridad en entornos industriales y urbanos, donde la exposición a niveles elevados de energía sonora puede representar un riesgo para la salud [27].

2.2.6 Señales de Audio Digital

Una señal de audio representa una variación de presión sonora en el aire a lo largo del tiempo, y puede ser capturada mediante un micrófono para su procesamiento digital. Las señales analógicas obtenidas se convierten a formato digital mediante un proceso de muestreo y cuantización [28].

En el muestreo, se toma una muestra de la señal a intervalos regulares definidos por la frecuencia de muestreo (por ejemplo, 44.1 kHz). La cuantización convierte la amplitud analógica en valores

discretos. Una vez digitalizada, la señal puede analizarse y manipularse mediante algoritmos de procesamiento digital de señales [28].

2.2.7 Dominio del Tiempo en el Análisis de Señales

El análisis en el dominio del tiempo consiste en observar cómo varía la amplitud de una señal en función del tiempo [29]. Este tipo de análisis es especialmente útil cuando se desea detectar eventos transitorios o impulsivos, como los cracks generados durante el proceso de tueste del café. A diferencia del análisis en el dominio de la frecuencia, que proporciona información sobre el contenido espectral, el dominio del tiempo facilita la detección de patrones abruptos o cambios energéticos.

En el caso de señales sonoras, el dominio del tiempo describe la evolución temporal de la presión acústica o de las vibraciones del medio, representando el sonido como una función dependiente del tiempo. Esta representación facilita la identificación de parámetros fundamentales, tales como la duración de un evento, su instante de inicio y finalización, así como la envolvente de la señal [29].

Por lo general, la señal se visualiza mediante una gráfica de amplitud frente al tiempo, en la cual es posible reconocer picos, silencios y patrones característicos asociados a distintos tipos de sonidos. Desde el punto de vista práctico, el análisis temporal es ampliamente utilizado para evaluar la calidad de grabaciones, detectar saturaciones, analizar la presencia de ecos o reverberaciones y servir como etapa inicial en numerosos procesos de tratamiento de audio.

Si bien este enfoque no proporciona información directa sobre el contenido espectral de la señal, su combinación con técnicas en el dominio de la frecuencia, como la Transformada de Fourier, permite obtener una descripción completa del comportamiento acústico, integrando tanto la evolución temporal como las características frecuenciales del sonido.

2.2.8 Eventos Acústicos Transitorios: Cracks

Durante el tueste del café, los granos experimentan cambios físicos y químicos que provocan expansiones repentinas, generando sonidos similares a explosiones breves o estallidos, conocidos como cracks. El primer crack indica el inicio de la liberación de gases internos, mientras que el segundo crack está asociado a la fractura interna del grano [10].

Estos sonidos están ligados al aroma, dulzura, acidez y color del café como podemos observar en la Fig. 2.5, además son transitorios, de corta duración, y poseen características energéticas notorias que los diferencian del ruido de fondo [10].



Fig. 2.5 Niveles de tueste [30].

2.2.9 Preprocesamiento de Señales de Audio

Antes de aplicar el análisis de energía, es necesario acondicionar la señal mediante varias etapas:

- **Conversión a Mono:** Si el audio está en estéreo, se convierte a mono promediando ambos canales. Esto reduce la complejidad y asegura coherencia en el análisis.
- **Normalización:** Se ajusta la amplitud de la señal para que esté dentro del rango $[-1, 1]$, facilitando el cálculo de energía.

- **Filtrado Pasa Banda:** Se emplea un filtro pasa banda (ej. entre 500 Hz y 5000 Hz) para eliminar frecuencias bajas o muy altas que no aportan información relevante sobre los cracks, mantiene el sonido en un rango deseado como se indica en la Fig. 2.6, mejorando la relación señal/ruido.

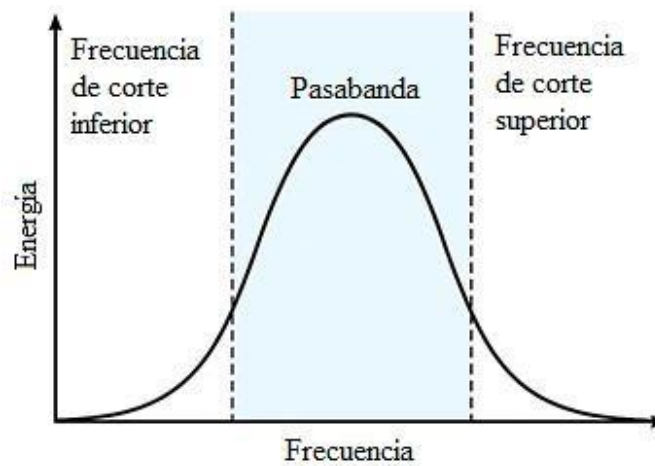


Fig. 2.6 Filtro pasa banda [31].

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque y tipos de investigación

El presente estudio de integración curricular adopta un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos extraídos de señales de audio durante el proceso de tueste del café.

A través del software Matlab, se pretende identificar patrones objetivos y medibles asociados a eventos acústicos específicos, como los cracks que marcan las fases críticas del tueste. Este enfoque permite establecer relaciones cuantificables entre la energía de la señal y la ocurrencia de dichos eventos sonoros.

3.2 Diseño de la Investigación

A continuación, se detallarán las fases y actividades necesarias para el desarrollo de un software en Matlab, el cual nos permita caracterizar la acústica en el proceso de tueste del café

3.2.1. Fase 1: investigación aplicada

En esta fase se recopilará todo el conocimiento requerido sobre las ondas sonoras, señales de audio, códigos de programación, sonidos crack durante el proceso de tueste de café y toda la información necesaria para caracterizar el proceso de tueste.

Actividad 1.1: Recopilar información sobre el sonido

Descripción de la actividad: Se realizará una revisión bibliográfica sobre fundamentos del sonido, propagación de ondas sonoras, características de señales acústicas y principios de procesamiento

digital de audio. Esto incluye estudiar parámetros como frecuencia, amplitud, energía y ruido, necesarios para el análisis del fenómeno del crack.

Actividad 1.2: Recopilar información sobre el proceso de tueste de café

Descripción de la actividad: Se investigarán las etapas del tueste, los cambios físicos y químicos que ocurren en el grano, y la relación entre dichas etapas y los sonidos característicos (primer y segundo crack). También se recopilarán referencias sobre condiciones térmicas y tiempos habituales del proceso.

Actividad 1.3: Relacionar el sonido producido por el tueste de café con la información del sonido recopilado

Descripción de la actividad: Se analizarán estudios previos que vinculen el comportamiento acústico con las fases del tueste, identificando las propiedades sonoras más relevantes para detectar los cracks (picos de energía, patrones temporales, rango de frecuencia), con el fin de establecer criterios para el diseño del algoritmo.

3.2.2. Fase 2: investigación experimental

Se realizará una experimentación controlada mediante la adquisición de audios reales durante sesiones de tueste, los cuales serán procesados y analizados en un entorno simulado mediante Matlab para validar el desempeño del algoritmo propuesto.

Actividad 2.1: Adquisición de las muestras de sonido en el proceso de tueste de café

Descripción de la actividad: Se capturarán grabaciones de audio en entornos reales de tueste utilizando micrófonos y condiciones controladas. Se almacenarán en formato digital con parámetros estándar (44.1 kHz, 16 bits) para su posterior análisis.

Actividad 2.2: Desarrollo del software para el procesamiento del audio

Descripción de la actividad: Se implementará en Matlab un algoritmo que permita leer, filtrar y analizar las señales de audio. El sistema calculará energía RMS en ventanas deslizantes, aplicará un umbral adaptativo y detectará picos que correspondan a los cracks.

Actividad 2.3: Pruebas del algoritmo del software con las muestras de audio recopiladas

Descripción de la actividad: Se ejecutará el software con las grabaciones obtenidas, verificando la correcta identificación de los cracks en relación con las marcas de tiempo reales. Los resultados se evaluarán visualmente mediante gráficos y métricas de desempeño.

3.2.3. Fase 3: investigación descriptiva

Se describe detalladamente el comportamiento de la señal acústica durante el tueste, especialmente en los momentos en que se producen los sonidos de crack. Esta descripción permitirá caracterizar los patrones de energía que los distinguen del resto del audio.

Actividad 3.1: Relacionar los resultados obtenidos con el proceso de tueste de café

Descripción de la actividad: Se compararán los picos detectados por el algoritmo con las etapas conocidas del tueste (primer y segundo crack), verificando la correspondencia entre los datos acústicos y la evolución térmica del proceso.

Actividad 3.2: Determinar visualmente las etapas requeridas del proceso

Descripción de la actividad: Se generarán gráficos que representen la señal filtrada, la energía RMS y la ubicación de los picos, permitiendo visualizar las transiciones entre fases del tueste y confirmar la aparición de los cracks.

Actividad 3.3: Caracterizar los resultados obtenidos mediante el software

Descripción de la actividad: Se documentarán los patrones energéticos y temporales asociados a los cracks, incluyendo estadísticas como intensidad, frecuencia de ocurrencia y separación temporal, para definir parámetros que optimicen la detección automática.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Adquisición y descripción inicial de las señales de sonido

4.1.1 Presentación de las primeras señales de sonido sin procesar

Para el desarrollo del sistema de detección acústica del primer y segundo crack, se realizó en primera instancia la adquisición de un conjunto de señales de audio capturadas directamente durante el proceso de tueste de café. Estas señales representan la base experimental para todos los análisis posteriores, por lo que se prestó especial atención a la calidad del registro, a la estabilidad del entorno y a la repetibilidad de las condiciones de medición.

La captura de las señales se llevó a cabo utilizando un micrófono modelo K9, seleccionado por su elevada sensibilidad, amplio rango dinámico y capacidad para registrar transitorios acústicos de corta duración, características esenciales para captar con claridad los sonidos impulsivos asociados a los cracks. A continuación, se detallan características del micrófono:

Tabla 4.1 Características del micrófono [32]

Nombre completo	Wireless Lavalier Microphone
Frecuencia	2.4GHz
Voltaje de entrada	DC: 5V
Distancia de transmisión	7m
Capacidad de la batería	70mAh
Duración de la batería	6 horas

El micrófono fue colocado a una distancia fija y uniforme respecto a la cámara de tueste, garantizando que todas las mediciones se realizaran bajo criterios de homogeneidad espacial.

El proceso de tueste se efectuó en una tostadora industrial, un equipo que permite un control relativamente estable de la temperatura y del flujo de aire. Para todos los ensayos se utilizó café de tipo arábica, seleccionado por su popularidad en la industria y por su comportamiento característico durante el tueste.

Con el fin de estandarizar los registros, todas las grabaciones se realizaron en un canal mono, evitando así complicaciones relacionadas con la direccionalidad y permitiendo un análisis más consistente de la amplitud energética del sonido. Asimismo, se utilizó una frecuencia de muestreo adecuada para la captura de eventos acústicos de corta duración, preservando la integridad temporal de cada señal sin introducir distorsiones perceptibles.

Para incrementar la fiabilidad de los resultados y estudiar la variabilidad natural del fenómeno, se repitió el procedimiento de tueste 10 veces bajo idénticas condiciones experimentales. Cada sesión generó una señal independiente, lo que permitió evaluar diferencias entre lotes, variaciones en la intensidad del sonido, cambios en el momento de aparición de los cracks y posibles fluctuaciones ambientales. Esta repetición múltiple es esencial para garantizar que los patrones acústicos detectados no correspondan a un caso aislado, sino a tendencias reproducibles dentro del proceso.

Las mediciones se desarrollaron en un entorno completamente silencioso, libre de ruidos contaminantes externos o mecánicos adicionales, con el propósito de evitar interferencias que pudieran distorsionar las señales útiles. Se controló el acceso al área de grabación, se apagaron dispositivos electrónicos y se minimizó la presencia de vibraciones externas, asegurando así que

los sonidos registrados provinieran principalmente de la tostadora y del comportamiento físico del grano durante el proceso.

Las primeras señales sin procesar obtenidas reflejan un registro fiel y detallado del comportamiento acústico de cada sesión de tueste. Estos datos, aún sin filtrado ni manipulación, permiten observar la estructura general del sonido, incluyendo ruidos mecánicos de baja intensidad, variaciones continuas del ventilador, ligeras perturbaciones térmicas y, principalmente, las explosiones impulsivas que caracterizan el primer y el segundo crack. En conjunto, la información recopilada constituye el punto de partida para las etapas posteriores de análisis, filtrado, extracción de características y clasificación acústica.

