



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE COMALCALCO

Proyecto de Investigación

DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INGENIERÍA MECATRÓNICA

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE NARICES ELECTRONICAS PARA LA DETECCION DE LAS PARTICULAS SUSPENDIDAS EN EL PROCESO DE TOSTADO DE SEMILLAS DE CACAO CRIOLLO”

Presenta:

Ricardo Cordova Sanchez

Director del proyecto:

Ing. Rafael Valenzuela Rodríguez

Comalcalco, Tabasco a 20 de febrero de 2025





Contenido

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL PROYECTO	9
1.1. Antecedentes	10
1.2. Justificación	11
1.3. Planteamiento del problema	13
1.4. Objetivos	14
1.4.1. General	14
1.4.2. Específicos	14
1.5. Limitaciones de la investigación	15
CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO.....	16
2.1. Definición del proceso	17
2.1.1. Descripción general del proceso.....	17
2.2. Variables e instrumentos	18
2.2.1. Variable de proceso	18
2.2.2. Valores óptimos según la literatura.....	20
2.2.3. Valores adecuados a la zona.....	21
2.2.4. Sensores de Gas (Serie MQ).....	22
2.3. Condiciones de operación	23
2.4. Elección de materiales	24
2.5. Obtención de Muestras	33
CAPÍTULO 3: MARCO TEORICO.....	35





3.1. Procesos de transformación del cacao y subproductos	36
3.2. Proceso de Tostado	40
3.3. Parámetros de operación del proceso de tostado	42
3.3.1. Temperatura y Tiempo.....	42
3.3.2. Gases volátiles.....	43
3.4. Tipos de procesos de tostado	43
3.5. Principio de Funcionamiento de las Narices Electrónicas:	45
3.6. Mímesis de la organoléptica del cacao	46
CAPÍTULO 4: MARCO REFERENCIAL	47
4.1. Historia y relevancia del cacao criollo en México	48
4.2. El proceso de tostado del cacao	48
4.2.1. Parámetros del tostado.....	49
4.3. Sistemas de narices electrónicas en la industria alimentaria	49
4.4. Tecnologías aplicadas en el diseño del sistema	50
4.5. Impacto del proyecto en la industria cacaotera	50
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y PRUEBAS.....	52
5.1. Programación y Simulaciones	53
5.2. Diagrama de Flujo del Algoritmo	54
5.3. Descripción de las funciones.....	56
5.4. Pruebas de funcionamiento.....	57
5.5. Esquemas representativos del sistema.....	61
5.6. Resultados finales	62
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....	64





CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
Anexos	72





RESUMEN

Este proyecto se desarrolló desde una perspectiva de electrónica aplicada al Internet de las Cosas (IoT), integrando sensores ambientales y un microcontrolador ESP32 para monitorear condiciones del entorno durante el proceso de tostado de cacao. La teoría se basa en el principio de detección por óxidos metálicos semiconductores, donde la conductividad de sensores como los MQ-3, MQ-7 y MQ-135 varía con la presencia de gases específicos (alcohol, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, respectivamente). También se consideró la medición de temperatura y humedad relativa mediante el sensor digital DHT11.

El problema identificado es la falta de un monitoreo ambiental accesible durante el tostado, etapa crítica que influye en la calidad del cacao. Se requiere una herramienta de bajo costo que permita observar condiciones como temperatura, humedad y presencia de gases, para mejorar el control del proceso.

El objetivo principal fue diseñar y prototipar un sistema de medición ambiental con sensores electrónicos, utilizando la ESP32 programada en MicroPython y entornos de simulación gratuitos como Wokwi, Thonny, Proteus y LTspice para la detección de las partículas suspendidas en el proceso de tostado de semillas de cacao criollo para establecer parámetros ideales en el tostado del cacao.

La metodología consistió en: selección de sensores adecuados según tipo de gas y condiciones del entorno; diseño del sistema físico con la ESP32 como unidad de control; programación en MicroPython utilizando librerías nativas (machine, dht, time, etc.); simulación de circuitos en Wokwi y verificación analógica en LTspice y Proteus; y finalmente, pruebas de funcionamiento y calibración básica.





Finalmente se logró implementar un sistema funcional capaz de medir temperatura, humedad y gases relevantes, con costos accesibles y flexibilidad para futuras mejoras. La ESP32 demostró ser adecuada por su conectividad, múltiples ADC y compatibilidad con MicroPython. El proyecto sienta las bases para aplicaciones prácticas en el control de calidad del cacao y otros procesos industriales o agrícolas que dependan del monitoreo ambiental.





INTRODUCCIÓN

El cacao criollo, denominado así en la zona sur-sureste de México, es una variedad altamente valorada de *Theobroma cacao*, la cual es conocida por su perfil de sabor distintivo y sus cualidades sensoriales excepcionales. [1] La calidad del cacao criollo depende en gran medida de las condiciones ambientales en las cuales crecen las plantas de cacao, de las cuales destacan la humedad y las condiciones nutrimentales del suelo de las zonas de clima tropical, como lo es el clima cálido húmedo. Algunas de las propiedades que distinguen a las variedades del cacao criollo como el forastero, son el tamaño de las mazorcas, las cuales son grandes en comparación con otras variedades como el Forastero, el Criollo y el Trinitario. [2]. Otra de las cualidades a destacar de la variedad mencionada es que las mazorcas contienen un número de semillas superior al promedio, además de que dichas semillas contienen un alto porcentaje de grasa. [3] Es por dichas cualidades que los productos como el chocolate cobran trascendencia en estados como Tabasco y Chiapas, puesto que fueron una parte importante en la economía en décadas pasadas gracias a la fiebre del cacao y el plátano (fiebre del oro verde).

La forma en la que el cacao se ha procesado es de forma tradicional o artesanal, y es en estos términos que se ha logrado identificar un área de oportunidad mediante la tecnificación de los procesos de transformación, como el fermentado y el tostado de las semillas, pues en dichas etapas se dan los cambios físico-químicos más importantes de las semillas. Uno de los desafíos fundamentales en el tostado del cacao criollo radica en la volatilización de compuestos aromáticos, los cuales se presentan al elevar la temperatura de las semillas, en combinación con la evaporación de la humedad remanente de las mismas después del proceso de fermentado y secado [4].





El monitoreo de dichas partículas suspendidas el entorno de tostado puede tomarse como el punto de partida para la tecnificación de dicho proceso, y a través del monitoreo de su concentración pueden establecerse las condiciones de operación óptimas a las cuales la temperatura y los tiempos de proceso puedan producir cacao tostado de alta calidad. Otra de las ventajas del monitoreo de la concentración de dichas partículas, así como la temperatura y la humedad de las semillas durante el proceso, es la de poder establecer las condiciones a las cuales se den diferentes perfiles de tostado [5].

La tecnificación del proceso de tostado basado en el monitoreo de las partículas suspendidas provenientes de los volátiles del cacao, puede partir de la mimesis de la percepción olfativa, mediante sistemas conocidos como narices electrónicas, los cuales imitan la capacidad olfativa humana para detectar y distinguir olores y gases específicos. Estos sistemas ofrecen la capacidad de detectar y cuantificar partículas suspendidas en tiempo real, lo que permite una respuesta inmediata ante cualquier desviación en el proceso de tostado y la oportunidad de optimizar la calidad del cacao tostado [6].

El presente proyecto de investigación desarrollado durante residencias profesionales tuvo como objetivo principal el diseño y desarrollo de un sistema de narices electrónicas, específicamente adaptado para la detección de partículas suspendidas en el proceso de tostado de semillas de cacao criollo, para la automatización de sistemas de tostado [5]. Este enfoque innovador buscó abordar un desafío crítico en la producción de cacao de alta calidad y se considera que tiene el potencial de innovar en la forma que se monitorea y controla esta etapa esencial del proceso de transformación de las semillas de cacao.





CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL PROYECTO





1.1. Antecedentes

El cacao criollo (*Theobroma cacao*) es una variedad de cacao ampliamente reconocida y apreciada en la industria del chocolate por sus propiedades sensoriales únicas. Es reconocido por su complejo aroma, suavidad y delicioso sabor en comparación con otras variedades de cacao [15]. Estas características hacen del cacao criollo un ingrediente ideal para la producción de chocolate de alta calidad y deliciosos dulces, además que su grasa tiene amplias aplicaciones en la industria cosmética [16]. El proceso de tostado es un paso crítico en la producción de productos comestibles como el chocolate, ya que las temperaturas elevadas de dicho proceso propician el desarrollo del sabor y aroma característicos del cacao. Durante el proceso de tostado se producen reacciones químicas y físicas en los granos de cacao, que afectan directamente la calidad del producto final. La temperatura, el tiempo de tostado y otros factores son cruciales para lograr el perfil de sabor deseado [17], puesto que a bajas temperaturas no se podría eliminar la humedad remanente de las semillas, y a temperaturas extremadamente altas se podrían quemar las semillas. A pesar de su importancia, el proceso de tostado del cacao aún enfrenta importantes desafíos, uno de estos es la presencia de partículas suspendidas en el medio. La detección y el monitoreo precisos de dichas partículas en suspensión durante el proceso son esenciales para garantizar la calidad y consistencia del producto final, puesto que a través de la identificación y cuantificación inmediata de dichas partículas se pueden establecer condiciones de operación. Sin embargo, hasta la fecha no se han desarrollado sistemas específicos para abordar este problema, puesto que la instrumentación y automatización de las máquinas de tostado, en la mayoría de los casos, solo permiten establecer la temperatura y el tiempo de tostado, los cuales se basan en la experiencia de los operadores, [10] y en el monitoreo de forma sensorial con el cual se determina el grado de tostado de las semillas.





Algunas tecnologías desarrolladas para el monitoreo y detección de partículas suspendidas y expelidas en procesos similares se basan en el uso de sensores de gas, con los cuales se mide la concentración de partículas, compuestos o elementos específicos. [18] Una de estas tecnologías son las narices electrónicas, las cuales consisten en arreglos de sensores que imitan el sentido del olfato humano para detectar y distinguir olores y compuestos específicos. Se han utilizado ampliamente en la industria alimentaria para el control de calidad y la detección de sabores desagradables en alimentos y bebidas [19]. El uso de una nariz electrónica para detectar partículas en suspensión durante el tostado del cacao criollo es una innovación prometedora para resolver eficazmente este problema y mejorar la calidad del producto. Se entiende que entre mayor sea el número de variables que puedan describir de forma cuantitativa a las propiedades organolépticas del cacao, se podrá realizar una estandarización de sus procesos; por ejemplo, se podrían catalogar distintos grados de tostado, diferentes aromas, diferentes gustos del mismo, se podrían determinar y catalogar las diferentes especies en función de dichas propiedades, etc.

1.2. Justificación

Los métodos tradicionales de control de calidad en el tostado del cacao a menudo se basan en técnicas de muestreo y análisis fuera de línea, los cuales, al ser basados en la experiencia de los operarios, pueden generar inconsistencias en la calidad del mismo, debido a que la capacidad sensorial de las personas puede variar por distintos aspectos como la temperatura, la humedad, el estado de salud y el cansancio que suponen las jornadas de trabajo [5]. El cacao contiene varios compuestos volátiles que se liberan durante el proceso de tostado, los cuales contribuyen a las propiedades sensoriales únicas de subproductos como el chocolate [9].





El gas liberado por las semillas de cacao indica los cambios químicos en el grano, puesto que estos están estrechamente vinculados a la formación de compuestos de aroma y la calidad del producto final. El control preciso del proceso de tostado es esencial para garantizar la consistencia y calidad deseadas de los productos de cacao como el chocolate y otros derivados. El monitoreo de los volátiles del cacao en tiempo real puede proporcionar información valiosa sobre los perfiles sensoriales de las semillas y ayudar a optimizar la calidad del tostado de cacao. Se ha demostrado que la tecnificación y adaptación de nuevas tecnologías puede coadyuvar en la mejora de procesos realizados de forma artesanal [10], como lo es el caso abordado por este proyecto, el tostado de cacao.