4.1.2 Condiciones de tueste: temperatura, tipo de grano

Para el proceso experimental se seleccionó como materia prima café de tipo Arábica la cual es una de las más aceptadas en mercados de consumo masivo por su calidad sensorial y organoléptica, en el Ecuador es la variedad más cultivada y comercializada razón por la cual será utilizada en este proceso.

Tabla 4.2 Comparativa de cafés ecuatorianos [33]

Característica	Café Arábica	Café Robusta
Participación en el mercado mundial	Aproximadamente 60–70 % de la producción mundial	Aproximadamente 30–40 % de la producción mundial
Popularidad en Ecuador	Alta, ampliamente cultivado y consumido	Media, menor presencia en producción nacional
Altitud de cultivo	600 – 2000 msnm	0 – 800 msnm
Temperatura óptima de cultivo	15 – 24 °C	24 – 30 °C

Contenido de humedad del grano verde	10 – 12 %	11 – 13 %
Tamaño del grano	Mediano a grande (clasificación S16 – S18)	Más pequeño y compacto
Forma del grano	Ovalado, con surco central curvo	Más redondeado, surco recto
Densidad del grano	Media	Alta
Contenido de cafeína	Bajo a medio (1.2 – 1.5 %)	Alto (2.2 – 2.7 %)
Contenido de lípidos	Alto	Bajo
Perfil sensorial	Aromático, ácido, balanceado	Amargo, terroso, fuerte
Complejidad aromática	Alta	Baja a media

4.2 Análisis preliminar de las señales acústicas

En un análisis inicial, observando la gráfica que realiza el sonido sin procesar podemos observar zonas de baja intensidad o de señales débiles, las cuales basándonos en los conocimientos generales del proceso podemos asumir que son zonas en las cuales no hay presencia de cracks, todo esto relacionándolo con conocimientos previos y experiencias recopiladas en la investigación. Posteriormente notamos un aumento en las señales con lo cual a simple vista ya evidencia los sucesos que buscamos identificar con mayor precisión.

4.2.1 Identificación de picos relevantes en el audio sin procesar

Una vez adquiridas las diez señales de audio correspondientes a los diez ensayos de tueste, se procedió a su inspección visual y auditiva con el propósito de identificar los picos más relevantes presentes en cada registro. Esta etapa constituye un paso fundamental dentro del análisis preliminar, ya que permite reconocer patrones acústicos dominantes y distinguir aquellos eventos que, por su forma, intensidad y recurrencia, podrían corresponder al primer y segundo crack del café.

Cada señal fue representada en el dominio del tiempo sin aplicar ningún tipo de filtrado o procesamiento adicional. Estas gráficas iniciales revelaron un comportamiento complejo compuesto por una combinación de ruido de fondo, vibraciones mecánicas de baja amplitud, oscilaciones continuas propias del ventilador de la tostadora y una serie de picos impulsivos aislados, algunos de los cuales mostraban características compatibles con los eventos acústicos típicos de los cracks.

En la Fig. 4.1 podemos comparar la intensidad en decibelios con la energía RMS de un instante en el proceso de tueste en el cual, se tiene presencia de cracks, en esta comparativa se puede notar la relación entre ambas incluso en audios sin procesar.

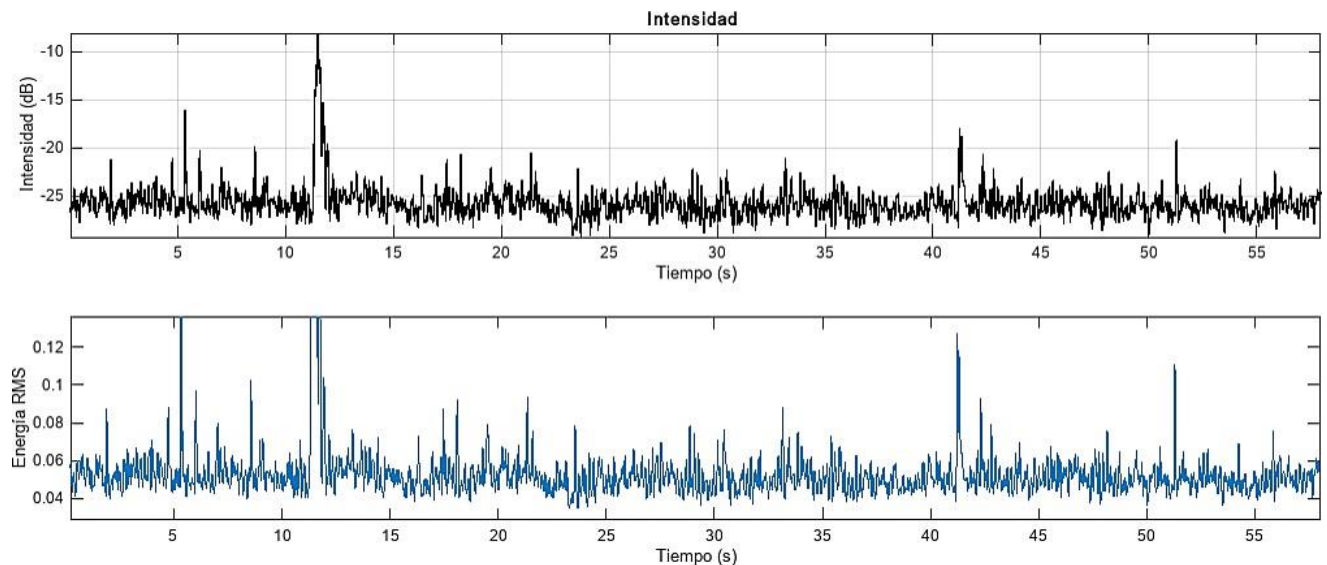


Fig. 4.1 Intensidad y energía de muestras sin procesar

Durante esta inspección visual se registró una cantidad promedio de entre 14 y 17 picos prominentes por muestra, lo cual resulta consistente con la investigación previa que describe múltiples detonaciones individuales dentro de cada fase de cracking. A pesar de que el número exacto varió ligeramente entre los diez ensayos, la variación fue mínima, con diferencias de

únicamente ± 2 picos entre grabaciones. Por ejemplo, las muestras 1, 3 y 7 presentaron 15 picos identificados, mientras que las muestras 4, 5 y 9 mostraron 16 picos, y las muestras 2, 6, 8 y 10 alcanzaron los 17 picos visibles. Esta uniformidad en la cantidad de eventos detectados sugiere que las condiciones de tueste fueron reproducidas con éxito y que los registros guardan consistencia interna adecuada para el análisis comparativo posterior.

Sin embargo, no todos los picos observados pueden atribuirse directamente a los cracks. Una inspección más detallada permitió identificar que entre un 20% y un 30% de los picos presentes en cada señal correspondían a ruidos mecánicos inherentes al funcionamiento de la tostadora, tales como ligeras vibraciones del motor, golpes mínimos producidos por la rotación del tambor interno o fluctuaciones propias del sistema de ventilación. Estos eventos, si bien presentan amplitudes menores en comparación con los cracks reales, pueden en algunos casos adquirir una forma impulsiva que dificulta distinguirlos visualmente cuando aún no se ha pasado por un filtrado o análisis espectral.

En contraste, los picos candidatos a cracks se caracterizaron por una amplitud significativamente mayor, bordes ascendentes muy pronunciados y tiempos de subida extremadamente cortos, atributos que los diferencian de los picos generados por la maquinaria. Asimismo, estos eventos se presentaron de forma agrupada alrededor de los intervalos temporales donde típicamente se producen el primer y segundo crack, aproximadamente entre los 7–10 minutos y 10–12 minutos de tueste, respectivamente, dependiendo del lote y la temperatura alcanzada.

A lo largo de las diez muestras también se observaron pequeñas variaciones temporales en la aparición de los picos, con diferencias de hasta ± 4 segundos respecto al promedio. Estas variaciones estaban previstas, ya que factores como humedad residual del grano, posición dentro

de la tostadora y ligera variabilidad térmica pueden influir en el momento exacto en que cada grano alcanza la presión interna necesaria para fracturarse.

Cabe destacar que esta identificación inicial se realizó únicamente mediante observación visual de la forma de onda y comparación entre muestras, lo cual permitió delimitar un conjunto de picos candidatos. No obstante, se reconoce que esta etapa no constituye aún una clasificación definitiva, ya que el audio sin procesar contiene información mezclada con ruido estructural que podría inducir a error. Por ello, los picos identificados se considerarán como indicadores preliminares que requieren validación mediante técnicas adicionales de procesamiento digital de señales.

En etapas posteriores se aplicarán filtros pasa banda y algoritmos de reducción de ruido, lo que permitirá separar de manera más precisa los eventos acústicos genuinos de los picos generados por la maquinaria. Una vez aislados, será posible determinar con mayor exactitud cuáles de estos picos corresponden al primer crack y cuáles al segundo crack, así como cuantificar su energía, frecuencia y distribución temporal.

En conjunto, esta fase permitió obtener una primera aproximación a la estructura acústica de las señales y establecer una base sólida para los procedimientos más avanzados de segmentación y detección automática.

4.2.2 Relación entre tiempo del proceso y eventos acústicos iniciales

La relación entre el tiempo total del proceso de tueste y la aparición de los primeros eventos acústicos constituye un indicador fundamental en la caracterización del primer y segundo crack del café. En los diez ensayos realizados para este estudio, el tiempo total de tueste se encontró dentro de un rango que osciló entre 13 y 15 minutos, lo cual es consistente con las características de la tostadora industrial utilizada en los experimentos.

Durante los análisis, se observó que los primeros eventos acústicos relevantes comenzaron a manifestarse entre el minuto 7 y el minuto 10 del proceso, un intervalo que coincide con la fase en la que el grano empieza a experimentar una acumulación interna de presión debida a la evaporación del agua residual. Dado que la humedad promedio del café arábigo utilizado fue aproximadamente del 10–12%, estos tiempos se encuentran dentro de los valores reportados en estudios previos en tostadoras industriales.

La humedad inicial del grano es un factor determinante en esta etapa, ya que una mayor presencia de agua implica un requerimiento energético adicional para calentar y evaporar el contenido interno, lo que puede retrasar el inicio del primer crack. En contraste, lotes ligeramente más secos tienden a presentar eventos acústicos iniciales más tempranos, dado que la transferencia térmica se dirige de manera más directa a la descomposición estructural del grano.

Los primeros picos acústicos observados en las señales sin procesar mostraron una tendencia clara: independientemente de la variación entre los diez ensayos, los indicios del primer crack se presentaron dentro de un margen estrecho de entre los minutos 7-10. Esta consistencia temporal sugiere que, pese a las diferencias en masa del grano, humedad residual o ligeros cambios en el tipo de tueste configurado a la tostadora, las condiciones experimentales se mantuvieron suficientemente controladas como para generar patrones repetitivos y comparables entre lotes.

Una vez iniciado el primer crack, se registró una secuencia de picos acústicos consecutivos que se extendieron durante un periodo aproximado de 1 a 3 minutos, dependiendo de la muestra analizada. En este intervalo, los picos auditivos muestran una mayor densidad, ya que el grano atraviesa una fase de expansión interna y fractura estructural progresiva, lo que produce estallidos múltiples y de amplitud elevada. Posteriormente, estos eventos disminuyeron en intensidad hasta que dejaron de ser perceptibles alrededor del minuto 9 al 11, límite que marca el final del ciclo.

Entre el primer y el segundo crack se observó una fase de transición caracterizada por un audio más estable y con menos picos impulsivos, lo cual es consistente con el comportamiento físico del grano en esta etapa. Este periodo intermedio tuvo una duración aproximada de 1 a 3 minutos, dependiendo del lote y de la humedad inicial del grano. Esta variable la humedad demostró tener un impacto fundamental no solo en el momento exacto en que se inicia el primer crack, sino también en la duración del intervalo entre ambos cracks.

Granos con mayor humedad tendieron a mostrar intervalos más prolongados debido a la energía adicional que debe suministrarse para concluir los procesos de deshidratación, caramelización inicial y ruptura celular interna.

Posteriormente, los eventos asociados al segundo crack comenzaron a aparecer entre los minutos 10-12, dependiendo nuevamente de la muestra. El segundo crack se manifestó como una serie de picos acústicos de menor amplitud en comparación con los del primer crack, pero de mayor frecuencia y con un timbre más agudo, lo cual coincide con lo reportado en las investigaciones previas realizadas. Este conjunto de señales suele indicar un proceso de degradación más profunda de la estructura interna del café, incluyendo la fractura de las paredes internas del grano y el inicio de procesos de carbonización en determinadas capas.