Tomando en cuenta lo anterior, se propone el uso de sistemas que realicen la mimesis de los procesos olfativos de los operarios mediante arreglos de sensores de gas conocidos como narices electrónicas. Las narices electrónicas son arreglos de sensores que imitan la capacidad olfativa para detectar y distinguir olores o gases específicos [11]. Estos sistemas han demostrado mejorar la eficiencia en una variedad de aplicaciones industriales, incluidas las pruebas de calidad de alimentos y bebidas. [12] La implementación del sistema de nariz electrónica permitirá el monitoreo continuo en tiempo real de los gases liberados durante el proceso de tostado, lo que facilitará una respuesta rápida ante cualquier desviación en el proceso, establecer distintos perfiles de concentración de gases que describan el grado de tostado de las semillas, al ser sistemas tecnificados pueden permanecer en marcha por largas jornadas de trabajo, así como propiciar la uniformidad en las propiedades de las semillas al final del proceso.

Se considera que el desarrollo de proyectos como el presente, enfocados en la tecnificación de procesos, es un punto de partida para la solvencia de problemas de talla nacional como lo son la soberanía tecnológica, energética y alimenticia [13].





Al llevar dichas tecnologías a su aplicación en manos de los usuarios finales como lo son pequeños y medianos productores, se podrán estandarizar sus procesos, además de permitirles definir perfiles personalizados de sabor y aroma como parte del valor agregado de sus productos, la reducción de desechos y aumentar la competitividad de los mismos en los mercados globales.

1.3. Planteamiento del problema

El cacao criollo es reconocido por su calidad excepcional, sabor distintivo y aroma único. La elaboración de productos como la manteca de cacao y el chocolate de alta calidad dependen en gran medida de la precisión y el control de las etapas de procesamiento, siendo el proceso de tostado uno de los momentos críticos. Durante el tostado, las semillas de cacao experimentan, además de cambios como la extracción o remoción de humedad remanente, las transformaciones físico-químicas fundamentales que contribuyen significativamente al desarrollo de su perfil de sabor y aroma característico.

Uno de los problemas fundamentales de los procesos de transformación de las semillas de cacao reside en la tecnificación de los mismos, si bien, a la fecha se siguen prefiriendo los procesos artesanales, la operación de estos resulta en muchos casos poco controlada, pues se basa en la experiencia de los operadores [5]. El problema central radica en la poca uniformidad de las semillas al momento de ser tostadas, pues la producción de cacao tostado depende de las condiciones ambientales de temperatura y humedad, así como de la habilidad de los operadores para percibir los olores del cacao tostado, e identificar las tonalidades de las semillas tostadas. El poco o nulo monitoreo mediante instrumentos como sensores puede llevar a los siguientes problemas:

- Influencia en la Calidad del Producto: El no monitorear las partículas suspendidas puede afectar a la uniformidad del tostado, la formación de





sabores no deseados y la calidad sensorial del cacao tostado, lo que compromete la excelencia que se espera del cacao criollo [5].

- Falta de Instrumentación Específica: Hasta el momento, no se dispone de sistemas tecnológicos diseñados para la detección precisa y específica de estas partículas suspendidas en tiempo real durante el proceso de tostado.
- Limitaciones en el Control de Calidad: La ausencia de una herramienta de monitoreo adecuada dificulta el control de calidad y la toma de decisiones oportunas para corregir desviaciones en el proceso de tostado [6].

Por lo tanto, se encuentra un área de oportunidad para la atención de las deficiencias del proceso, para la cual se tienen como propuesta un sistema de narices electrónicas específicamente adaptado para la detección de partículas suspendidas en el proceso de tostado de semillas de cacao criollo, a partir del cual se puedan establecer condiciones de operación y automatización del proceso. Este sistema podría proporcionar una solución innovadora para abordar estos desafíos, mejorar la calidad del cacao tostado y asegurar la excelencia del cacao criollo en la industria del chocolate y productos relacionados.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Diseñar un sistema de narices electrónicas implementando sensores de gas tipo MQ en una tarjeta de desarrollo ESP32, programada mediante MicroPython, con el cual se realice el monitoreo de partículas suspendidas durante el proceso de tostado de semillas.

1.4.2. Específicos

- Realizar el diseño del dispositivo contemplando esquemas y diagramas de conexiones para su implementación en PCB.





- Realizar la programación y simulaciones del sistema de narices electrónicas utilizando el lenguaje MicroPython y entornos de desarrollo libres de licencia.
- Realizar pruebas de funcionamiento del dispositivo, así como adecuaciones necesarias para adaptar su aplicación en procesos de tostado de semillas.

1.5. Limitaciones de la investigación

El desarrollo del proyecto se limitó al prototipado y validación del funcionamiento de un sistema de mediciones de partículas suspendidas durante el proceso de tostado (narices electrónicas), con aplicaciones a los procesos que envuelven a la transformación del cacao en subproductos como el chocolate [14]. Como evidencia de los anteriores se realizó el diseño del sistema de mediciones, un prototipo funcional del mismo implementando sensores en una tarjeta de desarrollo ESP32, así como la programación del sistema para que realizara la adquisición y monitoreo de los datos.

1.6. Área de trabajo del estudiante

El presente proyecto fue desarrollado al interior de las instalaciones del instituto, específicamente en las inmediaciones de la unidad de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecatrónica. El presente trabajo forma parte de las líneas de desarrollo del proyecto (*“Implementación de Sistemas de Narices Electrónicas con Espectrometría en Luz Visible, para el Tostado de Cacao”*, con código de proyecto ITSC-LGAC-2021-COMA-IMTA-05-32), el cual pertenece a la línea de investigación *“Diseño de Aplicaciones en Electrónica”* con código LGAC-2021-COMA-IECA-IECA-05.





CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO





2.1. Definición del proceso

El proceso de diseño y desarrollo de narices electrónicas para la detección de partículas suspendidas en el tostado de semillas de cacao criollo es un viaje multidisciplinario que combina la ingeniería, la electrónica y la ciencia de los alimentos. Este proceso busca abordar la necesidad crítica de mejorar la calidad y la eficiencia en la producción de cacao tostado, una etapa vital en la creación de chocolate de alta calidad.

2.1.1. Descripción general del proceso

- **Fase de Planificación y Revisión de Literatura:**

El proceso comienza con una fase exhaustiva de planificación y revisión de la literatura. Se investigan y revisan detalladamente los avances en la detección de partículas suspendidas en procesos de tostado y las tecnologías existentes de narices electrónicas. Este paso es fundamental para comprender el estado del arte, identificar lagunas en la investigación y establecer una base sólida para el diseño propuesto.

- **Selección y Diseño de Sensores:**

Con la información recopilada, se procede a la selección y diseño de sensores específicos que puedan detectar las partículas suspendidas durante el tostado del cacao criollo. Esto puede incluir sensores de gases, partículas y otros dispositivos electrónicos avanzados. La elección de sensores es crucial para la precisión y sensibilidad del sistema de narices electrónicas.

- **Desarrollo del Hardware y Software:**

La fase de desarrollo implica la creación del hardware y software necesario para la operación efectiva de las narices electrónicas. El diseño de placas de circuito, la programación de microcontroladores y la integración de sensores son partes





esenciales de este proceso. Se busca lograr una sincronización precisa entre la captura de datos y su procesamiento para obtener resultados en tiempo real.

- **Pruebas y Ajustes:**

Una vez implementado el sistema, se procede a una fase intensiva de pruebas. Se simulan condiciones de tostado para evaluar la capacidad de las narices electrónicas para detectar partículas suspendidas de manera precisa y eficiente. Las pruebas se realizan iterativamente, y los resultados se utilizan para realizar ajustes en el diseño y la configuración.

- **Validación en Condiciones Reales de Tostado:**

La validación del sistema se lleva a cabo en condiciones reales de tostado de semillas de cacao criollo. Esto implica la integración de las narices electrónicas en un entorno de producción, donde se enfrentarán a las variables del proceso de tostado. Se monitorea su desempeño y se ajusta si es necesario para garantizar una detección precisa y fiable.

2.2. Variables e instrumentos

2.2.1. Variable de proceso

Variable Continua: Las variables continuas son aquellas que pueden tomar un rango infinito de valores dentro de un intervalo determinado. En este caso, la concentración de gases se mide en partes por millón (ppm) y puede fluctuar en función del proceso de tostado.

- **Concentración de Gases:** Medida en partes por millón (ppm), esta variable representa la cantidad de compuestos volátiles liberados durante el tostado del cacao criollo. Incluye gases como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), aldehídos y otros compuestos orgánicos.





Variables Independientes: *(Factores que afectan directamente la concentración de gases).* Las variables independientes son aquellas que el investigador puede modificar o controlar y que tienen un impacto directo sobre la variable dependiente. En el proceso de tostado del cacao, estos factores determinan la cantidad y tipo de compuestos volátiles emitidos.

- **Temperatura del Proceso:** La temperatura a la que se someten las semillas de cacao durante el tostado. Esta variable es clave porque influye en la cantidad y tipo de compuestos volátiles liberados.
- **Humedad del Cacao:** La cantidad de humedad en las semillas antes y durante el tostado, que puede modificar la velocidad de liberación de compuestos volátiles y afectar el aroma final.
- **Duración del Tostado:** El tiempo que las semillas permanecen en el proceso de tostado, determinando la intensidad de los compuestos aromáticos y la formación de partículas suspendidas.

Variables Moderadoras: *(Factores que pueden influir en la relación entre variables independientes y dependientes).* Las variables moderadoras son aquellas que, aunque no afectan directamente a la variable dependiente, pueden alterar la relación entre las variables independientes y dependientes, modificando los resultados obtenidos.

- **Condiciones Ambientales:** Factores externos como la temperatura y humedad del entorno, que pueden modificar la eficiencia del tostado y la dispersión de gases.
- **Características del Grano:** Tamaño, forma y contenido de grasa de las semillas de cacao, que pueden modificar la reacción térmica durante el proceso.





- **Estado de los Sensores:** Precisión y calibración de los sensores MQ utilizados en la detección de gases. Su sensibilidad puede afectar la medición de las concentraciones gaseosas.
- **Nivel de Contaminantes:** Presencia de partículas extrañas en el proceso, como residuos de combustión o impurezas, que pueden alterar las mediciones de gases volátiles.

2.2.2. Valores óptimos según la literatura

La determinación de valores óptimos para las variables en el proceso de tostado de semillas de cacao criollo puede depender de varios factores, incluyendo las preferencias de los productores, las características específicas del grano y las expectativas de calidad del producto final. Sin embargo, puedo ofrecerte algunos rangos generales basados en la literatura y prácticas comunes:

- **Concentración de Gases:** Varía según los compuestos específicos que se están monitoreando. Pueden existir concentraciones óptimas para compuestos individuales, como el ácido acético, el dióxido de carbono, entre otros.
- **Temperatura del Proceso:** Generalmente, la temperatura de tostado para el cacao criollo puede oscilar entre 120°C y 150°C. Este rango permite el desarrollo de sabores complejos sin llegar a la quema.
- **Humedad del Cacao:** Antes del tostado, la humedad del cacao suele oscilar entre 5% y 7%. Durante el tostado, se busca reducir la humedad a alrededor del 2-3%.
- **Duración del Tostado:** La duración del tostado puede variar entre 15 y 30 minutos, dependiendo de la temperatura y el perfil de sabor deseado.
- **Condiciones Ambientales:** Se prefieren condiciones ambientales estables. Se recomienda evitar cambios bruscos de temperatura y humedad.





- **Nivel de Contaminantes:** Se busca mantener los niveles de contaminantes, como residuos de combustión, lo más bajos posible.

Es importante señalar que estos son rangos generales y que los valores óptimos pueden variar según las condiciones específicas de la producción y las preferencias del productor.

2.2.3. Valores adecuados a la zona

Las condiciones óptimas para el tostado de semillas de cacao pueden variar según la región y las características específicas del grano. Para la zona de Comalcalco, Tabasco, México, que es conocida por su producción de cacao criollo, se pueden considerar las siguientes condiciones generales:

- **Temperatura y Humedad Ambiental:** Dada la ubicación tropical de Tabasco, con altas temperaturas y humedad durante gran parte del año, es importante ajustar el proceso de tostado para compensar estas condiciones. Se deben considerar temperaturas más bajas o ajustes en el tiempo de tostado para evitar un secado excesivo debido a la alta humedad ambiental.
- **Temperatura de Tostado:** Dada la alta temperatura ambiental, es posible que deba ajustarse el rango de temperatura de tostado. Se recomienda monitorear cuidadosamente la temperatura para evitar un tostado excesivo debido a las altas temperaturas ambientales.
- **Duración del Tostado:** La duración del tostado puede necesitar ajustes para adaptarse a las condiciones locales. Puede ser necesario reducir ligeramente el tiempo de tostado debido a las temperaturas más altas.
- **Humedad del Cacao:** Dado que Tabasco tiene una alta humedad ambiental, es esencial controlar y ajustar la humedad del cacao para evitar problemas de calidad y garantizar un tostado uniforme.





- **Monitoreo de Contaminantes:** Dada la posibilidad de altas temperaturas y humedad, es importante monitorear los niveles de contaminantes y ajustar los procesos de tostado según sea necesario.

2.2.4. Sensores de Gas (Serie MQ)

El censado de gases es una técnica utilizada en los sistemas de narices electrónicas para medir la concentración de compuestos volátiles en una muestra. Esta técnica puede implicar el uso de sensores electroquímicos, sensores de conductividad térmica o sensores de espectrometría de masas, entre otros. Por ejemplo, los sensores electroquímicos pueden medir la concentración de un compuesto volátil mediante la detección de cambios en la corriente eléctrica generada por una reacción química entre el compuesto y el electrodo del sensor. Los sensores de conductividad térmica, por otro lado, pueden medir la concentración de un compuesto volátil mediante la detección de cambios en la conductividad térmica de un gas portador cuando se expone al compuesto. Estos sensores pueden ser selectivos para un compuesto específico o pueden ser sensibles a una amplia gama de compuestos volátiles. La elección del sensor depende de los requisitos específicos del sistema de narices electrónicas y de los compuestos que se desean detectar.

A continuación, se presenta una tabla con algunos modelos comunes de sensores de gas MQ, junto con sus descripciones y los tipos de gases que son capaces de detectar:



Tabla 1. Descripción de los modelos de sensores MQ y los tipos de gases que detectan

Modelo	Descripción	Tipos de Gases Detectados
MQ-2	Sensor de gas inflamable, metano, propano, butano, alcohol, humo y gas natural.	Metano, Propano, Butano, Alcohol, Humo, Gas Natural
MQ-3	Sensor de gas inflamable, propano, butano, metano, alcohol, humo y gas natural.	Metano, Propano, Butano, Alcohol, Humo, Gas Natural
MQ-4	Sensor de metano, gas natural y propano.	Metano, Gas Natural, Propano
MQ-5	Sensor de gas inflamable, propano, butano, metano, gas natural, hidrógeno y humo.	Metano, Propano, Butano, Gas Natural, Hidrógeno, Humo
MQ-6	Sensor de gas inflamable, metano, propano, butano y gas natural.	Metano, Propano, Butano, Gas Natural
MQ-7	Sensor de monóxido de carbono y gas inflamable.	Monóxido de Carbono, Gas Inflamable
MQ-8	Sensor de gas hidrógeno y gas inflamable.	Hidrógeno, Gas Inflamable
MQ-9	Sensor de monóxido de carbono, gas inflamable y metano.	Monóxido de Carbono, Gas Inflamable, Metano
MQ-135	Sensor de amoníaco, benceno, alcohol, humo, CO2 y otros gases.	Amoníaco, Benceno, Alcohol, Humo, CO2, Otros Gases

Estos sensores MQ son ampliamente utilizados por su facilidad de uso y su capacidad para detectar una variedad de gases. Sin embargo, es importante tener en cuenta que algunos modelos son más específicos en sus detecciones, por lo que la elección del sensor dependerá de los gases particulares que se deseen monitorear en el proceso de tostado de semillas de cacao criollo.

2.3. Condiciones de operación

Asegurar condiciones de operación óptimas es esencial para la precisión y la fiabilidad de los sensores de gas MQ. Aquí se detallan las condiciones recomendadas para su correcto funcionamiento:



- **Temperatura:** Rango Óptimo: 20°C a 50°C. Evitar exposición a temperaturas extremas que puedan afectar la sensibilidad y la respuesta del sensor.
- **Humedad Relativa:** Rango Óptimo: 20% a 90% de humedad relativa. Evitar la exposición prolongada a ambientes extremadamente secos o húmedos.
- **Alimentación Eléctrica:** Voltaje: Seguir las especificaciones del fabricante (generalmente en el rango de 5V a 12V). Evitar fluctuaciones significativas en el suministro eléctrico que puedan afectar la estabilidad del sensor.
- **Tiempo de Calentamiento:** Permitir un tiempo de calentamiento inicial antes de la operación continua (generalmente 24 a 48 horas) para asegurar una lectura estable.
- **Condiciones de Almacenamiento:** Almacenar en un entorno seco y a temperatura ambiente cuando no estén en uso. Evitar la exposición directa a la luz solar o a fuentes de calor.
- **Calibración:** Realizar calibraciones periódicas según las recomendaciones del fabricante o según sea necesario en función de la aplicación y la precisión requerida.

Estas condiciones de operación proporcionan pautas generales para mantener un rendimiento óptimo de los sensores de gas MQ. Sin embargo, es crucial referirse a las especificaciones y recomendaciones del fabricante de cada sensor para garantizar un funcionamiento correcto en el contexto específico de la aplicación en el proceso de tostado de semillas de cacao criollo.

2.4. Elección de materiales

Tarjetas de desarrollo:

Para el diseño de un sistema de narices electrónicas, se pueden utilizar diferentes tipos de tarjetas de desarrollo y adquisición de datos, como Arduino, Raspberry Pi y BeagleBone. Estas tarjetas proporcionan una plataforma para la conexión de



sensores y la adquisición de datos. Por ejemplo, Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto que permite la creación de sistemas electrónicos interactivos. Raspberry Pi es una computadora de placa única que se puede utilizar para diversos proyectos, incluido el desarrollo de sistemas de detección. BeagleBone es otra plataforma de desarrollo de código abierto que ofrece capacidades de procesamiento y conectividad avanzadas. Estas tarjetas proporcionan una base sólida para el diseño y desarrollo de sistemas de narices electrónicas, ya que ofrecen una amplia gama de opciones y flexibilidad para la conexión de sensores y la adquisición de datos.

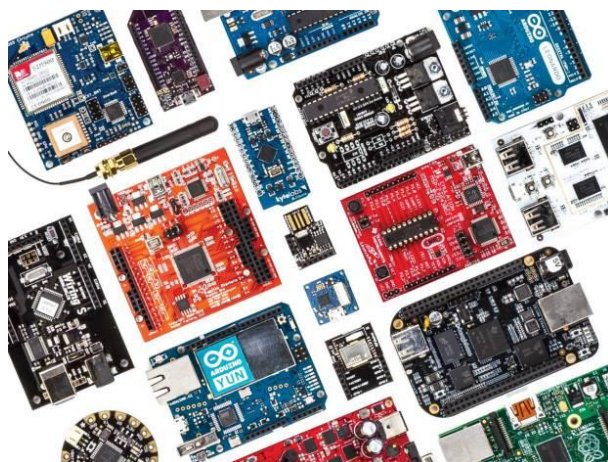


Figura 1. Tarjetas de desarrollo

Tarjeta (ESP32): El ESP32 es un SOC (System on Chip) basado en un MCU (Microcontrolador), es capaz de funcionar de forma fiable en entornos industriales, con una temperatura de funcionamiento que oscila entre -40°C y $+125^{\circ}\text{C}$. Alimentado por circuitos de calibración avanzados, el ESP32 puede eliminar dinámicamente imperfecciones de circuitos externos y adaptarse a cambios en las condiciones externas, contando con un consumo de energía ultrabajo para el funcionamiento necesario, sus principales usos son en dispositivos móviles, electrónica portátil y aplicaciones de IoT. Se eligió la ESP32 por su potencia y

versatilidad. Dispone de múltiple ADC de 12 bits, numerosos GPIO, Wi-Fi integrado y soporte de MicroPython. Su conectividad inalámbrica permite potencialmente transmitir datos, y su memoria/velocidad es suficiente para manejo de varios sensores. Además, la amplia adopción de ESP32 en educación y prototipado garantiza disponibilidad de información y recursos. El hardware se distribuye con la ESP32 en el centro, alimentada por USB/3.3 V, y los sensores conectados según esquema (VCC 5 V a los MQ, 3.3 V o 5 V al DHT11 con su pull-up interna). Se recomienda acoplar capacitores de desacoplo y, en caso de usar la salida analógica de 5 V con ADC de 3.3 V, usar atenuación o divisores apropiados.

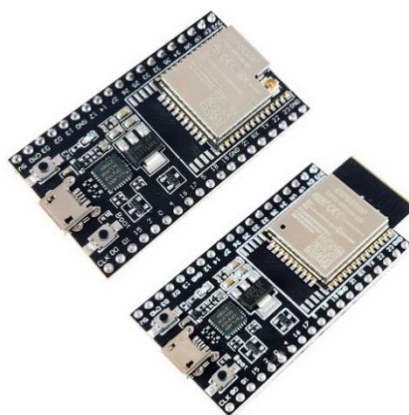


Figura 2. Tarjetas ESP32

Lenguaje de programación (MicroPython): Se incluye un subconjunto compacto de la biblioteca estándar de Python en la sencilla y eficaz implementación del lenguaje de programación Python 3 conocida como MicroPython, que está diseñada para ejecutarse en microcontroladores y en entornos restringidos.

Las funciones avanzadas de MicroPython incluyen un mensaje interactivo, números enteros de precisión arbitraria, cierres, listas por comprensión, generadores, manejo

de excepciones y más. Sin embargo, puede caber y funcionar con sólo 256 kilobytes de espacio de código y 16 kilobytes de RAM.

Para que sea lo más sencillo posible mover código desde el escritorio a un microcontrolador o sistema integrado, MicroPython pretende ser lo más compatible posible con Python estándar

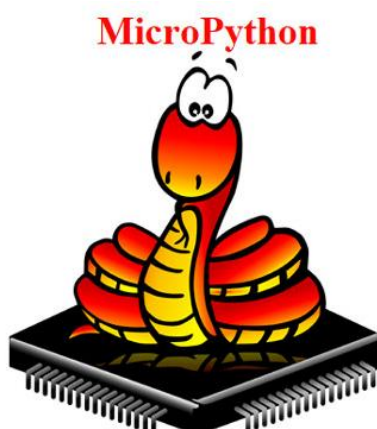


Figura 3. Lenguaje de programación MicroPython

Se programó la ESP32 en MicroPython, aprovechando la sintaxis intuitiva de Python para desarrollo rápido e interactivo. MicroPython permite utilizar código Python casi sin cambios, reduciendo la curva de aprendizaje frente al C/C++ tradicional, y ofrece REPL interactivo para probar comandos en tiempo real. Además, incluye módulos nativos para control de hardware.