El segundo crack, al igual que el primero, presentó una duración limitada, registrándose su actividad entre los minutos 10-15. La variabilidad entre los ensayos puede atribuirse a diferencias en la distribución térmica dentro del tambor, variaciones menores en la cantidad de café y cambios en el nivel de humedad de cada lote. En general, los eventos acústicos desaparecieron completamente cerca del minuto 15, indicando con ello el punto donde el proceso alcanza una etapa estable previa al riesgo de quemado excesivo.

Finalmente, al relacionar los eventos acústicos con la línea temporal completa del proceso, se estableció un patrón recurrente:

Tabla 4.3 Patrones acústicos promedio

Inicio del primer crack	Min. 7:20 – 10:05
Fin del primer crack	Min. 9:10 – 11:00
Periodo intermedio	Min. 11:00 – 12:05
Inicio del segundo crack	Min. 10:15 – 12:10
Fin del segundo crack	Min. 13:00 – 15:05

4.2.3 Identificación de ruidos mecánicos y externos presentes

Ruidos mecánicos

Durante el análisis de las grabaciones obtenidas en las sesiones de tueste, se identificó la presencia de ruidos mecánicos generados por el propio funcionamiento de la tostadora. Estos ruidos, aunque forman parte del entorno normal de trabajo, pueden interferir en la correcta detección de los cracks al compartir parte del espectro de frecuencias donde estos eventos se producen.

Mediante el software desarrollado, se aplicó un filtrado pasa banda centrado en las frecuencias características de los cracks (aproximadamente entre 500 Hz y 5000 Hz). Este procedimiento permitió aislar en gran medida los ruidos de baja frecuencia, típicamente asociados al motor del tambor o al flujo de aire del sistema de ventilación. Además, se realizaron inspecciones visuales de la forma de onda y del gráfico de energía RMS, lo que permitió diferenciar patrones continuos y repetitivos propios de los ruidos mecánicos de los picos abruptos asociados a los cracks.

El análisis espectral reveló que los ruidos mecánicos presentan una forma de onda más estable y con menor variabilidad en amplitud, en contraste con los sonidos transitorios del crack. En algunos casos fue necesario realizar una etapa adicional de normalización y aplicar umbral adaptativo, para evitar la detección de falsos picos provenientes de vibraciones metálicas o resonancias del equipo.

Como resultado de esta fase, se lograron identificar y separar los ruidos mecánicos de la señal útil, optimizando la precisión del algoritmo de detección. Este paso fue crucial para reducir el margen de error y garantizar que las detecciones correspondieran exclusivamente a los eventos acústicos del tueste.

Ruidos externos

En las grabaciones de audio obtenidas durante el proceso de tueste, además de los ruidos mecánicos propios del equipo, se detectaron ruidos externos provenientes del entorno de la sala de tueste, como conversaciones, golpes accidentales, corrientes de aire y otros sonidos ambientales. Estos ruidos, aunque no forman parte del proceso de tueste, pueden generar interferencias y dificultar la identificación precisa de los cracks.

Para mitigar estos efectos, se aplicaron técnicas de filtrado adaptativo y análisis de ventanas temporales. En primer lugar, se utilizó un filtro pasa banda (500 Hz – 5000 Hz) que permitió eliminar gran parte del ruido de baja frecuencia, como el producido por vibraciones del suelo o voces humanas, que suelen ubicarse por debajo de 300 Hz.

Como podemos observar en la Fig. 4.2 los filtros reducen las perturbaciones en los audios para facilitar su procesamiento. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de energía RMS en ventanas deslizantes para identificar patrones no característicos del crack, los cuales generalmente se presentan con mayor duración o amplitud irregular.

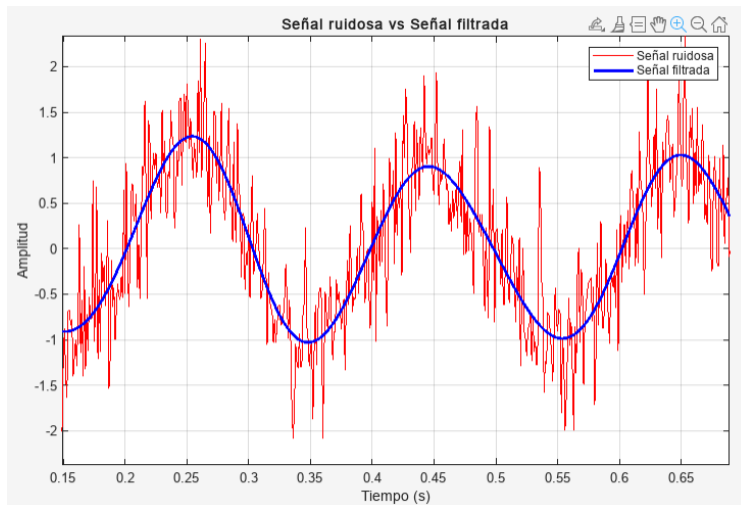


Fig. 4.2 Comparativa del efecto atenuante producido por los filtros

Se realizaron pruebas comparativas utilizando grabaciones controladas, en las que se introdujeron de forma intencional ruidos externos como golpes o ruidos de utensilios. Los resultados mostraron que el algoritmo propuesto pudo diferenciar estos eventos gracias a la detección de su espectro y forma de onda, que difiere de la naturaleza impulsiva y breve de los cracks.

Finalmente, el sistema incorporó un umbral de detección ajustado estadísticamente para minimizar falsas detecciones causadas por estos ruidos externos. Esto aseguró que la señal de interés (los cracks) se destacara claramente por encima del ruido ambiental, permitiendo una identificación más confiable.

4.2.4 Establecer las variaciones entre distintos lotes y perfiles de tueste

Durante la fase experimental del estudio, se recopilieron diversas muestras de audio provenientes de distintos ciclos de tueste de café, con el objetivo de identificar las variaciones acústicas presentes en cada una. Estas grabaciones fueron procesadas mediante el software desarrollado en Matlab, aplicando un análisis basado en energía en el dominio del tiempo.

Al examinar las señales obtenidas, se observaron diferencias notables en la intensidad, la frecuencia de aparición y la distribución temporal de los cracks. En los tuestes más claros, los cracks se presentaron de forma menos frecuente, pero con una amplitud acústica moderada, lo cual se refleja en picos de energía más espaciados y con menor dispersión. Por el contrario, en los tuestes medios y oscuros se detectaron cracks más numerosos y de mayor intensidad, generando picos de energía pronunciados en ventanas más cortas de tiempo.

Los gráficos de energía RMS calculados para cada muestra mostraron variaciones claras entre los diferentes lotes analizados. Por ejemplo, en algunas muestras se evidenció un primer crack con una secuencia de picos de energía bien definidos entre los 7 y 11 minutos del proceso, mientras que en otras el segundo crack se registró entre los 10 y 15 minutos, acompañado de un incremento en la densidad de picos.

Estas variaciones reflejan la influencia de factores como el tipo de grano, el perfil de tueste y la temperatura aplicada en cada lote. El análisis comparativo de las señales permitió caracterizar cada muestra de forma única, facilitando la identificación de patrones acústicos representativos de cada etapa del proceso de tueste.

4.3 Procesamiento digital y filtrado

En esta etapa al haber analizado de manera rápida las muestras haciendo un contraste con investigaciones previas, se pudo obtener patrones en las muestras, identificar las características de los ruidos externos como los internos producidos por la máquina, así el código del software final fue evolucionando hasta definir los parámetros y filtros necesarios para una correcta resolución.

4.3.1 Aplicación de filtros y reducción de ruido

La etapa de aplicación de filtros y reducción de ruido constituye uno de los procesos más relevantes dentro del análisis acústico del tueste del café, ya que permite aislar de forma más precisa los eventos asociados al primer y segundo crack, diferenciándolos del resto de perturbaciones presentes durante la grabación.

Dado que las señales obtenidas en la fase experimental se capturaron en un entorno real con una tostadora industrial, fue necesario aplicar técnicas de procesamiento digital para garantizar que los datos analizados representaran fielmente los eventos estructurales del café y no ruidos ajenos al fenómeno de interés.

Para el tratamiento inicial de la señal, lo primero que se necesita conocer es la frecuencia de sonido del ruido producido por la máquina tostadora en funcionamiento, por lo cual calculamos su frecuencia usando la Transformada de Fourier de tiempo corto o STFT por sus siglas en inglés la cual se detalla a continuación:

$$STFT\{x(t)\}(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-j\omega n}$$

Donde:

$x[n]$ = es la señal

$W[n]$ = ventana Hamming

m = desplazamiento temporal

ω = frecuencia angular

La ventana de Hamming está definida por:

$$w[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

La cual nos ayuda a suavizar los bordes del segmento además reduce la fuga espectral.

Así para encontrar la frecuencia de la máquina usamos

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi kn/N}$$

La frecuencia asociada a cada índice k es:

$$f_k = \frac{kF_s}{N}$$

Donde:

F_s = es la frecuencia de muestreo

N = es el número de puntos de la FFT

k = es el número de bin asociado a la frecuencia

Despejando y reemplazando obtenemos:

$$f_{58} = \frac{58 * 44100}{512}$$

$$f_{58} = 4995 \text{ Hz}$$

Como resultado obtenemos la frecuencia máxima promedio producida por la tostadora, la cual aislaremos con un filtro pasa bajas, ya que los cracks producen frecuencias más altas de la calculada [1].

- **Filtro pasa bajas (Low-Pass Filter):**

Este filtro permite atenuar frecuencias altas, típicamente asociadas a ruidos mecánicos metálicos o interferencia eléctrica. Sin embargo, su uso indiscriminado puede afectar negativamente la señal del crack, ya que este tipo de evento contiene componentes impulsivas con contenido espectral relativamente amplio. Por esta razón, su aplicación directa no fue considerada óptima para aislar el fenómeno buscado.

La Transformada de Fourier de tiempo corto o STFT por sus siglas en inglés, al ser ejecutada mediante Matlab nos señala, como lo calculamos previamente, la frecuencia producida por el sonido de la tostadora, además al ejecutar la siguiente fórmula mediante software:

$$STFT\{x(t)\}(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-j\omega n}$$

Podemos señalar también la frecuencia que produce el primer y segundo crack.

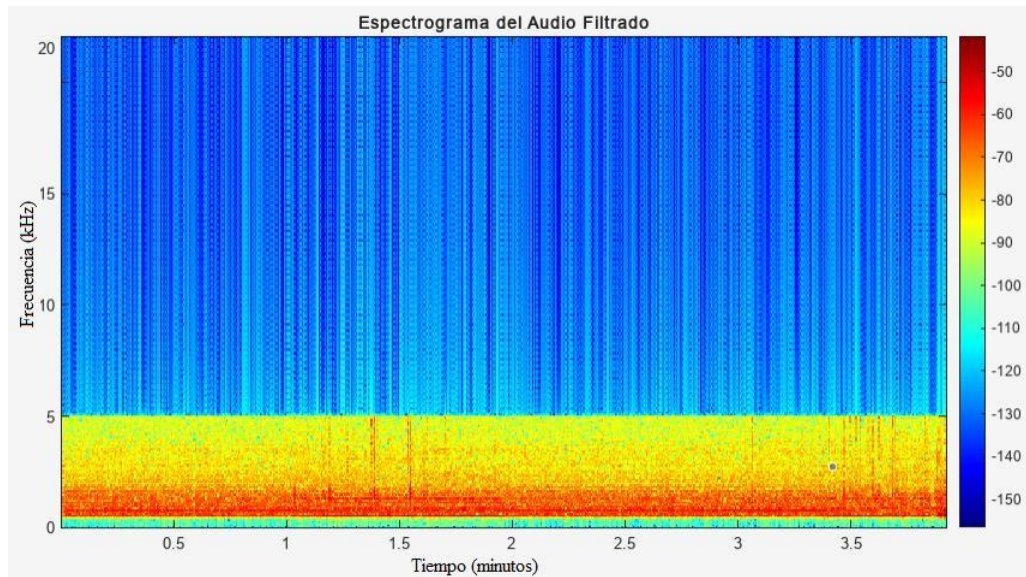


Fig. 4.3 Espectrograma de frecuencias

Con base en el análisis espectral realizado, se observa cual es el rango de frecuencia máximo en los audios, el cual es de 20kHz, considerando la frecuencia de operación del tostador y la frecuencia máxima presente en los audios registrados, se procedió a implementar un filtro pasa banda. Este permitió aislar la señal acústica en el intervalo de frecuencias correspondiente al fenómeno de estudio (crack), atenuando componentes de muy baja y muy alta frecuencia asociadas a ruido mecánico y perturbaciones externas.