Las librerías clave usadas fueron:

dht: para leer el sensor DHT11. Esta librería nativa de MicroPython proporciona la clase `dht.DHT11()`, que se instancia con el pin de datos (`dht.DHT11(machine.Pin(4))`). Luego se invoca `measure()`, `temperature()`, `humidity()` para obtener lecturas.



machine: ofrece clases de bajo nivel. En particular, *machine.Pin* configura los pines GPIO (entrada/salida), e ADC permite conversión analógico-digital.

ADC: la clase ADC de MicroPython se usa para leer los sensores MQ. Por ejemplo, *ADC(Pin(GPIO_num))* crea un objeto ADC ligado a un pin, y el método *read()* devuelve un valor proporcional al voltaje. El ADC de la ESP32 tiene resolución de hasta 12 bits (0–4095 sobre 0–3.3 V).

time: contiene funciones como *sleep()* para demorar la ejecución (simulando *delay*). Se utiliza para espaciar lecturas (1 lectura/s del DHT11) y tareas periódicas.

Pin: la clase *machine.Pin* se usa para configurar y manipular señales digitales. Por ejemplo, *Pin(pin_num, Pin.OUT)* establece un pin de salida, *Pin(pin_num, Pin.IN)* de entrada, etc. En MicroPython, Pin y sleep típicamente se importan juntos:

```
from machine import Pin, ADC
```

```
from time import sleep
```

(“Pin ayuda a direccionar pines GPIO y sleep a introducir pausas”).

Estas librerías preinstaladas permiten un control directo de hardware sin agregar dependencias externas. Por ejemplo, *dht* internamente maneja el protocolo de un solo cable del DHT11, abstraído para el desarrollador.

serial (de pyserial): Permite establecer comunicación serie entre la computadora y dispositivos como la ESP32. Se utilizó para recibir los datos enviados por la ESP32 a través del puerto COM. Esta librería es esencial para la captura de datos en tiempo real desde dispositivos externos, lo cual permite el registro y análisis posterior de los valores de los sensores.



Csv: Facilita la lectura y escritura de archivos en formato CSV (valores separados por comas). Se empleó para almacenar los datos leídos desde el puerto serial en un archivo .csv. Este formato es ampliamente compatible con herramientas de análisis de datos, como Excel, Google Sheets o Python (Pandas), por lo que resulta ideal para el almacenamiento estructurado de datos.

Datetime: Proporciona funciones para trabajar con fechas y horas. Aunque en el código actual no se utiliza directamente para registrar la hora de cada lectura, esta librería fue importada con la intención de ampliar el registro de datos en el futuro, incluyendo marcas de tiempo que permitan un análisis cronológico de las condiciones ambientales.

Sensores de Gas MQ: Los sensores MQ se conectan a la ESP32 a través de pines específicos. Cada sensor está diseñado para detectar diferentes tipos de gases y compuestos volátiles que podrían generarse durante el proceso de tostado. Los sensores están dispuestos de manera estratégica para captar la diversidad de gases emitidos.

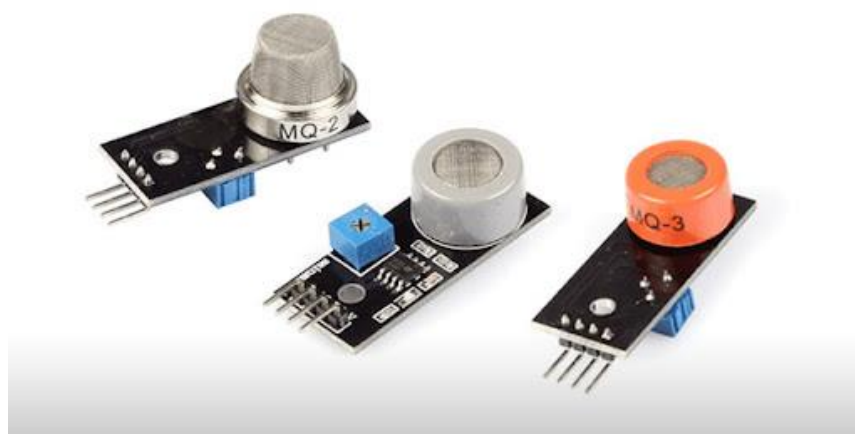


Figura 4. Sensores de gas serie MQ



Se eligieron los sensores MQ-3, MQ-7 y MQ-135 por su sensibilidad a gases típicos del proceso de tostado (alcoholes, monóxido de carbono, compuestos orgánicos). El sensor DHT11 mide temperatura y humedad ambiental. Cada módulo MQ lleva un material activo de SnO_2 cuya conductividad varía con el gas: el MQ-3 es sensible al alcohol (etanol), el MQ-7 al monóxido de carbono, y el MQ-135 a amoníaco, NO_x , alcoholes, benceno, humo, etc. El DHT11 incluye un termistor y circuito interno que entrega datos digitales seriados de temperatura (0–50 °C) y humedad (20–90 %RH).

Según las hojas de datos, los sensores MQ requieren típicamente 5.0 V de alimentación, mientras que el DHT11 opera entre 3.3 y 5.5 V. En las pruebas reales se midió que, bajo carga, cada sensor recibía aproximadamente 4.6–4.9 V (cercano a los 5 V nominales).



En esta tabla se observa que los sensores MQ requieren 5 V (se recomendó 5 V de fuente), aunque en la práctica la tensión medida fue 4.6–4.9 V por caídas internas.

Tabla 2. Descripción de los sensores seleccionados, especificaciones y características

Sensor	Compuesto detectado	Voltaje operación (datasheet)	Voltaje medido (prueba)	Señal de salida	Rango de medición	Resolución	Precisión aproximada
MQ-3	Alcohol (etanol)	5.0 V \pm 0.1	~4.6–4.9 V	Analógica (AOUT)	0.05–10 mg/L (~50–10000 ppm)	–	–
MQ-7	Monóxido de carbono (CO)	5.0 V \pm 0.1	~4.6–4.9 V	Analógica (AOUT)	20–2000 ppm	–	–
MQ-135	NH ₃ , NO _x , alcohol, benceno, humo, etc.	5.0 V	~4.6–4.9 V	Analógica (AOUT)	10–1000 ppm	–	–
DHT11	Temperatura / Humedad	3.3–5.5 V	~4.6–4.9 V	Digital	0–50 °C; 20–90 %RH	1 °C; 1 %RH	\pm 2 °C; \pm 5 %RH

En esta tabla se observa que los sensores MQ requieren 5 V (se recomendó 5 V de fuente), aunque en la práctica la tensión medida fue 4.6–4.9 V por caídas internas. Su salida analógica (AOUT) varía con la concentración del gas y suele conectarse a un ADC del microcontrolador. El DHT11, en cambio, comunica valores digitales mediante una interfaz de un solo cable con un pin de la ESP32. La resolución del DHT11 es de 1 °C y 1 % RH, mientras que los MQ no tienen resolución definida en hoja (depende de la conversión analógica-digital de la ESP32).



Entornos de desarrollo: Para el desarrollo se emplearon dos entornos complementarios: Wokwi (simulador online) y Thonny (IDE local).

Wokwi: Es un simulador web especializado en ESP32, Arduino, etc. Permite montar virtualmente la ESP32 junto con sensores, componentes y ejecutar el código sin hardware físico. Ofrece simulación de pines, consola y sensores compatibles. En este proyecto se usó Wokwi para probar esquemas y código iniciales: al modificarse el código en el navegador se inicia inmediatamente la simulación (un “prototipado rápido de IoT” como lo promociona la plataforma).

Thonny: Es un IDE multiplataforma para Python que soporta MicroPython. Es fácil de instalar en Windows/Linux/macOS y está incluso incluido en Raspbian. Thonny detecta la ESP32 conectada por USB y abre una consola REPL donde se puede interactuar en tiempo real con el microcontrolador. También facilita la carga de firmware: incluye una herramienta que «permite instalar rápidamente el firmware MicroPython en la placa», lo que agiliza el primer paso de flasheo. Una vez cargado MicroPython, Thonny permite escribir código en Python y enviar scripts a la ESP32 (por ejemplo, mediante la opción “Upload current script as main.py”), guardando main.py en la memoria de la tarjeta. La interfaz muestra en la parte inferior la consola serial, útil para ver los mensajes de debug y las lecturas de los sensores en tiempo real. En resumen, Thonny combina un editor de código, una consola de MicroPython y herramientas de gestión de dispositivos, simplificando el desarrollo sobre la ESP32.

Prototipado: Además de Wokwi, se emplearon simuladores de circuito para validar diseños eléctricos: Proteus y LTspice. Proteus Design Suite (de Labcenter) es un entorno muy usado en educación para simular placas de circuito impreso, microcontroladores y electrónica digital.





De hecho, “Proteus Design Suite se encuentra en colegios y universidades de todo el mundo, enseñando electrónica y diseño embebido”. Con Proteus se comprobó la lógica de conexionado y funcionamiento de los sensores conectados a un microcontrolador, incluso modelando señales analógicas y digitales a nivel de esquema.

Para la parte de circuitos analógicos (fuentes, divisores, filtrado) se empleó LTspice, un simulador SPICE gratuito de Analog Devices (“poderoso, rápido y gratuito”). LTspice permitió analizar la respuesta de filtros o reguladores de tensión asociados al suministro de 5V/3.3V. La combinación de Proteus (para simular el microcontrolador y sensores) y LTspice (para detalles analógicos) provee herramientas de bajo costo y gran flexibilidad, muy valoradas en entornos académicos. Así, el prototipado virtual complementó la validación de hardware antes de construir el circuito real.

2.5. Obtención de Muestras

La obtención de muestras de semillas de cacao en diferentes puntos de tostado es una fase crítica del proceso de investigación y desarrollo de la vibradora. Inicialmente, se estableció un protocolo detallado para la recolección de las muestras, definiendo los criterios específicos para determinar los diferentes grados de tostado. Esto incluyó la duración exacta de cada punto de tostado y la temperatura asociada.

Se coordinó con productores locales para realizar la recolección de las semillas en sus instalaciones. La elección de trabajar con productores locales garantizó la autenticidad de las muestras y una representación precisa de las condiciones reales de producción. Se estableció una colaboración estrecha con estos productores, explicándoles el propósito de la investigación y asegurándose de que el proceso de tostado se realizara de acuerdo con los estándares definidos.





Cada muestra se etiquetó cuidadosamente con información relevante, como el tiempo y la temperatura de tostado, el proveedor, y otros datos cruciales para su posterior análisis. La recolección se llevó a cabo en diferentes lotes para abarcar la variabilidad natural en el proceso de tostado. Se recolectaron muestras en diferentes momentos del año para considerar posibles variaciones estacionales en las características del cacao.

Durante la recolección, se prestó especial atención a la representatividad de las muestras, asegurándose de abarcar diversos rangos de tostado, desde tostados ligeros hasta intensos. La diversidad en las muestras era esencial para evaluar la capacidad de la vibradora para adaptarse a diferentes condiciones de tostado y producir resultados consistentes y de alta calidad.

Se emplearon técnicas analíticas avanzadas para evaluar los parámetros morfológicos y otras características clave de las semillas. La información recopilada incluyó la forma, el tamaño, la textura y otros indicadores relevantes del grado de tostado. Este análisis proporcionó datos fundamentales para la posterior correlación con los resultados obtenidos del dispositivo de vibración.

El análisis de las muestras no solo se centró en la fase morfológica, sino que también se extendió a evaluaciones sensoriales y pruebas de calidad. Estos aspectos adicionales ayudaron a comprender mejor la relación entre las características físicas de las semillas y sus atributos organolépticos, contribuyendo así a la validación integral del dispositivo.





CAPÍTULO 3: MARCO TEORICO





3.1. Procesos de transformación del cacao y subproductos

La industria de las almendras del Cacao, ha sido acogida por las diferentes organizaciones latinoamericanas enfocadas a mantener, transformar y comercializar su buena calidad. A la fecha, la estandarización de la operación de los procesos de transformación en función de las propiedades sensoriales de los subproductos del cacao es un campo abierto. Esto es debido a los cambios tecnológicos que se han desarrollado en los diferentes países y empresas son catalogados como confidenciales, sin embargo, existen rangos operativos comunes y básicos que han sido compartidos.[10] Actualmente existe una variedad de operaciones para la transformación del grano de cacao: nos encontramos con aquellas enfocadas para la confitería, la fabricación de chocolates y otros subproductos derivados del cacao, y aquellas destinados a fabricar materia prima para la industria alimentaria o farmacéutica [16].

A continuación, se describen algunas de las operaciones presentes en la mayoría de las industrias relacionadas con el cacao y su transformación:

Recolección y quiebre de las mazorcas: Desde la etapa de cosecha de las mazorcas cacao, se realiza una selección de las mismas en función de su color, tamaño y forma, despreciando aquellas que presenten deformidades y plaga. Aquellas almendras que han sido seleccionadas, dan previo paso a su almacenamiento, durante el cual se aplica tratamiento de fumigación, con la finalidad de garantizar inocuidad de las mazorcas y del ambiente de almacenamiento. [20]

Fermentado de la semilla: La fermentación es una operación clave para la calidad del cacao, sobre todo cuando este se destina a la elaboración de chocolate. La fermentación limpia las semillas, evita la germinación y mejora la presentación de las semillas.





Durante el fermentado, la acción combinada y balanceada de temperatura, alcoholes, ácidos, PH y humedad matan el embrión, disminuyen el sabor amargo ya que pierde theobromina y se producen ciertas reacciones bioquímicas que forman el chocolate. [21]

La fermentación debe realizarse en lugares bien ventilados. Si las semillas no fermentan o el fermentado se realiza mal o en forma deficiente, el resultado es un producto de baja calidad, conocido como “cacao corriente”.

El tiempo de fermentación no debe ser mayor de tres días para los cacaos criollos o de cotiledón blanco y no debe ser mayor de ocho días para los cacaos forasteros o de cotiledón morado o púrpura. Existen varios métodos para realizar la fermentación, siendo los más empleados la fermentación en montones, en sacos, en cajas, y el método Rohan. [22]

Secado de las semillas: El secado es una operación unitaria mediante la cual se extrae humedad de un objeto. Dependiendo del objeto a secar, esta operación puede hacerse de varias maneras: En el caso del cacao, el secado permite que las semillas pierdan el exceso de humedad. El cacao se seca con fines de comercialización y conservación. Cuando se va secar cacao fermentado, es importante reconocer que la fermentación continuará durante las etapas iniciales del secado. Durante este tiempo las semillas de cacao terminan los cambios para obtener el sabor y aroma a chocolate. También se producen cambios en el color, apareciendo el color típico marrón del cacao fermentado y secado correctamente. Durante el secado, lo ideal es reducir el contenido de humedad de las semillas desde el 55 % hasta un 6 u 8 %. [23]





Existen distintos métodos de secado. El más económico es el secado natural, que aprovecha el calor radiante de los rayos solares. Este secado produce mejor aroma, pero depende de las condiciones climatológicas. Si el cacao se moja con lluvia aparecerán hongos que anularán la calidad del producto.

Cuando la humedad se reduce demasiado rápido, la cáscara se vuelve excesivamente quebradiza, quedando los cotiledones aún húmedos lo que aumenta la susceptibilidad al ataque de hongos. Un secado lento, hace que las semillas permanezcan húmedas más tiempo y esto facilita la difusión de los ácidos orgánicos que eventualmente proporcionan las deseadas cualidades de sabor y aroma. [24]

Si lo que se desea es mejorar la calidad del aroma del producto, es fácil concluir que el mejor secador de cacao será el que mejor imite la acción del secado al sol. Sin embargo, la tecnología de las secadoras típicas no se ha dirigido hacia ese objetivo. Esta posibilidad es un horizonte para la investigación a futuro.

La alternativa de uso más frecuente en la temporada de lluvias para secar cacao utiliza secadoras mecánicas o estufas (secador Samoa) en las cuales se hace pasar una corriente de aire seco y caliente a través del cacao dispuesto sobre una plataforma o lecho. En estas secadoras el secado ocurre por la combinación de tres efectos o mecanismos.

1. Efecto Convectivo, es decir, transporte de humedad por el movimiento del aire.
2. Efecto Conductivo, o evaporación de la humedad de la semilla por calentamiento de la misma.
3. Efecto Radiante, o evaporación de la humedad por el calor radiante presente.

En una secadora Samoa típica no es fácil saber cuál de estos tres efectos predomina. El efecto radiante tiene influencia mínima y el predominio de cualquiera de los otros dos efectos depende de la combinación de tres parámetros críticos:





1. La temperatura del aire insuflado: A mayor temperatura mayor efecto conductivo
2. La rapidez con que el aire atraviesa el lecho de secado: a mayor rapidez, mayor efecto convectivo.
3. La altura o espesor del lecho de secado. Una altura menor favorece ambos efectos, pero, en general, significa que se está desperdiciando energía. [25]

Cuanto mayor es la temperatura del aire insuflado, tanto mayor será el efecto conductivo. De la misma manera, el efecto convectivo aumenta con la rapidez de tránsito del aire a través del lecho de secado. Finalmente, el espesor del lecho influye en la rapidez con que el aire lo atraviesa y también en el calentamiento del grano por conducción.

Otro factor, que generalmente no se toma en cuenta, es la cantidad de vapor de agua (humedad específica) presente en el aire insuflado. En general, el aire se toma directamente de la atmósfera y se mezcla con los productos de la combustión de gas LP para elevar su temperatura.

Las investigaciones previas prueban que, a temperatura constante, la eficacia del secado es notablemente mayor cuando la humedad específica del aire insuflado es menor. El contenido de humedad del aire atmosférico depende de las condiciones climatológicas. La práctica usual de calentar el aire se justifica porque, cuando se incrementa la temperatura del aire disminuye su humedad relativa. [25]

Tostado: El tostado es la operación esencial que dará origen al sabor y aroma inicial del chocolate. El tostado del cacao se lleva a cabo con el propósito de facilitar la eliminación de la cascarilla y para que los precursores del sabor (azúcares, aminoácidos, y otros que se forman durante la fermentación) se combinen y produzcan los olores y sensaciones típicas del sabor a chocolate y otras notas sensoriales como: sabor floral, frutal y nuez, dependiendo del tipo de cacao. [26]





Es importante garantizar que el producto se encuentre libre de contaminantes y para ello existen dos variantes fundamentales para la siguiente etapa; el primero consiste en el tostado a bajas temperaturas (de 25-50 minutos, variando su temperatura según las calidades, de 110 a 150°C) junto a su cáscara, para ser eliminada posteriormente.

Descascarillado: Una vez realizado el tostado de las semillas se permite el enfriamiento de los granos, cuyas cáscaras han comenzado a explotar por el efecto de la torrefacción (proceso de calentamiento), y se llevan a una máquina que remueve la cáscara de las mismas mediante vibración y flujo de aire. Dicho paso es recomendado si se desea procesar grandes volúmenes de cacao debido a su mayor rentabilidad. [27]

Molienda: El proceso de triturado y molienda, se realiza en un lapso de varias horas mediante una temperatura que consta entre los 60°C y 80°C. Del paso anterior, se obtiene el licor de cacao que se mezcla con manteca de cacao y otros elementos para producir el chocolate. La mezcla que se consigue, procede a ser refinada para lograr obtener una pasta suave que permite que mejore la textura del chocolate. Finalmente, cada empresa de la industria del cacao, dará su aporte único para comercializar su producto final y ser degustado en cada uno de nuestros hogares. [26]

3.2. Proceso de Tostado

El tostado de semillas de cacao es una fase fundamental en la fabricación de chocolate, ya que afecta la calidad y las características sensoriales del producto final. Durante este proceso, las semillas de cacao se someten a calor en un horno rotatorio o tostador, el calor desencadena una serie de reacciones químicas y cambios físicos en las semillas de cacao, que son esenciales para el desarrollo del sabor y aroma característicos del chocolate [28].





El tostado tiene varios objetivos clave:

Eliminación de la humedad: Se elimina la humedad remanente de los procesos de lavado y fermentado presente en las semillas, lo cual permite que las semillas puedan ser almacenadas, así como eliminar gustos ácidos provenientes del proceso de fermentación [21].

Desarrollo de Sabor y Aroma: El calor provoca reacciones de Maillard y caramelización que generan compuestos aromáticos y sabores característicos del chocolate. [28]

Reducción de Acidez: Se reduce la acidez inherente del cacao, lo que contribuye a un sabor más suave. [29]

Eliminación de Sabores Indeseados: Se eliminan sabores indeseados, como astringencia y amargura excesiva. [29]

La influencia de las altas temperaturas en los granos contribuye a múltiples cambios físicos y químicos, que alteran significativamente sus propiedades físicas químicas y organolépticas, por ejemplo, el color, composición nutricional y el sabor respectivamente. Las reacciones fisicoquímicas involucradas en el proceso de tostado producen los aromas característicos del cacao, la pérdida de agua (deshidratación), ácidos volátiles y taninos (precursores de la astringencia y el sabor amargo), así como la intensificación del color marrón del grano y la garantía de su inocuidad microbiológica. Dentro de las principales transformaciones fisicoquímicas durante el tostado (por método convencional o por vapor sobrecalentado) se encuentran: cambios en el contenido de agua y grasa, acidez total y volátil, cambios en las propiedades antioxidantes fenólica, cambios en la humedad, color y textura, cambio del contenido de aminos biogénicos, cambio en los flavonoles, proantocianidinas y actividad antioxidante, cambios en el perfil y los niveles de flavan-3-oles, antocianinas y flavonoides, cambios en los componentes activos de





azúcar, aminoácidos y sabor, cambios en la composición química, y finalmente, factores que afectan el color. [30]

El control preciso de la temperatura y el tiempo de tostado, así como la identificación de las reacciones químicas involucradas, son fundamentales para lograr el perfil de sabor y aroma deseado en el chocolate final. Esta etapa del procesamiento de cacao criollo se ha convertido en un campo de investigación y desarrollo en constante evolución para mejorar la calidad y la consistencia del chocolate. [31]

3.3. Parámetros de operación del proceso de tostado

3.3.1. Temperatura y Tiempo

A nivel industrial, los granos de cacao son sometidos a altas temperaturas, que oscilan entre 110 y 250 ° C, durante intervalos de tiempo que pueden variar desde 30 minutos hasta incluso 2 horas [10]. El realizar el proceso fuera de los rangos anteriores puede propiciar desde la volatilización total de los compuestos aromáticos del cacao, hasta la calcinación de las semillas. Artesanalmente, el proceso de tostado depende de la experiencia del operador, que se basa en la tradición transmitida generacionalmente y que se apoya en la detección empírica en cambios del olor, color y en los sonidos emitidos por el grano de cacao, entre otros aspectos [32].

Tabla 3. Rangos de temperatura y tiempo de acuerdo a la variedad del cacao.

Variedad	Rango de temperatura (°C)	Rango de tiempo (min)
Criollo	90-110°	20-25 min
Trinitario	100-120°	30-35 min
Forastero	115-140°	35-45 min





3.3.2. Gases volátiles

Anteriormente se menciona que la calidad del cacao, involucra también las características químicas de las almendras fermentadas y secas, en la tabla 2, se observa la composición química de semillas secas sin fermentadas. [24]

Tabla 4. Porcentaje de los componentes químicos de almendras secas sin fermentar.