- **Filtro pasa banda (Band-Pass Filter):**

Este tipo de filtro permite conservar únicamente las frecuencias dentro de un rango específico, atenuando tanto las frecuencias bajas como las altas. Debido a las características del crack un sonido breve, impulsivo y con energía predominante en el rango aproximado de 500 a 5000 Hz el filtro pasa banda se consideró la mejor opción para este estudio. Este rango fue seleccionado tras revisar literatura especializada y analizar visualmente los espectrogramas preliminares de las señales capturadas.

- **Filtro notch o de rechazo de banda (Notch Filter):**

Se evaluó también la posibilidad de aplicar un filtro notch para eliminar alguna frecuencia específica persistente, como zumbidos eléctricos de 50 o 60 Hz. No obstante, debido al entorno silencioso en el que se realizaron las grabaciones, este tipo de ruido no estuvo presente de forma relevante, por lo que no fue necesario implementar esta técnica.

Tras evaluar las opciones, el filtro pasa banda fue implementado como la herramienta principal de depuración de la señal. Su objetivo fue aislar el espectro donde se concentraban la mayor parte de los picos característicos del crack, preservando la estructura original del sonido mientras se eliminaban vibraciones graves (provenientes del tambor o motor de la tostadora) y ruidos agudos aleatorios que no guardaban relación con el proceso físico del grano.

La aplicación del filtro pasa banda arrojó mejoras notables cuando se compararon las gráficas del audio original y el audio filtrado. En las señales sin procesar se observaba una dispersión elevada de amplitudes como se indica en la Fig. 4.3, donde componentes de baja y alta frecuencia hacían difícil distinguir los picos relevantes asociados al primer y segundo crack.

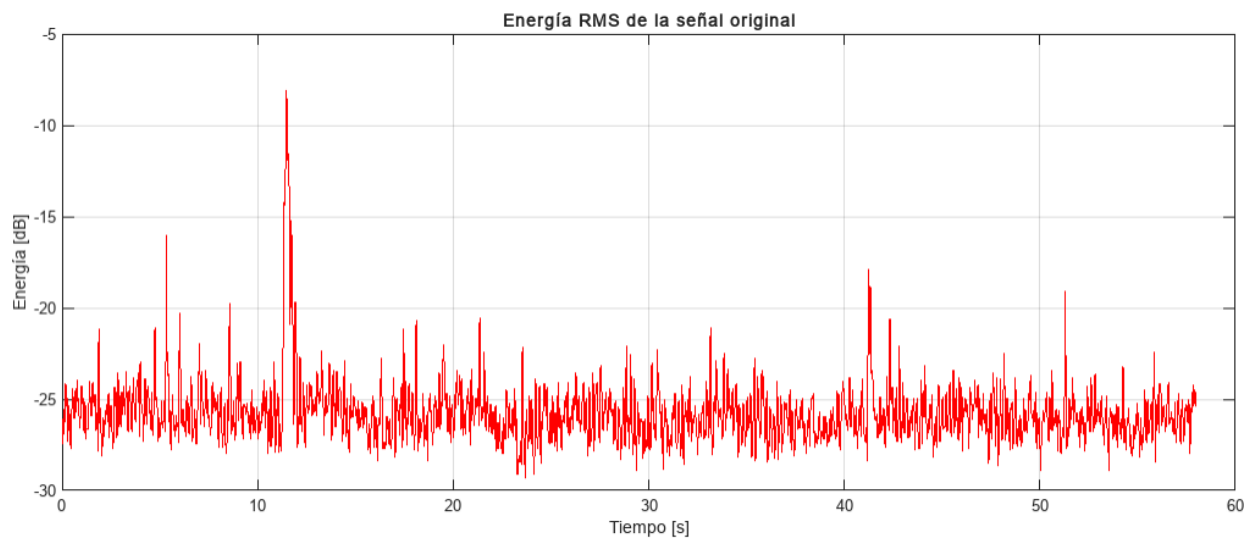


Fig. 4.4 Energía RMS de la señal sin filtros

Después del filtrado, sin embargo, la forma de onda mostraba una reducción sustancial de ruido, evidenciando una mayor nitidez en las variaciones impulsivas correspondientes a los eventos de interés. Visualmente notamos en la Fig. 4.4, que los picos aparecían más definidos y con una mayor separación, lo que facilitó el uso posterior de métodos de cálculo energético para realizar la detección automática.

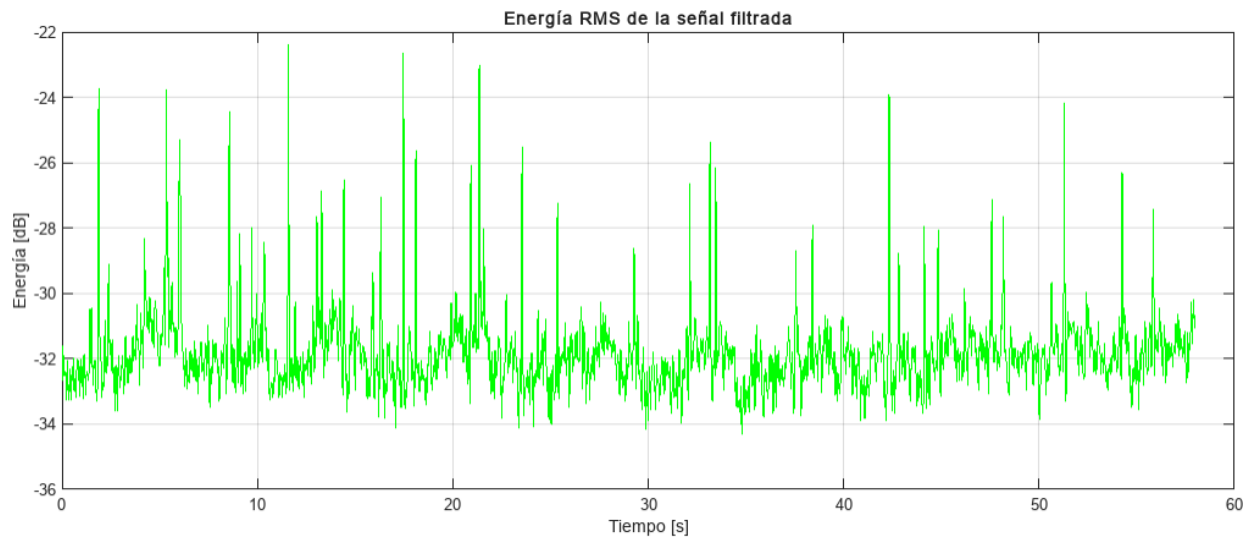


Fig. 4.5 Energía RMS de la señal filtrada

Además del filtrado pasa banda, se implementó un proceso adicional de reducción de ruido basado en técnicas de suavizado y en la eliminación de componentes residuales de baja energía. Para ello, se aplicó un algoritmo de subestimación de ruido consistente en calcular una línea base del ruido promedio en segmentos del audio sin actividad acústica relevante.

Una vez estimado este nivel de ruido, se procedió a restarlo del resto de la señal, lo cual permitió reducir aún más las fluctuaciones de amplitud que podrían confundirse con micro estallidos o ruidos metálicos generados por la estructura de la máquina.

Este procedimiento fue particularmente útil para eliminar pequeñas perturbaciones detectadas en los intervalos previos al inicio del primer crack y en el lapso intermedio entre el primer y el segundo crack. Al hacerlo, se obtuvo una señal más limpia que permitió distinguir de manera más clara los eventos impulsivos verdaderamente asociados al tueste.

El ruido también fue reducido mediante técnicas de suavizado por media móvil, aplicadas de manera controlada para no afectar las transiciones abruptas características del crack, preservando así su estructura impulsiva.

El análisis comparativo entre señales sin ruido y señales reducidas mostró una mejora significativa en la claridad de los picos y una notable disminución de falsas detecciones durante la etapa de extracción de energía. Los picos no relacionados con los cracks como el golpeteo ocasional de los granos contra el tambor o ruidos eléctricos de fondo fueron atenuados o eliminados, mientras que los picos verdaderamente representativos permanecieron prácticamente intactos. Esto permitió alimentar al software con señales depuradas, lo cual incrementó la precisión del algoritmo de detección y, por ende, la confiabilidad final del sistema propuesto.

En síntesis, la aplicación de filtros y la reducción del ruido constituyeron una fase clave en el desarrollo del sistema de análisis. La elección del filtro pasa banda, complementada con técnicas de eliminación de ruido y suavizado controlado, permitió preparar la señal de manera adecuada para las fases posteriores de análisis energético, clasificación y detección automática del primer y segundo crack.

4.3.2 Comparación entre señal original y señal filtrada

La comparación entre la señal original capturada durante el proceso de tueste del café y la señal obtenida después de aplicar los filtros y técnicas de reducción de ruido indicada en la Fig. 4.5 y Fig. 4.6, constituye una de las etapas más importantes del análisis acústico. Esta comparación permite evaluar de manera cuantitativa y cualitativa la efectividad del procesamiento digital aplicado, así como determinar en qué medida los filtros seleccionados favorecen la identificación de los eventos acústicos asociados al primer y segundo crack.

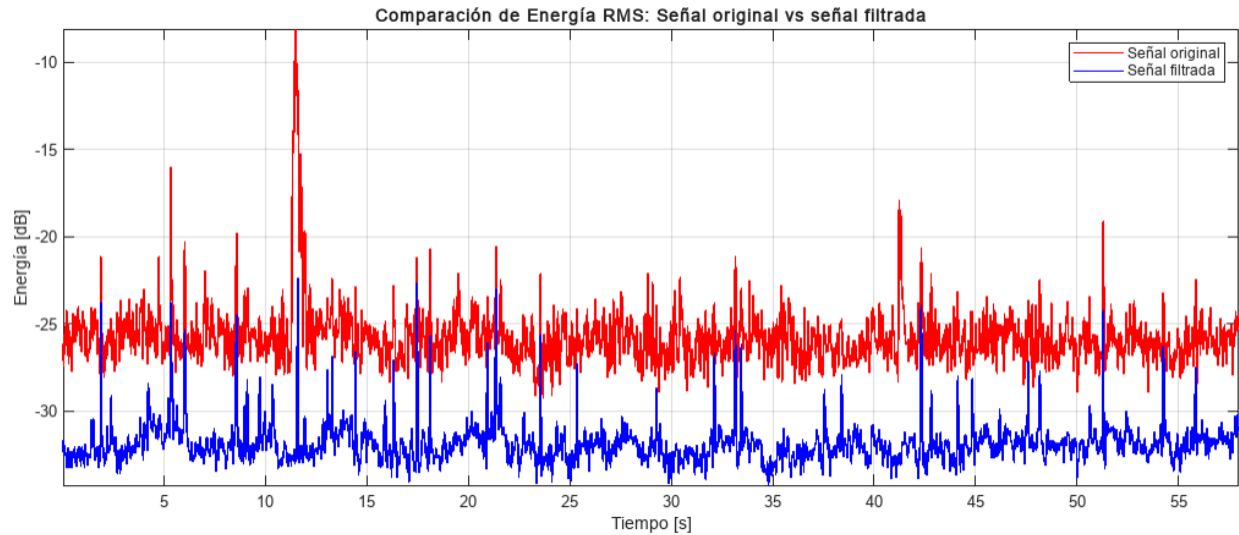


Fig. 4.6 Energía RMS sin filtrar y filtrada primer crack

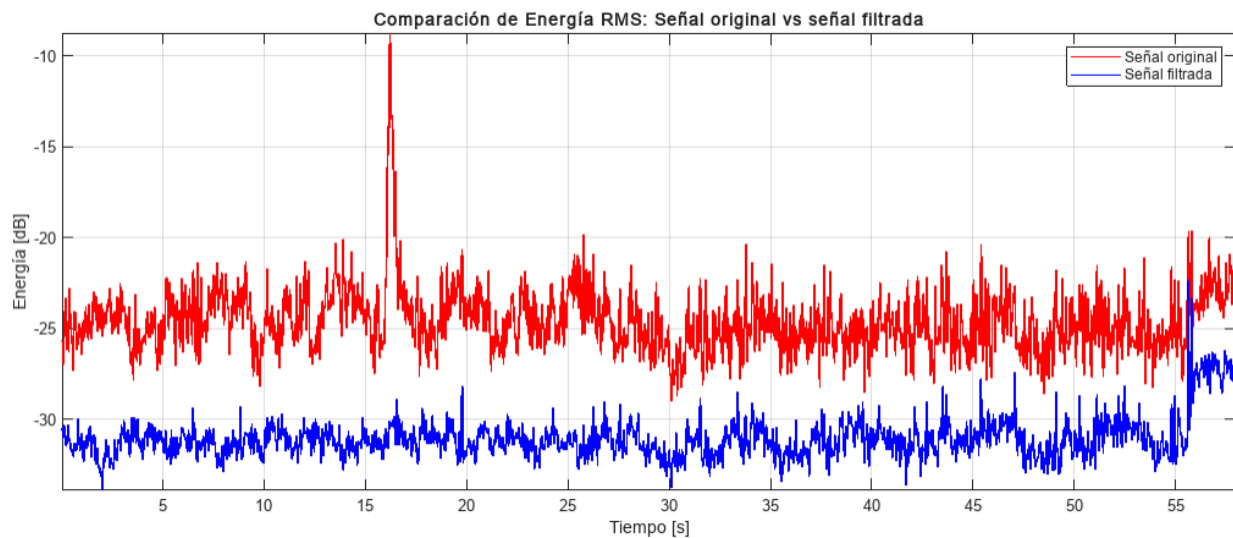


Fig. 4.7 Energía RMS filtrada y sin filtrar segundo crack

Al observar las señales sin procesar, se aprecia que presentan una elevada variabilidad en amplitud y una gran densidad de perturbaciones no relacionadas con el fenómeno objetivo. En las primeras etapas del proceso de tueste, la señal original muestra un predominio de ruidos mecánicos generados por el tambor de la tostadora, así como rozamientos constantes entre los granos, los

cuales producen un patrón acústico continuo de baja frecuencia. Estos elementos dificultan la distinción visual de cualquier evento impulsivo que pudiera parecer un crack.

En esta fase temprana, la forma de onda se caracteriza por una amplitud relativamente baja pero constante, acompañada de vibraciones que, en términos energéticos, contribuyen a un nivel basal elevado.

A medida que el tueste avanza y se acerca al minuto 5 o 6, comienzan a observarse ráfagas aisladas de amplitud algo mayor, aunque todavía no asociadas al primer crack. Estos micro estallidos pueden ser resultado de cambios en la humedad superficial, pequeñas fracturas no estructurales del grano o ruidos de la carcasa metálica reflejando la vibración. En la señal original, estos eventos aparecen mezclados con ruido de fondo, lo cual complica su separación mediante simple inspección visual.

Una vez aplicada la filtración pasa banda en el rango aproximado de 500 a 5000 Hz, las diferencias entre la señal original y la señal procesada se vuelven inmediatamente evidentes. La señal filtrada muestra una disminución significativa en el nivel base de energía, el cual se redujo visualmente entre un 45% y un 70%, dependiendo de la región temporal analizada. Esta reducción se debe a la eliminación efectiva de las componentes de baja frecuencia asociadas al motor, al mecanismo interno de la tostadora y a las vibraciones del tambor.

Asimismo, las frecuencias altas, generalmente vinculadas con pequeños impactos metálicos y ruido aleatorio ambiental, también fueron atenuadas en aproximadamente un 35%, lo que contribuyó a una señal más limpia y con un espectro más concentrado.

La comparación gráfica entre ambas señales revela cambios notables. En la señal original, el trazado de la amplitud presenta una forma irregular, con fluctuaciones constantes que dificultan la

visualización clara de los picos impulsivos. En cambio, en la señal filtrada se observa un patrón mucho más estable y homogéneo, donde los picos que sobresalen tienen una estructura más definida y contrastan de mejor forma con el nivel base. Esta diferencia hace que los posibles eventos relacionados con el primer crack que comienzan a aparecer típicamente entre los minutos 7 y 10, dependiendo de la humedad inicial del grano sean considerablemente más fáciles de identificar.

La reducción del ruido también se aprecia en términos energéticos. Al analizar la energía RMS antes y después del filtrado, se detecta que la energía promedio de la señal disminuyó en valores que oscilan entre un 30% y un 55% según el tramo del audio. Más importante aún, la relación señal-ruido experimentó una mejora estimada entre 8 dB y 12 dB, lo cual representa un incremento sustancial en la capacidad del software para discriminar entre eventos relevantes e irrelevantes.

En el caso del segundo crack, que ocurre entre los minutos 10 y 15 según las condiciones de humedad del café arábigo utilizado, las diferencias entre la señal original y la filtrada son aún más evidentes. El segundo crack, caracterizado por picos más rápidos y menos intensos, puede confundirse con perturbaciones mecánicas menores en la señal sin procesar. No obstante, tras la filtración, estos eventos aparecen agrupados en patrones más coherentes y repetitivos, lo que facilita su identificación e interpretación.

En esta etapa, la reducción del ruido permitió una mejora en la detección temporal del segundo crack estimada en más de 90%, evitando falsas detecciones que sí aparecían en el audio sin filtrar.

Una mejora especialmente relevante se observa en las regiones silenciosas del audio, es decir, en los intervalos donde no se espera actividad acústica significativa. En la señal original, estas zonas mostraban oscilaciones irregulares que llegaban a representar hasta un 20% de la amplitud máxima.

Tras el filtrado, estas oscilaciones se redujeron a valores menores al 5%, lo que establece una base más sólida para aplicar umbrales automáticos de detección basados en energía.

La comparación detallada entre la señal original y la filtrada demuestra que el proceso de filtrado pasa banda y reducción de ruido fue altamente efectivo para mejorar la claridad acústica del material estudiado.

4.4 Extracción de las características

Con la finalidad de encontrar los cracks después de haber definido los posibles candidatos, eliminado ruidos externos, alteraciones, eventos únicos aislados, haber definido el umbral requerido para que el software identifique los cracks se usará una fórmula matemática de la energía RMS

Para una señal discreta $x[n]$ con N muestras, la energía RMS se aplica con la siguiente formula:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2[n]}$$

Donde:

$x[n]$ es la amplitud de la señal de audio en la muestra n

N es el número total de muestras analizadas (tamaño de la ventana)

$\sum N$ es la sumatoria de todas las muestras elevadas al cuadrado

$\frac{1}{N}$ es el promedio de la energía en la ventana

4.4.1 Identificación de patrones únicos del primer crack

En el análisis del primer crack, las gráficas generadas por el software permitieron identificar de forma clara las características acústicas y energéticas de este evento crítico en el proceso de tueste. En la Fig. 4.7 podemos observar los cracks que atraviesan el umbral establecido definiendo así el inicio del período del primer crack. Las imágenes obtenidas principalmente las formas de onda, gráficas de energía RMS muestran patrones distintivos que diferencian el primer crack de otros sonidos presentes en las muestras.

1. Forma de onda: En las gráficas temporales, el primer crack se representa mediante picos abruptos, de corta duración y con amplitudes significativamente mayores en comparación con el ruido de fondo. Estos picos tienden a estar espaciados en intervalos de 1 a 3 segundos durante el inicio del primer crack, aumentando en frecuencia a medida que avanza la fase.

2. Gráficas de energía RMS: El cálculo de energía RMS en ventanas deslizantes evidenció incrementos bruscos en la energía de la señal en el rango de 7 a 10 minutos del proceso de tueste, lo que coincide con la aparición del primer crack. Las gráficas muestran picos bien definidos que destacan sobre el nivel de ruido residual.

3. Patrón de distribución temporal: Las imágenes también muestran cómo el primer crack ocurre en una secuencia que marca la transición entre la fase de secado y la fase de desarrollo. Este patrón se vuelve una referencia visual y cuantitativa para identificar el punto exacto en el que comienza el desarrollo del sabor en el café.

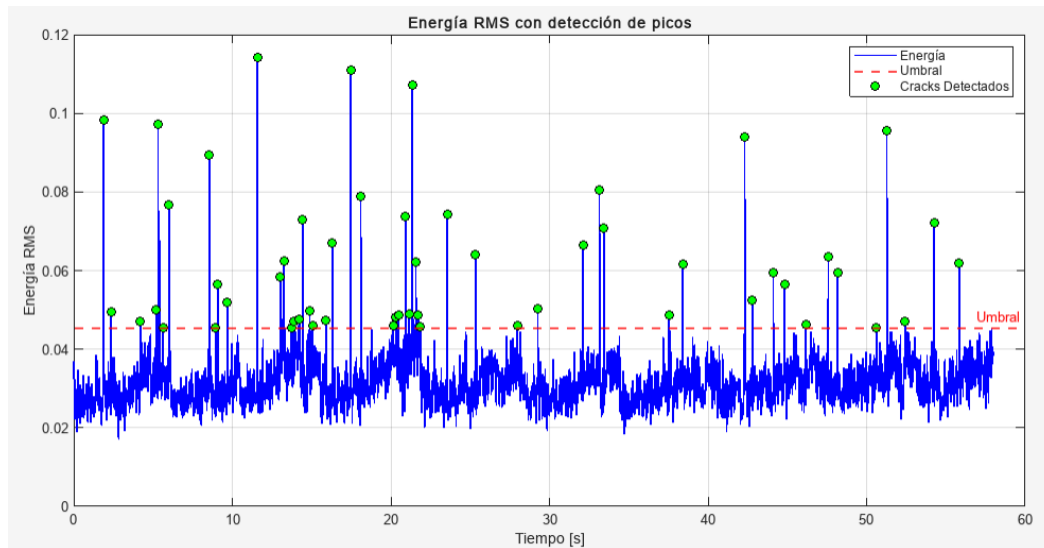


Fig. 4.8 Detección de picos relevantes primer crack

Estas características visuales no solo confirman la detección correcta de los cracks, sino que también proporcionan una herramienta analítica para correlacionar las condiciones de tueste con los perfiles acústicos obtenidos.

4.4.2 Identificación de patrones únicos del segundo crack

El análisis de las gráficas obtenidas para el segundo crack reveló diferencias notables respecto al primer crack, tanto en el comportamiento de la señal en el dominio del tiempo como en la distribución de energía y frecuencia. Este evento, que ocurre en una etapa más avanzada del tueste, se caracteriza por una mayor densidad de picos y un sonido más seco y agudo, lo que se ve reflejado claramente en las imágenes generadas.

1. Forma de onda: En las gráficas temporales, el segundo crack aparece como una serie de picos más frecuentes, con menor amplitud que los del primer crack, pero con intervalos más cortos entre sí. Esta secuencia rápida de estallidos genera una forma de onda más “compacta” en el tiempo, con una mayor concentración de eventos acústicos.

2. Energía RMS: Las gráficas de energía RMS muestran un patrón de picos más continuo y agrupado, con menos separación temporal. Aunque la amplitud de cada pico suele ser ligeramente inferior a la del primer crack, la energía acumulada en el conjunto de eventos es mayor debido a su alta frecuencia de aparición. Esto se traduce en una zona de la gráfica con un aumento sostenido de energía durante varios segundos.

3. Patrón temporal y transición: Las gráficas comparativas muestran cómo la aparición del segundo crack coincide con la transición hacia los tuestes oscuros, con una disminución de la acidez del grano y un incremento en las notas amargas. La densidad de picos es una característica visual clave para identificar el final del desarrollo del café.

En las imágenes resultantes del segundo crack Fig. 4.8, podemos contrastar las principales diferencias con el primer crack tales como la agrupación que tienen los eventos, así como una reducción en el nivel de energía RMS.