<i>Componentes</i>	<i>Porcentaje</i>
Agua	3.65%
Nitrógeno total	2.28%
Proteínas	1.50%
Teobromina	1.71%
Cafeína	0.08%
Glucosa	0.30%
Taninos	7.54%
Mucílago	0.38%
Ácido acético libre	0.01%
Ácido oxálico	0.29%

3.4. Tipos de procesos de tostado

Existen distintos procesos de tostado tanto a nivel artesanal como industrial, estos difieren por su nivel de complejidad, el cual reside en el nivel de tecnificación de los equipos, así como en el monitoreo de parámetros como la temperatura, la humedad





y los gases volatilizados durante el proceso. Algunas de estos procesos tecnificados son el tostado en tambor, el tostado en lecho fluidizado y el tostado por radiación. Cada uno de estos tiene sus propias características y efectos en las propiedades organolépticas del cacao. Por ejemplo, el tostado en tambor es un proceso tradicional que implica el uso de un tambor giratorio para calentar las semillas de cacao, lo que resulta en un tostado uniforme, pero puede generar sabores más intensos, además que la exposición de las semillas a altas temperaturas y la eliminación excesiva de humedad propicia la fragilidad de las semillas. Por otro lado, el tostado en lecho fluidizado utiliza aire caliente para tostar las semillas de cacao, lo que permite un control más preciso de la temperatura y un tostado más suave. Finalmente, el tostado por radiación utiliza radiación infrarroja para calentar las semillas de cacao, lo que puede resultar en un tostado más rápido y uniforme. Estas diferencias en los procesos de tostado pueden afectar directamente las características sensoriales del cacao, como su aroma y sabor. [30]

En los últimos años, ha aumentado el interés por desarrollar tecnologías que se adapten a las condiciones de productores a pequeña y mediana escala, puesto que estos no cuentan con los recursos económicos para adquirir como los que se tienen a nivel industrial. La aparición de sistemas electrónicos cada vez más asequibles abre una ventana en la tecnificación de procesos para lograr mejoras en la eficiencia y estandarización de los mismos. Una de estas es el diseño de sistemas de narices electrónicas para la detección de partículas en suspensión en el proceso de tostado de granos de cacao Criollo. [14] El diseño de un sistema de nariz electrónica para este fin implica la integración de varias técnicas artesanales. En primer lugar, es necesario conocer a fondo el proceso de tostado y su impacto en los granos de cacao. Este conocimiento puede obtenerse mediante una investigación exhaustiva y la colaboración con expertos en la materia.





Además, la experiencia en tecnología de sensores es esencial para seleccionar y desarrollar sensores que puedan detectar y cuantificar con precisión las partículas en suspensión.

3.5. Principio de Funcionamiento de las Narices Electrónicas:

Las narices electrónicas son herramientas de detección que imitan la capacidad olfativa humana para detectar y distinguir olores y compuestos específicos. Estos sistemas se basan en sensores químicos y electrónicos que responden a diferentes compuestos volátiles en el aire y generan patrones de respuesta que pueden ser analizados para identificar y cuantificar sustancias odoríferas. [11].

Las narices electrónicas constan de una serie de sensores químicos diseñados para interactuar con los compuestos químicos presentes en el aire o el gas que se está analizando. Estos sensores generan una respuesta electrónica basada en las interacciones químicas, como adsorción, reacciones químicas o cambios en la conductividad eléctrica, cuando están expuestos a diferentes moléculas odoríferas. Los patrones de respuesta de estos sensores se utilizan luego para identificar y cuantificar los olores o compuestos presentes. [33]

En el contexto de la investigación sobre cacao criollo y el proceso de tostado, las narices electrónicas pueden ser una herramienta valiosa para detectar y cuantificar compuestos volátiles específicos relacionados con la calidad del cacao tostado. Esto podría incluir la identificación de compuestos que contribuyen a los perfiles de sabor y aroma deseables o la detección de compuestos no deseados que pueden afectar negativamente la calidad del producto.





3.6. Mímesis de la organoléptica del cacao

Un punto dominante en la clasificación del cacao de exportación se basa en las características organolépticas (sabor y aroma), tales como el amargor y la astringencia, que están intrínsecas en las semillas de cacao, requisito fundamental para la elaboración de chocolates finos. Para el fabricante, la evaluación sensorial es la única prueba confiable para determinar si puede utilizar determinado cacao para sus productos. La evaluación sensorial permite medir, analizar e interpretar reacciones de las características de los alimentos, los cuales son percibidos por los sentidos de la vista, olfato y gusto es decir sabor y aroma [34].

Numerosas investigaciones han determinado la importancia de los compuestos involucrados en la formación del aroma del cacao y por ende el Desarrollo de los precursores del sabor a chocolate. En ese sentido; los compuestos volátiles como las pirazinas y los aldehídos representan un sabor básico, los esterres que originan un sabor a fruta. Así mismo el grado de astringencia del chocolate, está determinado por los compuestos polifenólicos y el amargor por las purinas (cafeína y teobromina), el complejo polipéptidosfenoles y pirazinas, intervienen en el sabor a dulce y nuez.[20]





CAPÍTULO 4: MARCO REFERENCIAL





4.1. Historia y relevancia del cacao criollo en México

El cacao criollo (*Theobroma cacao*) es una de las variedades más apreciadas a nivel mundial debido a su calidad sensorial y su perfil distintivo en sabor y aroma. Su cultivo en la región sur-sureste de México, especialmente en los estados de Tabasco y Chiapas, tiene una gran relevancia económica e histórica. Desde la época prehispánica, el cacao ha jugado un papel crucial en la cultura mesoamericana, utilizado tanto como moneda de intercambio como en la preparación de bebidas ceremoniales.

El cacao criollo se distingue por su menor contenido de taninos y mayor proporción de manteca de cacao, lo que le otorga una textura más suave y un sabor más complejo en comparación con otras variedades como el forastero y el trinitario. Sin embargo, a pesar de su alta calidad, su producción es limitada debido a su menor resistencia a enfermedades y menor rendimiento en comparación con otras variedades híbridas. Esto hace que la optimización de su procesamiento sea fundamental para garantizar su competitividad en el mercado global.

4.2. El proceso de tostado del cacao

El tostado del cacao es una de las etapas más críticas en la transformación de las semillas en chocolate y otros productos derivados. Este proceso permite el desarrollo de compuestos aromáticos y de sabor que definen las características organolépticas del cacao. A nivel químico, el tostado activa una serie de reacciones, entre ellas la reacción de Maillard y la degradación térmica de precursores de aroma, lo que resulta en la formación de compuestos volátiles clave para la percepción sensorial del chocolate.





4.2.1. Parámetros del tostado

El proceso de tostado varía según el tipo de cacao y el perfil de sabor deseado. En general, se manejan temperaturas entre 90°C y 150°C, con tiempos de tostado que oscilan entre 20 y 45 minutos. Para el cacao criollo, se prefiere un tostado más suave para preservar sus notas florales y frutales. Un tostado excesivo puede generar sabores amargos y ahumados no deseados, comprometiendo la calidad del producto final.

Existen diferentes métodos de tostado, desde los tradicionales, que dependen de la experiencia del operador, hasta sistemas industrializados que utilizan tecnología avanzada para el control de variables como temperatura, humedad y tiempo. La falta de un monitoreo preciso de los gases y partículas emitidas durante el tostado puede afectar negativamente la calidad del cacao, generando inconsistencias en el perfil de sabor y aroma.

4.3. Sistemas de narices electrónicas en la industria alimentaria

Las narices electrónicas son dispositivos diseñados para imitar el sentido del olfato humano mediante la detección y análisis de compuestos volátiles en el aire. Estas tecnologías han demostrado ser altamente eficaces en la industria alimentaria para evaluar la calidad, frescura y autenticidad de productos como vinos, cafés y aceites esenciales.

En el caso del cacao, la implementación de narices electrónicas permite monitorear en tiempo real los compuestos volátiles generados durante el proceso de tostado, facilitando la estandarización de perfiles de aroma y evitando la sobre o sub-tostación. Estos sistemas están conformados por una serie de sensores químicos capaces de detectar gases específicos y convertir esta información en datos cuantificables mediante algoritmos de análisis.





El uso de narices electrónicas en la industria del cacao representa una herramienta innovadora para optimizar la calidad del producto final y mejorar la eficiencia en los procesos productivos. Su integración con sistemas de control automatizados puede proporcionar ventajas competitivas significativas, permitiendo ajustes en tiempo real basados en datos objetivos y reduciendo la variabilidad en la calidad del cacao tostado.

4.4. Tecnologías aplicadas en el diseño del sistema

El sistema de narices electrónicas propuesto en esta investigación se basa en la utilización de la **tarjeta ESP32 programada con MicroPython**, una plataforma de desarrollo ampliamente utilizada en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) debido a su bajo consumo energético y capacidad de procesamiento.

4.5. Impacto del proyecto en la industria cacaotera

La implementación de un sistema de monitoreo automatizado basado en narices electrónicas tiene múltiples beneficios para la industria cacaotera de Comalcalco, Tabasco:

1. **Mejora del control de calidad:** La detección en tiempo real de compuestos volátiles permite asegurar la homogeneidad en el tostado y evitar desviaciones en el perfil de sabor.
2. **Reducción de desperdicios:** Un monitoreo preciso ayuda a minimizar pérdidas de materia prima por tostados inadecuados.
3. **Mayor competitividad:** La tecnificación del proceso de tostado permite ofrecer un producto estandarizado y de alta calidad en mercados especializados.
4. **Facilitación de la trazabilidad:** La recopilación y almacenamiento de datos permite documentar cada lote de cacao tostado, garantizando su trazabilidad en la cadena de suministro.





5. **Optimización de recursos energéticos:** La detección temprana de irregularidades en el proceso de tostado contribuye a un uso más eficiente de energía y reduce costos operativos.





CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y PRUEBAS





5.1. Programación y Simulaciones

Durante el desarrollo del proyecto, se utilizó la plataforma Wokwi como entorno de desarrollo y simulación de sistemas embebidos, microcontroladores y sensores. Esta herramienta permitió programar y emular de forma precisa el comportamiento de la tarjeta ESP32, los sensores de gas MQ (MQ-3, MQ-7, MQ-135) y el sensor de humedad y temperatura DHT11, facilitando el diseño, pruebas y validación del código antes de su prototipado.

Esquema en Wokwi

El esquema de simulación consistió en los siguientes elementos:

- ESP32 DevKit v1: Microcontrolador o placa base del sistema.
- Sensor MQ-3: Conectado al pin GPIO 39 (AOUT, salida analógica), utilizado para detectar vapores de alcohol.
- Sensor MQ-7: Conectado al pin GPIO 34 (AOUT, salida analógica), utilizado para medir monóxido de carbono.
- Sensor MQ-135: Conectado al pin GPIO 2 (AOUT, salida analógica), diseñado para medir compuestos orgánicos volátiles y gases contaminantes.
- Sensor DHT11: Conectado al pin GPIO 23 (entrada y salida digital), empleado para medir temperatura y humedad relativa.

Cada uno de los sensores fue conectado a los pines apropiados de la ESP32, utilizando alimentación de 5VDC para los sensores MQ y 3.3VDC para el DHT11.