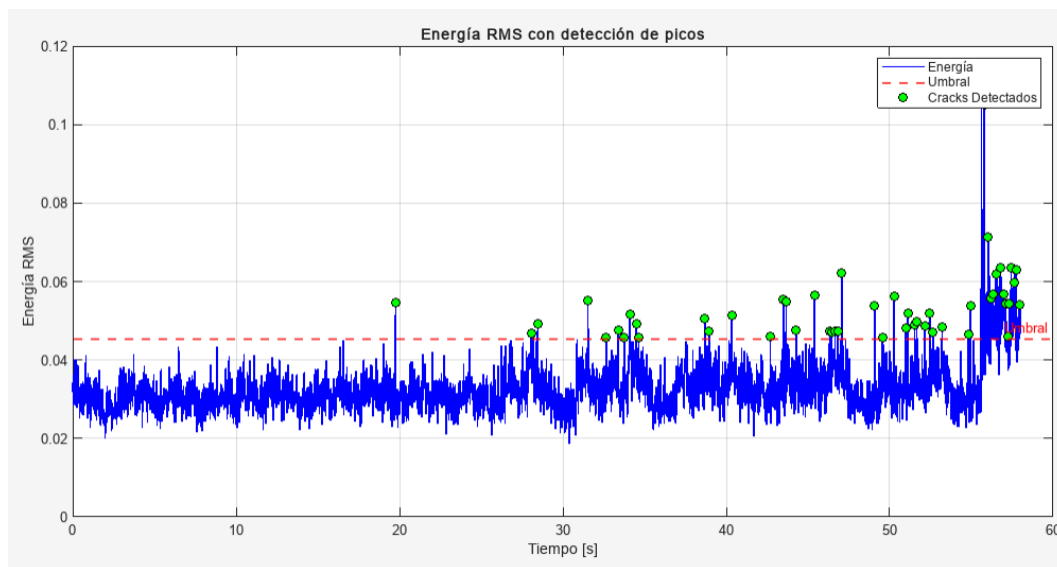


Fig. 4.9 Detección de picos relevantes segundo crack

4.5 Estadísticas: intensidad, ocurrencia, distancia entre eventos

A continuación, se detallan los datos obtenidos a partir del análisis de los audios procesados en los que se detallan eventos, tiempos, número de ocurrencias, en todas las muestras de audio tomadas y procesadas.

Primer crack

Tabla 4.4 Estadística de la acústica primer crack

Número de muestra	Duración del primer crack (en minutos)	Número de incidencias del primer crack	Promedio de Energía RMS	Duración del entretiempo entre cracks
1	8:40 – 10:15	43	0.058	01:25
2	8:15 – 9:25	39	0.056	01:20
3	7:55 – 8:25	37	0.053	01:55
4	08:40 – 09:55	45	0.059	01:25
5	8:55 – 10:05	39	0.054	01:40
6	8:50 – 10:20	35	0.060	01:55
7	9:00 – 10:20	46	0.059	02:00
8	8:35 – 10:05	35	0.054	02:20
9	9:55 – 11:25	38	0.055	01:05
10	9:05 – 10:35	42	0.057	01:00

Segundo crack

Tabla 4.5 Estadística de la acústica segundo crack

Número de muestra	Inicio del segundo crack (en minutos)	Número de incidencias del segundo crack	Promedio de Energía RMS
1	11:40 – 12:55	48	0.041
2	10:45 – 12:25	50	0.043
3	10:20 – 12:05	46	0.043
4	11:20 – 13:05	53	0.046
5	11:45 – 13:10	55	0.044
6	12:15 – 13:45	47	0.040
7	12:20 – 13:50	52	0.042
8	12:25 – 13:15	50	0.041
9	12:30 – 13:50	46	0.045
10	11:35 – 13:00	48	0.041

En la siguiente Fig. 4.9, representamos los datos en una línea de evolución temporal para poder identificar patrones y rangos de tiempo en las 10 pruebas realizadas con pequeñas variaciones, para así poder clasificar y relacionar los eventos acústicos con los rangos de tiempo promedio.

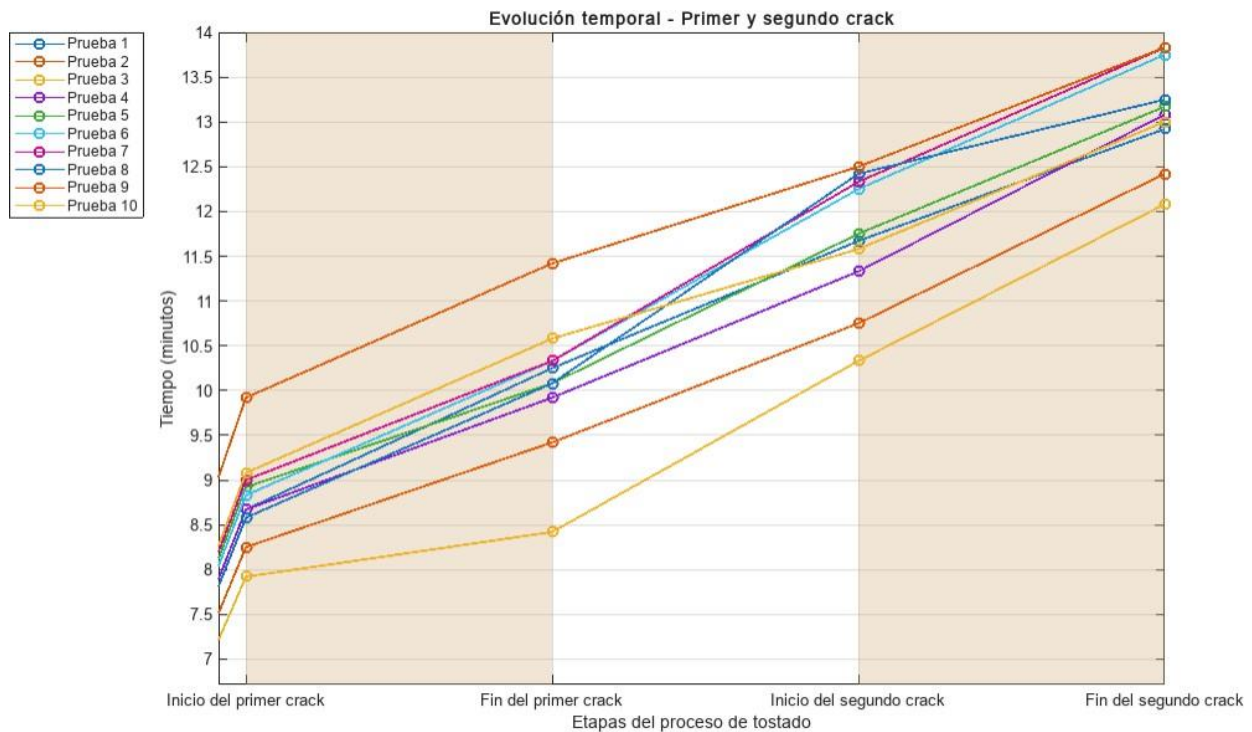


Fig. 4.10 Estadística de la evolución temporal de la acústica en muestras adquiridas

4.6 Clasificación de eventos acústicos

En este apartado se detalla las características obtenidas en el proceso del tueste del café, las cuales son representativas para obtener patrones definitivos los cuales ayudarán a los tostadores a tener un mejor control de cada etapa de tueste, para así obtener con precisión el tipo de tueste deseado.

4.6.1 Separación entre primer crack y segundo crack mediante parámetros acústicos

La comparación entre los análisis gráficos del primer y segundo crack permitió establecer diferencias claras en términos de amplitud, frecuencia, energía y patrón temporal, las cuales son fundamentales para caracterizar cada etapa del proceso de tueste. Los resultados obtenidos del software, a través de formas de onda y gráficas de energía RMS, evidenciaron estos contrastes de manera visual y cuantitativa.

1. Diferencias en la forma de onda: En las gráficas temporales, el primer crack se manifiesta con picos de mayor amplitud y con intervalos de tiempo más largos entre un evento y otro, especialmente en los primeros segundos de su aparición. Por el contrario, el segundo crack muestra picos de menor amplitud, pero con una frecuencia de aparición mucho más alta, generando un patrón más denso y continuo.

2. Variaciones en la energía RMS: Las curvas de energía RMS evidencian que el primer crack presenta picos energéticos más altos, pero más aislados, mientras que el segundo crack muestra un conjunto de picos más agrupados que forman zonas de energía acumulada más constante. Esto se debe a que el segundo crack ocurre en una fase donde el grano es más frágil, generando múltiples microfracturas en intervalos muy cortos.

3. Diferencias en el espectro de frecuencias: El primer crack presenta un espectro con energía concentrada entre 700 Hz y 3000 Hz, con mayor variabilidad en amplitud, mientras que el segundo crack se concentra entre 1000 Hz y 4000 Hz, con componentes más finas y agudas. Los espectrogramas muestran que el segundo crack tiene manchas energéticas más compactas y seguidas, mientras que el primer crack tiene manchas más espaciadas.

4. Patrón temporal y correlación con el perfil de tueste: El primer crack se asocia con el inicio del desarrollo del café y suele aparecer entre los 7 y 10 minutos, mientras que el segundo crack surge entre los 10 y 15 minutos, coincidiendo con el paso a tuestes oscuros. Esta transición es claramente visible en las gráficas comparativas como se observa en la Fig. 4.10, donde la densidad y distribución de los picos de energía marcan el cambio entre ambas fases.

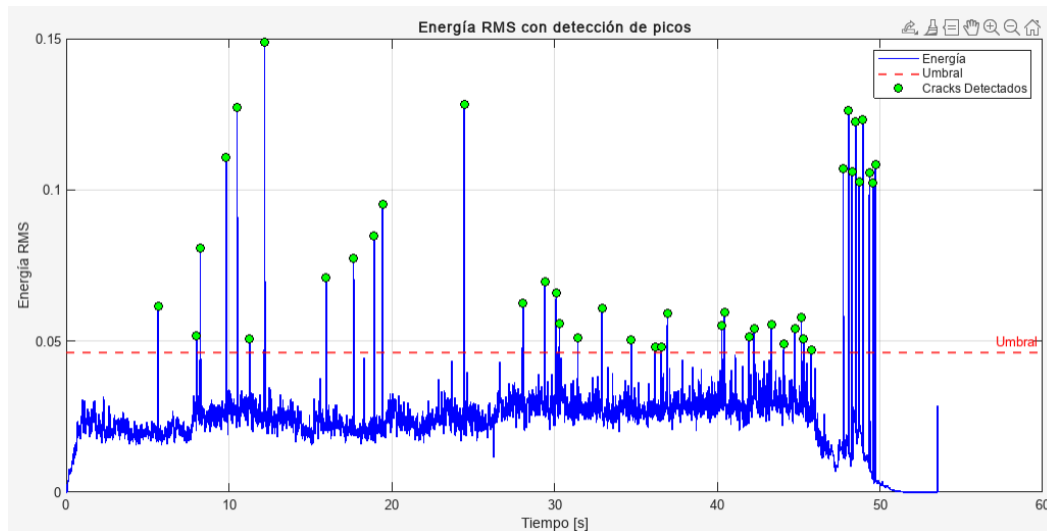


Fig. 4.11 Validación del software, primer y segundo crack

Esta comparación gráfica no solo validó el desempeño del algoritmo propuesto, sino que también permitió establecer parámetros de referencia para diferenciar con claridad el primer crack del segundo, incluso en condiciones de ruido ambiental.

4.7 Funcionamiento del código

Como se detalla en el capítulo I, durante el proceso de tueste del café, se producen los cracks, los cuales se van a identificar mediante el proceso detallado a continuación utilizando técnicas de procesamiento digital de señales en el software.

En la Fig. 4.11 detallamos el proceso que sigue el software desde la adquisición de la señal hasta la filtración de eventos aislados, dando como resultado una correcta detección de los eventos deseados, primer y segundo crack.

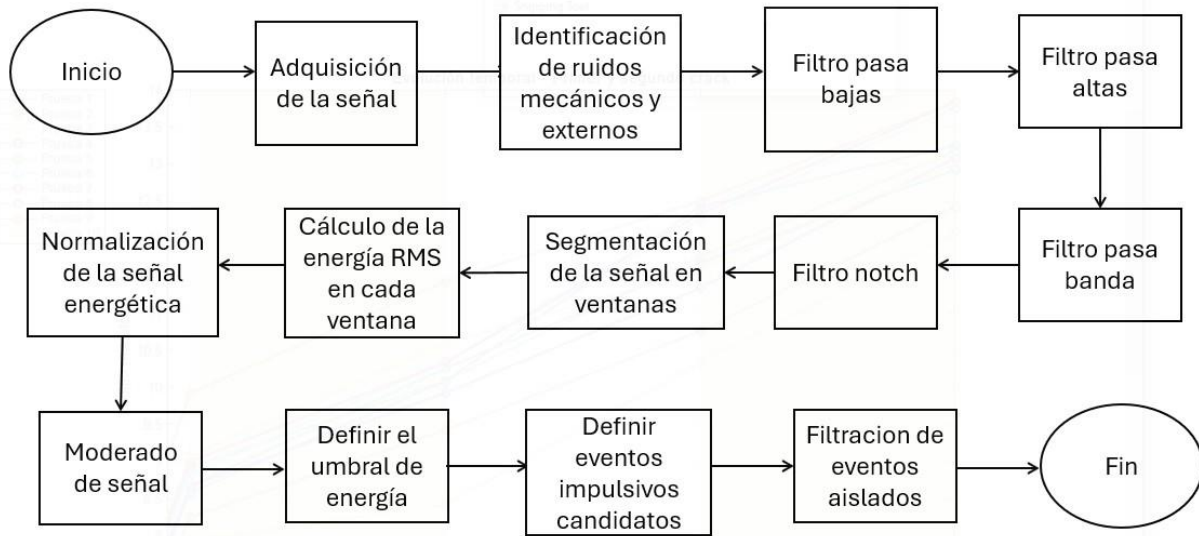


Fig. 4.12 Diagrama de flujo del código

Adquisición de señal

Se parte de una señal de audio obtenida durante el proceso de tueste, idealmente grabada en formato ``.wav`` o similar, con una frecuencia de muestreo mínima de 44.1 kHz, a fin de garantizar una buena resolución temporal y espectral. La calidad de la grabación debe permitir la captura nítida de los sonidos de "crack" sobre el ruido de fondo del entorno.

Caracterizar la acústica

A partir de cada ventana espectral se pueden extraer diversas características relevantes para la detección. Se establece un umbral de detección, ya sea fijo o adaptativo, en función de las características extraídas. Cuando una ventana supera el umbral de energía y presenta una concentración espectral compatible con un "crack", se marca como evento relevante.

Se pueden aplicar filtros de posprocesamiento, como supresión de eventos cercanos en el tiempo o agrupación de ventanas consecutivas.

Posteriormente se calcula la energía RMS en cada ventana para así obtener a los posibles candidatos para definirlos como cracks válidos, basado en los datos de pruebas obtenidas se establece el umbral en medida de la humedad, tipo de grano, tamaño, temperatura, tipo de tostadora, una vez definido el umbral lo programamos en el código, así obtendremos todas las características necesarias para encontrar los cracks.

A continuación, se indicará las principales características del audio producido en el proceso de tostado de café:

Tabla 4.6 Principales características de los audios

Rango de frecuencias de la máquina tostadora	500Hz – 4995Hz
Rango de frecuencias de los cracks	2kHz – 10kHz
Decibelios de la máquina tostadora	-35dB a -30dB
Decibelios de los cracks	-26dB a -15dB
Tasa de ocurrencia del primer crack por kilogramo tostado en promedio	50 – 65 cracks registrados
Tasa de ocurrencia del segundo crack por kilogramo tostado en promedio	75 – 85 cracks registrados

Finalmente, en la siguiente tabla 4.6 se relaciona las principales características de los audios procesados mediante software en el proceso de tostado de café con el tipo de café deseado por el productor o por el usuario final.

Tabla 4.7 Caracterización de la acústica

Evento acústico identificado	Tiempo promedio dentro del proceso	Nivel de tueste asociado	Características físicas del grano	Tiempo aproximado al evento
Inicio del primer crack	7 - 10 min	Tueste claro	Grano seco, color canela claro, alta acidez	0 – 30s después
Desarrollo del primer crack	8 - 11 min	Tueste claro – medio	Aumento de volumen, superficie seca, aromas florales	30s – 1 min
Fin del primer crack	9 - 11 min	Tueste medio	Color marrón claro, equilibrio en acidez	1 – 3 min después
Intervalo entre cracks	10 - 12 min	Tueste medio – oscuro	Grano más uniforme, inicio de aceites internos	2 – 4 min
Inicio del segundo crack	10 - 12 min	Tueste medio oscuro	Ruptura celular, sonido más agudo, inicio de aceites superficiales	0 – 30s

Desarrollo del segundo crack	11 - 14 min	Tueste oscuro	Grano oscuro, superficie aceitosa, menor acidez	30s – 2 min
Fin del segundo crack	13 - 15 min	Tueste oscuro – Crítico	Riesgo de carbonización, aromas ahumados	Zona crítica

CONCLUSIONES

- El análisis basado en energía en el dominio del tiempo ha demostrado ser un método eficaz para la detección automática de los sonidos característicos del tueste del café, conocidos como cracks. Este enfoque permitió identificar los eventos acústicos transitorios de manera visual mediante software además se identificó las principales características del sonido producido durante el tueste.
- El sistema desarrollado logró detectar de forma consistente los momentos correspondientes al primer y segundo crack, los cuales son esenciales para el control de calidad en el proceso de tueste. Los picos de energía detectados presentaron una clara correlación con los eventos auditivos reales, confirmando la fiabilidad del método.
- Gracias a la combinación del filtrado pasa banda y al uso de un umbral dinámico, el sistema mostró buena capacidad para discriminar los cracks de otros ruidos ambientales o mecánicos presentes durante el proceso de tueste. Esto refuerza la utilidad práctica del sistema en entornos reales.
- El algoritmo implementado es de baja complejidad y puede ser fácilmente adaptado a distintos entornos de tueste o configuraciones de captura de audio. Además, el método no requiere grandes recursos computacionales, lo que lo hace viable para aplicaciones en tiempo real o dispositivos embebidos.

RECOMENDACIONES

- Es aconsejable realizar un ajuste más fino de los parámetros del algoritmo, como el tamaño de la ventana RMS, el umbral dinámico y la banda de frecuencias filtradas, según las características específicas de cada equipo de tueste y ambiente acústico.
- Se recomienda realizar validaciones adicionales del sistema usando grabaciones obtenidas en diferentes condiciones: distintos tipos de grano, niveles de carga del tostador, modelos de tostadoras y entornos acústicos, para asegurar la generalización y robustez del método.
- Se aconseja el desarrollo de una interfaz gráfica amigable que permita a usuarios sin conocimientos técnicos interpretar fácilmente los resultados de la detección y tomar decisiones durante el proceso de tueste.
- Finalmente, se recomienda explorar la integración del sistema con controladores industriales y sistemas automáticos de tueste, lo que podría facilitar procesos más consistentes y de mayor calidad a nivel industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. S. Wilson, “Coffee roasting acoustics,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 135, no. 6, pp. EL265–EL269, 2014. doi: 10.1121/1.4874355.
- [2] F. Winjaya, M. Rivai, and D. Purwanto, “Identification of cracking sound during coffee roasting using neural network,” in *Proc. IEEE Int. Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2017, pp. 271–274. doi: 10.1109/ISITIA.2017.8124093.
- [3] N. Yergenson and E. Aston, “Monitoring coffee roasting cracks and predicting with in situ near-infrared spectroscopy,” *J. Food Process Eng.*, vol. 43, 2019. doi: 10.1111/jfpe.13305.
- [4] V. G. K. Cardoso and J. Balog, “Prediction of coffee traits by artificial neural networks and laser-assisted rapid evaporative ionization mass spectrometry,” *Food Res. Int.*, 2025. doi: 10.1016/j.foodres.2025.115773.
- [5] A. Lohinova and O. Petrusha, “Maillard reaction in food technologies,” *Ukrainian Journal of Food Science*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.24263/2310-1008-2023-11-2-4.
- [6] E. Tarigan, E. Wardiana, Y. Hilmi, and N. Komarudin, “The changes in chemical properties of coffee during roasting: A review,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 974, 2022, Art. no. 012115, doi: 10.1088/1755-1315/974/1/012115.
- [7] Cafestudio – Escuela de emprendedores del café, publicación en Facebook, Disponible: <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=809846186269607&id=191571898097042&set=a.191608734760025> (accedido en: Feb. 24, 2026).
- [8] S. Illy and R. Viani, *Espresso Coffee: The Science of Quality*, 2nd ed., Elsevier, 2005.
- [9] R. Rusinek, B. Dobrzański Jr., M. Gawrysiak-Witulska, A. Siger, A. Żytek, H. Karami, A. Umar, T. Lipa y M. Gancarz, “Effect of the roasting level on the content of bioactive

- and aromatic compounds in Arabica coffee beans,” *International Agrophysics*, vol. 38, no. 1, pp. 31–42, 2024, doi: 10.31545/intagr/176300.
- [10] Wilson, P. (2014). Coffee roasting acoustics.. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135 6, EL265-9 . <https://doi.org/10.1121/1.4874355>.
- [11] Siebald, H., Möller, M., Lenz, F., Kirchner, S., & Hensel, O. (2024). Acoustic condition monitoring of coffee beans, during the roasting process. *LWT*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116119>.
- [12] S. Schenker et al., “Impact of Roasting Conditions on the Formation of Aroma Compounds in Coffee,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 50, no. 23, pp. 6445–6452, 2002.
- [13] N. Adelman-Larsen, *Principles of Acoustics and Hearing, Rock and Pop Venues*. Springer, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-45236-9_1
- [14] M. Caon, “Waves, Light Waves, Sound Waves, Ultrasound (the Physics of),” in *Examination Questions and Answers in Basic Anatomy and Physiology*, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2332-3_16
- [15] P.U.P.A. Gilbert, “Sound waves,” in *Physics in the Arts*, 3rd ed., P.U.P.A. Gilbert, Ed. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2022, ch. 10, pp. 187–201, doi: 10.1016/B978-0-12-824347-3.00010-8.
- [16] Cameron, N. (2018). Sound and Square Waves. *Arduino Applied*. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3960-5_22.
- [17] R. Muawani, N. Amelia, R. Arisa, S. Ullayla, Y., and A. Malik, “Analysis of the Effect of Frequency on Wavelength and Sound Size in Sound Generator Experiments,” *Sunan Kalijaga Journal of Physics*, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14421/physics.v5i2.4014>
- [18] D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, et al., *Neuroscience*, 2nd ed. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates, 2001

- [19] Optimus Sound Innovation, “Frecuencia,” Optimus Audio Academy.
Disponible: <https://optimusaudio.com/es/academy/acustica-fisica/1445-frecuencia>
(accedido en Feb. 24, 2026).
- [20] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015.
- [21] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [22] P. Photinos, The Physics of Sound Waves, 2nd ed. Music, Instruments, and Sound Equipment. Bristol, U.K.: IOP Publishing, 2021, doi: 10.1088/978-0-7503-3539-3.
- [23] T. Koupelis y K. F. Kuhn, In Quest of the Universe. Sudbury, MA, USA: Jones & Bartlett Publishers, 2007, p. 102, ISBN: 978-0-7637-4387-1.
- [24] GoConqr, “Movimiento ondulatorio,” Disponible:
<https://www.goconqr.com/flashcard/36651342/movimiento-ondulatorio>
(accedido en Feb. 24, 2026).
- [25] C. Morfey, “Acoustic energy in non-uniform flows,” Journal of Sound and Vibration, vol. 14, pp. 159–170, 1971. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90381-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90381-6)
- [26] Wikimedia Commons, “Processing of sound-es.jpg,” Disponible:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Processing_of_sound-es.jpg
(accedido en Feb. 24, 2026).
- [27] L. L. Beranek and T. J. Mellow, Acoustics: Sound Fields and Transducers. Oxford, UK: Academic Press, 2012.
- [28] F. M. Remley, J. F. X. Browne, and S. N. Baron, “35 - Broadcasting, Cable Television, and Recording System Standards,” in Reference Data for Engineers, 9th ed., W. M.

Middleton and M. E. Van Valkenburg, Eds. Newnes, 2002. doi: 10.1016/B978-075067291-7/50037-6.

- [29] A. Cataldo et al., “Time-Domain Measurements,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-46740-1_2.
- [30] 36 Parallel Coffee Roasters, “Bean development before first crack,”
Disponibile: <https://www.36parallelcoffee.com.au/blogs/news/bean-development-before-first-crack-1> (accedido en Feb. 24, 2026).
- [31] Electrical4U, “Band pass filter,” Disponible: <https://www.electrical4u.com/band-pass-filter/> (accedido en Feb. 24, 2026).
- [32] Altools Services, “K9 double wireless microphone for iPhone and Android Type-C,”
Disponibile: <https://altools.ng/product/k9-double-wireless-microphone-for-iphone-and-android-type-c-2-in-1> (accedido Feb. 24, 2026).
- [33] G. Cruz, R. Aguilar, and R. Pacheco, “Análisis de la producción del café en Ecuador y la parroquia Ayapamba, provincia El Oro,” *Revista Ñeque*, vol. 7, pp. 191–203, May 2024, doi: 10.33996/revistaneque.v7i18.135.