Resultados de simulación

De las simulaciones del sistema de narices electrónicas en el entorno Wokwi se obtuvieron los siguientes resultados:

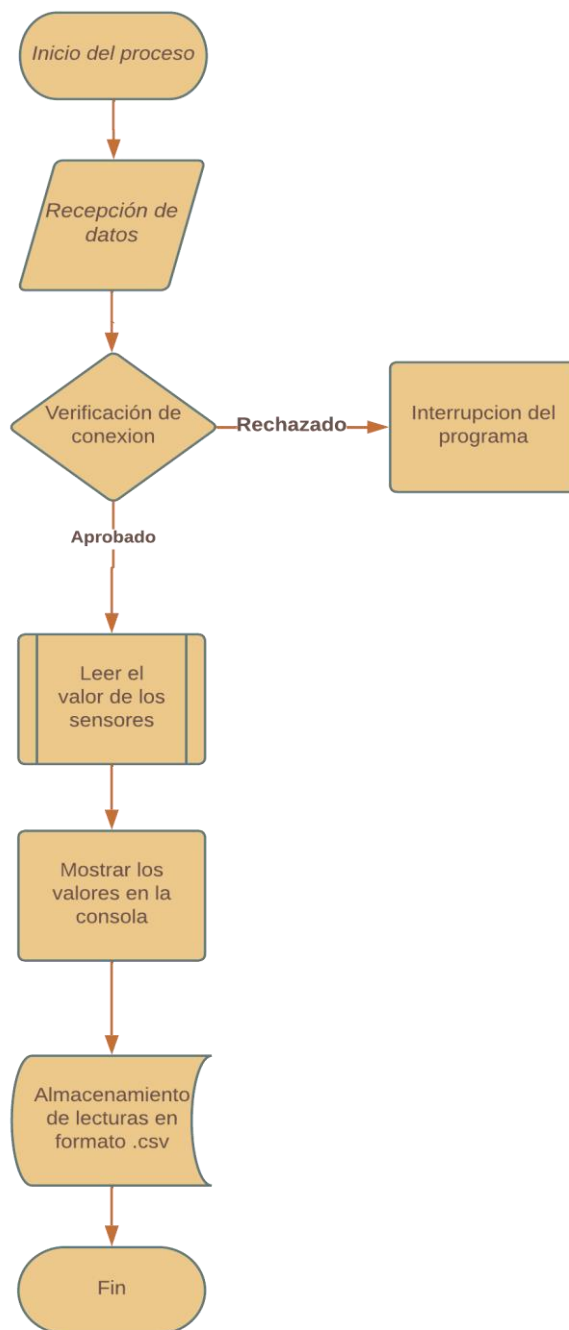
- El programa se ejecutó correctamente en MicroPython como “main.py”, iniciando automáticamente la lectura de sensores.
- Se obtuvieron valores variables de salida analógica en los sensores MQ, simulando condiciones reales del ambiente.
- El sensor DHT11 respondió con datos de temperatura (~ 25 °C) y humedad (~ 40–50 %), los cuales fueron simulados manualmente.
- La lectura y procesamiento de los valores fue estable durante ciclos continuos, y los datos fueron correctamente mostrados como salidas por consola, además de ser almacenados en un archivo de formato CSV.
- El comportamiento del sistema se ajustó a los requerimientos, validando la lógica del algoritmo y la distribución de pines sin errores de compilación ni conflictos eléctricos simulados.

5.2. Diagrama de Flujo del Algoritmo

A continuación, se describe el flujo lógico del programa desarrollado en MicroPython para la lectura de sensores y salida por consola:



Diagrama de flujo





5.3. Descripción de las funciones

Funciones utilizadas en el algoritmo

A. Código en MicroPython para la ESP32 (ejecutado como main.py en Thonny)

Este programa se carga en la tarjeta ESP32 y se ejecuta automáticamente al iniciarse. Su propósito es realizar la lectura de sensores ambientales y de gases en tiempo real.

1. **configurar_sensor(pin)**: Inicializa un sensor MQ conectado a un pin analógico de la ESP32.

pin: Número de pin GPIO al que está conectado el sensor.

2. **leer_sensor(sensor)**: Lee el valor de un sensor MQ y lo convierte en un porcentaje.

sensor: Objeto ADC previamente configurado.

3. **leer_dht11()**: Lee los valores de temperatura y humedad del sensor DHT11. En caso de error, devuelve **None**, **None**.

4. Bucle principal (**while True**): Ejecuta de manera continua la lectura de sensores y muestra los resultados por consola.

B. Código en Python para PC (ejecutado en VS Code)

Este programa se ejecuta en una computadora conectada por puerto serial a la ESP32. Su objetivo es capturar los datos enviados por la placa y almacenarlos en un archivo .csv.





1. `serial.Serial (PUERTO, BAUDIOS, timeout=1)` : Abre la conexión serial con la ESP32.
2. `ser.readline().decode('utf-8').strip()` : Lee una línea completa desde el puerto serial.
3. `writer.writerow(datos)` : Escribe una fila en el archivo .csv.
4. Mecanismo de encabezado: Guarda una sola vez los nombres de las columnas, como encabezado del CSV.
5. Manejo de interrupción (`KeyboardInterrupt`) : Permite detener el programa con Ctrl+C y cerrar el puerto serial correctamente.

5.4. Pruebas de funcionamiento

Ejecución del código en ESP32 (MicroPython)

Para validar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo, se cargó el archivo main.py en la tarjeta ESP32 utilizando el entorno de desarrollo Thonny, el cual permite la carga del firmware de MicroPython y la ejecución automática del programa al energizar la placa.

Una vez iniciado el sistema:

- Se observaron lecturas periódicas de los sensores MQ-3, MQ-7 y MQ-135, cuyos valores se convirtieron a porcentajes mediante una regla de tres basadas en la lectura ADC de 12 bits (rango de 0 a 4095).
- El sensor DHT11 entregó valores válidos de temperatura (en grados Celsius) y humedad relativa (en porcentaje).





Los datos se imprimieron en la consola serie de forma organizada en formato CSV, con el siguiente orden:

```
MQ3 (%),MQ7 (%),MQ135 (%),Temperatura (°C),Humedad (%)
1.12,0.43,0.30,27,28
1.12,0.44,0.30,27,28
1.12,0.43,0.30,27,28
1.12,0.44,0.30,27,28
1.12,0.43,0.30,27,28
1.12,0.44,0.30,27,28
1.12,0.43,0.30,27,28
1.12,0.44,0.30,27,28
1.13,0.43,0.30,27,28
1.12,0.43,0.30,27,28
1.13,0.43,0.30,27,28
1.11,0.43,0.30,27,28
1.11,0.43,0.30,27,28
1.11,0.43,0.30,27,28
```

Figura 5. Lectura de sensores en la consola de Thonny

En caso de falla en la lectura de algún sensor (por ejemplo, desconexión o mal contacto), el sistema imprimía "NA" en la columna correspondiente, lo que permite una detección robusta de errores sin interrumpir el resto del sistema.

```
MQ3 (%),MQ7 (%),MQ135 (%),Temperatura (°C),Humedad (%)
1.16,0.50,0.36,NA,NA
1.17,0.50,0.36,NA,NA
1.20,0.54,0.42,NA,NA
1.16,0.49,0.39,NA,NA
1.23,0.57,0.47,28,45
NA,NA,0.32,28,45
NA,NA,0.31,28,45
NA,NA,0.31,28,45
NA,NA,0.29,28,44
NA,NA,0.26,28,41
0.02,1.26,0.33,28,38
NA,0.66,0.35,28,35
NA,0.88,0.34,28,33
```

Figura 6. Ejemplo de una falla en la lectura





Almacenamiento de datos en archivo de extensión “.csv”

En paralelo, se ejecutó un segundo script en Python desde Visual Studio Code, con el objetivo de capturar los datos enviados por la ESP32 a través del puerto serial USB y almacenarlos de manera estructurada

Funcionamiento del proceso de captura:

1. El script detecta la conexión en el puerto especificado (por ejemplo, COM4 en Windows).
2. Escucha continuamente la salida serial enviada por la ESP32.
3. La primera línea con encabezados (si contiene “MQ3”) es reconocida y escrita como encabezado del archivo .csv.
4. Cada línea siguiente se almacena como una fila de datos reales, incluyendo los valores de los cuatro sensores.

El archivo resultante se guarda con el nombre datos_sensores.csv, listo para abrirse con Excel, Google Sheets o herramientas de análisis como Python/Pandas.

```
MQ3 (%),MQ7 (%),MQ135 (%),Temperatura (°C),Humedad (%)
1.17,1.36,0.35,28,33
1.17,1.31,0.35,28,35
1.19,1.38,0.35,28,35
1.19,1.40,0.34,28,34
1.20,1.33,0.35,28,33
1.19,1.22,0.35,28,31
1.19,1.35,0.35,28,30
1.19,1.38,0.35,28,30
1.20,1.26,0.35,28,29
1.20,1.29,0.35,28,29
1.19,1.27,0.35,28,29
1.19,1.36,0.34,28,28
1.20,1.38,0.35,28,28
✓ Lectura detenida por el usuario.
```





Figura 7. Lectura de sensores en la consola de VS Code

MQ3 (%)	MQ7 (%)	MQ135 (%)	Temperatura	Humedad (%)
1.17	1.36	0.35	28	33
1.17	1.31	0.35	28	35
1.19	1.38	0.35	28	35
1.19	1.4	0.34	28	34
1.2	1.33	0.35	28	33
1.19	1.22	0.35	28	31
1.19	1.35	0.35	28	30
1.19	1.38	0.35	28	30
1.2	1.26	0.35	28	29
1.2	1.29	0.35	28	29
1.19	1.27	0.35	28	29
1.19	1.36	0.34	28	28
1.2	1.38	0.35	28	28

Figura 8. Datos guardados archivo de extensión “.csv”

Ventajas del enfoque:

- Permite un registro cronológico estructurado para análisis posterior.
- El uso de un formato universal como “.csv” garantiza compatibilidad con múltiples plataformas de análisis de datos como Excel, Pandas, SQL, etc.
- El proceso de mediciones puede ser detenido en cualquier momento por el usuario mediante el comando (Ctrl + C), y el archivo se cierra de forma segura.