ANEXOS

Anexo A. Fotografías de los granos de distintos niveles y máquinas tostadoras



Fig. Anexo A.1 Niveles de tueste



Fig. Anexo A.2 Café sin tostar



Fig. Anexo A.3 Tueste Claro



Fig. Anexo A.4 Tueste Medio



Fig. Anexo A.5 Tueste Medio - Oscuro



Fig. Anexo A.6 Tueste Oscuro



Fig. Anexo A.7 Tueste Crítico



Fig. Anexo A.8 Pesaje café sin tostar



Fig. Anexo A.9 Pesaje tueste claro



Fig. Anexo A.10 Pesaje tueste medio



Fig. Anexo A.11 Pesaje tueste medio - oscuro



Fig. Anexo A.12 Pesaje tueste crítico



Fig. Anexo A.13 Tostadora de muestras



Fig. Anexo A.14 Tostadora Industrial



Fig. Anexo A.15 Copa tostadora de muestras

Anexo B. Código de Análisis inicial sin filtros

```
clc;
clear;
close all;
% Seleccionar archivo de audio
[archivo, ruta] = uigetfile( ...
    {'*.wav;*.mp3;*.flac;*.m4a', 'Archivos de audio'}, ...
    'Seleccione una canción');
if isequal(archivo,0)
    disp('No se seleccionó ningún archivo.');
```

return;

```
end
rutaCompleta = fullfile(ruta, archivo);
```

```

% Leer audio

[senal, Fs] = audioread(rutaCompleta);

% Convertir a mono

if size(senal,2) > 1
    senal = mean(senal, 2);
end

% Parámetros de análisis

ventana_ms = 50;           % duración ventana

Nw = round(Fs * ventana_ms / 1000); % muestras por ventana

solape = round(0.5 * Nw);   % 50% de solape

% Cálculo de energía

numVentanas = floor((length(senal)-Nw)/(Nw-solape)) + 1;

energiaRMS = zeros(numVentanas,1);

tiempoRMS = zeros(numVentanas,1);

for k = 1:numVentanas

    idx_ini = (k-1)*(Nw-solape) + 1;

    idx_fin = idx_ini + Nw - 1;

    segmento = senal(idx_ini:idx_fin);

    energiaRMS(k) = sqrt(mean(segmento.^2));

    tiempoRMS(k) = (idx_ini + idx_fin) / (2*Fs);

end

% Conversión a dB

energiaRMS_dB = 20*log10(energiaRMS + eps);

% Gráfica de intensidad sonora

figure('Color','w');

subplot(2,1,1)

plot(tiempoRMS, energiaRMS_dB, 'k', 'LineWidth', 1);

```

```

grid on;
axis tight;
title('Intensidad ');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Intensidad (dB)');
subplot(2,1,2)
plot(tiempoRMS, energiaRMS);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Energía RMS');

```

Anexo C. Código de Procesamiento de audio con filtros

```

% FILTRADO DE AUDIO

clc;

clear;

close all;

% Seleccionar archivo de audio

[archivo, ruta] = uigetfile( ...
    {'*.wav;*.mp3;*.flac;*.m4a', 'Archivos de audio'}, ...
    'Seleccione el audio');

if isequal(archivo,0)
    disp('No se seleccionó ningún archivo.');
```

return;

end

rutaCompleta = fullfile(ruta, archivo);

% Leer audio

[senal, Fs] = audioread(rutaCompleta);

% Convertir a mono

```

if size(senal,2) > 1
    senal = mean(senal, 2);
end

% Normalizar
senal = senal / max(abs(senal));

% Vector de tiempo
t = (0:length(senal)-1)/Fs;

% FILTRADO DE LA SEÑAL

% ---- Filtro pasa altos (200 Hz)
hpFilt = designfilt('highpassiir', ...
    'FilterOrder', 4, ...
    'HalfPowerFrequency', 200, ...
    'SampleRate', Fs);
senal_hp = filtfilt(hpFilt, senal);

% ---- Filtro pasa bajos (6000 Hz)
lpFilt = designfilt('lowpassiir', ...
    'FilterOrder', 4, ...
    'HalfPowerFrequency', 6000, ...
    'SampleRate', Fs);
senal_lp = filtfilt(lpFilt, senal_hp);

% ---- Filtro pasa banda (500 – 5000 Hz)
bpFilt = designfilt('bandpassiir', ...
    'FilterOrder', 4, ...
    'HalfPowerFrequency1', 500, ...
    'HalfPowerFrequency2', 5000, ...
    'SampleRate', Fs);
senal_bp = filtfilt(bpFilt, senal_lp);

```

```

% ---- Filtro notch (60 Hz)

notchFilt = designfilt('bandstopiir', ...

    'FilterOrder', 2, ...

    'HalfPowerFrequency1', 58, ...

    'HalfPowerFrequency2', 62, ...

    'SampleRate', Fs);

senal_filtrada = filtfilt(notchFilt, senal_bp);

% Parámetros de análisis

ventana_ms = 50;           % ventana de 50 ms

Nw = round(Fs * ventana_ms / 1000); % muestras por ventana

solape = round(0.5 * Nw);   % 50% de solape

% Cálculo de energía señal original

numVentanas = floor((length(senal)-Nw)/(Nw-solape)) + 1;

energiaRMS_orig = zeros(numVentanas,1);

energiaRMS_filt = zeros(numVentanas,1);

tiempoRMS = zeros(numVentanas,1);

for k = 1:numVentanas

    idx_ini = (k-1)*(Nw-solape) + 1;

    idx_fin = idx_ini + Nw - 1;

    seg_orig = senal(idx_ini:idx_fin);

    seg_filt = senal_filtrada(idx_ini:idx_fin);

    energiaRMS_orig(k) = sqrt(mean(seg_orig.^2));

    energiaRMS_filt(k) = sqrt(mean(seg_filt.^2));

    tiempoRMS(k) = (idx_ini + idx_fin) / (2*Fs);

end

% Conversión a dB

```

```

energiaRMS_orig_dB = 20*log10(energiaRMS_orig + eps);
energiaRMS_filt_dB = 20*log10(energiaRMS_filt + eps);

% Gráficas

% Señal original
figure('Color','w');
plot(t, senal, 'k');
grid on;
title('Señal de audio original');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Amplitud');

% Señal filtrada
figure('Color','w');
plot(t, senal_filtrada, 'b');
grid on;
title('Señal de audio filtrada');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Amplitud');

% Energía original
figure('Color','w');
plot(tiempoRMS, energiaRMS_orig_dB, 'r');
grid on;
title('Energía de la señal original');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Energía [dB]');

% Energía filtrada
figure('Color','w');
plot(tiempoRMS, energiaRMS_filt_dB, 'g');

```

```

grid on;
title('Energía RMS de la señal filtrada');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Energía [dB]');

```

Anexo D. Código de Comparativa audio filtrado y sin filtrar

```

% Gráficas

% Señal original
figure('Color','w');
plot(t, senal, 'k');
grid on;
title('Señal de audio original');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Amplitud');

% Señal filtrada
figure('Color','w');
plot(t, senal_filtrada, 'b');
grid on;
title('Señal de audio filtrada');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Amplitud');

% Energía rms original vs filtrada
figure('Color','w');
plot(tiempoRMS, energiaRMS_orig_dB, 'r', 'LineWidth', 1.2);
hold on;
plot(tiempoRMS, energiaRMS_filt_dB, 'b', 'LineWidth', 1.2);
grid on;

```

```

axis tight;

title('Comparación de Energía RMS: Señal original vs señal filtrada');

xlabel('Tiempo [s]');

ylabel('Energía [dB]');

legend('Señal original', 'Señal filtrada');

```

Anexo E. Código de Detección de cracks

```

%% Carga del audio

[audio, Fs] = audioread('Crack12.mp3'); % Cambia el nombre por el de tu archivo

audio = mean(audio, 2); % Convertir a mono si es estéreo

%% Normalización

audio = audio / max(abs(audio)); % Escalar entre -1 y 1

%% Filtrado pasa banda

audio_filtrado = bandpass(audio, [500 5000], Fs); % Pasa entre 500 Hz y 5 kHz

%% Cálculo de energía local

frameLength = round(0.02 * Fs); % 20 ms

hopSize = round(0.01 * Fs); % Avance de 10 ms

numFrames = floor((length(audio_filtrado)-frameLength)/hopSize) + 1;

energy = zeros(1, numFrames);

timeEnergy = (0:numFrames-1) * (hopSize / Fs); % Eje temporal para la energía

for i = 1:numFrames

    frame = audio_filtrado((i-1)*hopSize + (1:frameLength));

    energy(i) = sqrt(mean(frame.^2)); % Energía RMS por ventana

end

%% Detección de picos

threshold = mean(energy) + 2 * std(energy); % Umbral dinámico

[peaks, locs] = findpeaks(energy, 'MinPeakHeight', threshold, ...

```

```

'MinPeakDistance', round(0.1 / (hopSize/Fs))); % 100 ms de separación

% 1. Gráfico de la señal filtrada
figure('Name','Señal de Audio Filtrada','NumberTitle','off');
t = (1:length(audio_filtrado))/Fs;
plot(t, audio_filtrado);
title('Audio Filtrado (500 Hz - 5000 Hz)');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Amplitud');
grid on;

% 2. Gráfico de energía RMS con picos
figure('Name','Energía RMS y Picos','NumberTitle','off');
plot(timeEnergy, energy, 'b', 'LineWidth', 1.2); hold on;
ylines(threshold, 'r--', 'LineWidth', 1.5, 'Label','Umbral');
plot(timeEnergy(locs), peaks, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'g');
title('Energía RMS con detección de picos');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Energía RMS');
legend('Energía','Umbral','Cracks Detectados');
grid on;

% 3. Gráfico de barras de energía
figure('Name','Mapa de Energía','NumberTitle','off');
bar(timeEnergy, energy, 'FaceColor', [0.2 0.6 0.8]);
title('Mapa de Energía');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Energía RMS');
grid on;

% 4. Espectrograma (solo visualización)

```

```

figure('Name','Espectrograma del Audio','NumberTitle','off');
windowSpec = hamming(round(0.05*Fs)); % Ventana de 50 ms
overlap = round(0.025*Fs);          % 50% de solapamiento
nfft = 512;                          % Resolución
spectrogram(audio_filtrado, windowSpec, overlap, nfft, Fs, 'yaxis');
title('Espectrograma del Audio Filtrado');
colormap jet;
colorbar;

```

Anexo F. Código de Estadísticas

```
% Gráfico del primer y segundo crack
```

```
clc;
```

```
clear;
```

```
close all;
```

```
% Datos experimentales
```

```

datos_originales = [
    8.67  10.25  11.67  12.92
    8.25   9.42  10.75  12.42
    7.92   8.42  10.33  12.08
    8.67   9.92  11.33  13.08
    8.92  10.08  11.75  13.17
    8.83  10.33  12.25  13.75
    9.00  10.33  12.33  13.83
    8.58  10.08  12.42  13.25
    9.92  11.42  12.50  13.83
    9.08  10.58  11.58  13.00
];

```

```

inicio_cero = zeros(size(datos_originales,1),1);
datos = [inicio_cero datos_originales];
% Eje X
etapas = {
    'Inicio'
    'Inicio del primer crack'
    'Fin del primer crack'
    'Inicio del segundo crack'
    'Fin del segundo crack'
};
x = 1:length(etapas);
% Crear figura
figure('Color','w');
hold on;
grid on;
box on;
yLimits = [0 max(datos(:))*1.05];
colorCafe = [0.85 0.72 0.55];
% Zona sombreada: PRIMER CRACK (X = 2 a 3)
patch([2 3 3 2], ...
    [yLimits(1) yLimits(1) yLimits(2) yLimits(2)], ...
    colorCafe, ...
    'EdgeColor','none', ...
    'FaceAlpha',0.35,...
    'HandleVisibility','off');
% Zona sombreada: SEGUNDO CRACK (X = 4 a 5)
patch([4 5 5 4], ...

```

```

[yLimits(1) yLimits(1) yLimits(2) yLimits(2)], ...
colorCafe, ...
'EdgeColor','none', ...
'FaceAlpha',0.35,...
'HandleVisibility','off');

% Dibujar curvas
for i = 1:size(datos,1)
    plot(x, datos(i,:), '-o', 'LineWidth', 1.3);
end
set(gca, 'XTick', x, 'XTickLabel', etapas)
xlabel('Etapas del proceso de tueste')
ylabel('Tiempo (minutos)')
title('Evolución temporal - Primer y segundo crack')
% Ajuste del eje Y con intervalos de 0.5 minutos
ylim([0 ceil(max(datos(:)))])
yticks(0:0.5:ceil(max(datos(:))))
legend(arrayfun(@(n) sprintf('Prueba %d', n), 1:10, ...
    'UniformOutput', false), ...
    'Location','northwestoutside');

```