5.5. Esquemas representativos del sistema

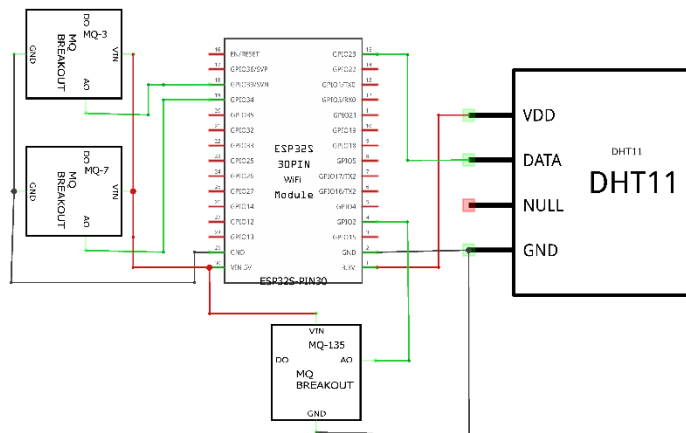


Figura 9. Diagrama del circuito en Proteus

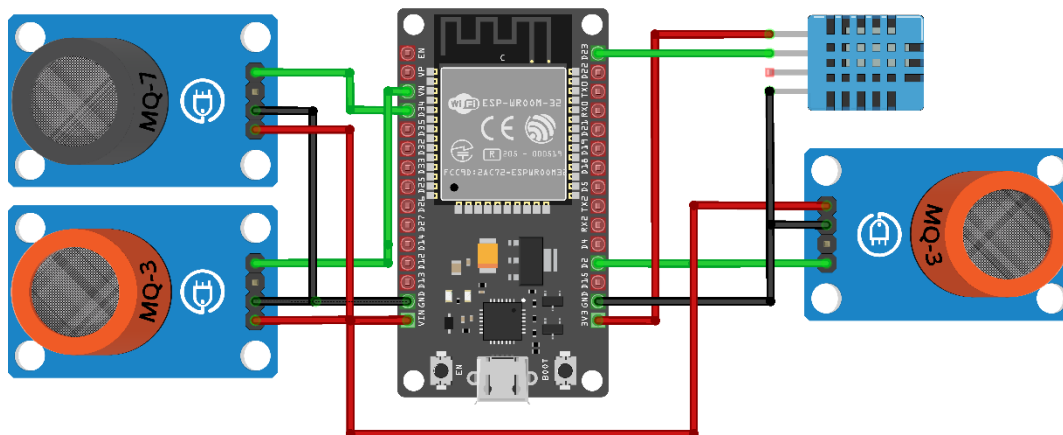


Figura 10. Esquema representativo en Wokwi

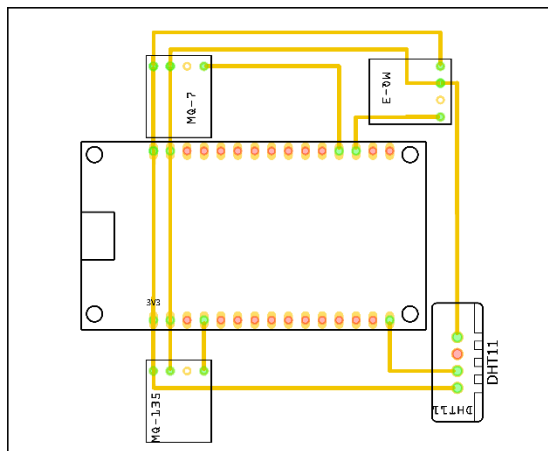


Figura 11. Diseño de impresión de PCB

5.6. Resultados finales

Para el proyecto “Diseño de un Sistema de Narices Electrónicas para la Detección de las Partículas Suspensas en el Proceso de Tostado de Semillas de Cacao Criollo” se obtuvieron los siguientes resultados a nivel de prototipo:

1. Algoritmos para el funcionamiento del sistema de mediciones: Algoritmo funcional programado en lenguaje MicroPython. Se realizó el respaldo del mismo en un repositorio de GitHub (https://github.com/Ricardocor67/Proyecto_Narices.git).
2. Prototipo: Se realizó un prototipo preliminar del dispositivo, el cual consta de la placa de desarrollo ESP32, con sus periféricos y sus respectivas conexiones en una PCB. En cuanto a los periféricos se cuenta con sensores de la serie MQ para comprobar los accionamientos del mismo. Se incluyó un enlace local wifi que se visualiza los porcentajes del gas medido, además de indicar y visualizar los resultados del análisis de manera clara y comprensible.
4. Se elaboraron diagramas representativos en un software para el diseño y simulación de circuitos (PROTEUS y Fritzing), en los cuales se visualizan los



diagramas de circuitos, así como conexiones detalladas y sus respectivas PCB para el montaje del sistema.





CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que la implementación de un sistema de narices electrónicas permite un monitoreo más preciso de los compuestos volátiles emitidos durante el proceso de tostado de cacao criollo. Comparando estos hallazgos con estudios previos realizados por autores como Pérez et al. (2018) y Ramírez y Colmenares (2020), se observa que el uso de sensores de gases no solo facilita la detección temprana de cambios en la composición química del cacao, sino que también mejora la repetibilidad en el control de calidad.

En estudios anteriores, se ha demostrado que el tostado tradicional basado en la experiencia del operador tiene una variabilidad significativa en términos de temperatura y tiempo de exposición, lo que impacta la uniformidad del producto final. Por el contrario, la aplicación de sensores en este estudio permitió detectar patrones específicos en la evolución de compuestos volátiles, lo que llevó a un ajuste más preciso de los parámetros de tostado.

Además, la integración del sistema ESP32 con sensores MQ proporcionó una plataforma accesible y escalable para su implementación en entornos productivos reales. Esto contrasta con investigaciones como la de Fernández et al. (2019), donde se emplearon sistemas más costosos y menos accesibles para pequeños productores de cacao.

En términos de impacto en la industria cacaotera, este sistema ofrece una alternativa viable para mejorar la competitividad de los productores locales, ya que permite establecer perfiles de tostado personalizados sin necesidad de equipos industriales de alto costo. Asimismo, la estandarización del proceso ayuda a reducir la variabilidad y mejora la trazabilidad del producto, alineándose con tendencias de mercado que priorizan la calidad y autenticidad del cacao.





CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

En conclusión, el proyecto ha representado un esfuerzo significativo en la integración de tecnologías avanzadas para mejorar la calidad y eficiencia en la producción de cacao. A través del diseño e implementación de un dispositivo vibrador con capacidades de detección morfológica, se ha logrado un enfoque innovador para evaluar el grado de tostado de las semillas de cacao, un factor crítico en la calidad del producto final.

El diseño y desarrollo del prototipo ha enfrentado diversos desafíos técnicos y logísticos, desde la selección de materiales adecuados hasta la integración de componentes electrónicos y software personalizado. Sin embargo, mediante un enfoque metodológico y colaborativo, se han superado estos obstáculos para crear un dispositivo funcional y confiable que cumple con los requisitos del proyecto.

Es importante destacar que este proyecto no solo ha generado resultados tangibles en términos de un prototipo operativo, sino que también ha sentado las bases para investigaciones y desarrollos futuros en el ámbito de la tecnología aplicada a la industria del cacao. Las lecciones aprendidas y las experiencias adquiridas durante la ejecución de este proyecto servirán como referencia y guía para futuras iniciativas y mejoras en el sector.

En términos de impacto socioeconómico, la implementación de este tipo de tecnologías innovadoras tiene el potencial de impulsar el crecimiento y la competitividad de las empresas dedicadas a la producción de cacao, al tiempo que promueve prácticas sostenibles y responsables en la cadena de suministro. La adopción de herramientas y métodos avanzados de evaluación de la calidad puede contribuir significativamente a fortalecer la posición de las empresas en el mercado global y a satisfacer las demandas cambiantes de los consumidores conscientes de la calidad.





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rodríguez-Velázquez ND, Chávez-Ramírez B, Gómez de la Cruz I, Vásquez-Murrieta M-S, Estrada de los Santos P. El cultivo del cacao, sus características y su asociación con microorganismos durante la fermentación. Alianzas y Tendencias BUAP [Internet]. 2022;7(25):36–51. Available from: <https://www.aytbuap.mx/aytbuap-725/el-cultivo-del-cacao-sus-características-y-su-asociación-con-microorganism>
- [2] Quiroz, E. (2014). Circulación y consumo de cacao en la ciudad de México en el siglo XVIII. Secuencia (Mexico City, Mexico), 88, 39. <https://doi.org/10.18234/secuencia.v0i88.1214>
- [3] Graziani de Fariñas, Lucía, Ortiz de Bertorelli, Ligia, Angulo, Johanna, & Parra, Pablo. (2002). Características físicas del fruto de cacaos tipos criollo, forastero y trinitario de la localidad de cumboto, venezuela. Agronomía Tropical, 52(3), 343-362. Available from: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2002000300006&lng=es&tng=es.
- [4] Pérez, J. F. C., Arrazate, C. H. A., Avila, N. G., & Escobar, S. (2016). Influencia del tipo de cacao (Theobroma cacao L.) en las características del fermento y secado. Agroproductividad, 9(1), 48-54. <http://biblat.unam.mx/hevila/Agroproductividad/2016/vol9/no1/7.pdf>
- [5] Solano, S., Jácome, R. E. M., & Tufiño, A. E. R. (2017). AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE SECADO y SELECCIÓN DEL CACAO ECUATORIANO CONSERVANDO LAS CARACTERÍSTICAS SENSORIALES y PREVIENIENDO RIESGOS LABORALES. Industrial Data, 20(2), 21. <https://doi.org/10.15381/idata.v20i2.13953>





[6] Pineda, F. V., Campos, J. R., Buendía, H. B. E., & Del Carmen Lugo Cervantes, E. (2016). OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TOSTADO DE *Theobroma cacao* var. Criollo EN FUNCIÓN DEL PERFIL CROMATOGRÁFICO. *Memorias del XXXVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ "NUEVAS TECNOLOGÍAS Y TENDENCIAS EN LA INGENIERÍA QUÍMICA"*, 2,083-2,088.

<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/417>

[7] Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, "Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco", núm. 933, p. 2020, 2017, Consultado: ene. 04, 2023. [En línea]. Available:

<https://www.google.com/maps/place/Instituto+Tecnológico+Superior+de+Comalcalco/@18.2239346,-93.3123823,12z/data=!4m19!1m13!4m12!1m4!2m2!1d-93.4902402!2d17.6736156!4e1!1m6!1m2!1s0x85ee8e87f6982da9:0x43db5225bd719ed1!2sitsc+google+maps!2m2!1d-93.2190859!2d1>

[8] Gnosis - Iniciar sesión. (s/f). Edu.mx:8036. Recuperado el 26 de noviembre de 2023, de <http://gnosis.itsc.edu.mx:8036/Comalcalco/Control/>

[9] Triviño, A. H. (2013b). Chocolate: historia de un nahuatlismo. *Estudios de cultura náhuatl*, 46(46), 37-87.
<https://www.historicas.unam.mx/publicaciones/revistas/nahuatl/pdf/ecn46/945.pdf>

[10] Milla, A. (2016). LA PEQUEÑA ORGANIZACIÓN ARTESANAL: TRANSFORMACION DEL CACAO. EL CASO DE LOS PRODUCTORES DE CHOCOLATE EN TUXTLA CHICO, CHIAPAS. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 39(2016), 477-488. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.252887>

[11] Monsalve, P. A. G., & Acevedo, C. M. D. (2017b). ADQUISICIÓN DE DATOS DE UNA MATRIZ DE SENSORES DE GASES (E-NOSE), MEDIANTE MÓDULOS DE COMUNICACIÓN XBEE. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(26). <https://doi.org/10.24054/16927257.v26.n26.2015.2383>





[12] Flórez-Martínez, A., Vargas-Flórez, J. O., Perez-Waltero, H. E., & Fuentes, L. F. Q. (2020). Análisis de componentes principales utilizando Python para identificar clúster asociados a muestras de cacao seco sano e infectado con monilia en norte de Santander. Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, 16-22. <https://doi.org/10.15649/2346030x.712>

[13] Ardón, R. W. R., Damon, A., & Ortiz, W. S. (2022). EL POLICULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao* L) y LA CULTURA QATO'OK DE TUZANTÁN, CHIAPAS, MÉXICO: UNA APROXIMACIÓN ETNOECOLÓGICA. *Ethnoscintia*, 7(4), 14. <https://doi.org/10.18542/ethnoscintia.v7i4.12777>

[14] Flórez-Martínez, A., Acevedo, C. M. D., & Carrillo-Gómez, J. K. (2020). Análisis de volátiles en el proceso de fermentado de cacao, mediante una nariz electrónica para el control de calidad del producto En Norte de Santander-Cúcuta. *Respuestas*, 25(2), 133-146. <https://doi.org/10.22463/0122820x.2955>

[15] Presilla, M. (2009). *The New Taste of Chocolate: A Cultural and Natural History of Cacao with Recipes*. Ten Speed Press.

[16] Kalvatchev, Z., Domingo, G., & Guerra, F. (1998). *Theobroma cacao*. un nuevo enfoque para nutrición y salud. *Revista agroalimentaria*, 4(6), 23-25. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3233588.pdf>

[17] Glicerio, C., et al. (2017). Effect of cocoa beans roasting on the performance of a moisture meter and development of a new calibration model. *Journal of Food Engineering*, 198, 26-32.

[18] Saquicela, J. L. S., Heredia, J. R. B., Heredia, M. A. M., Del Rocio De La A Salinas, L., Fernández, R. E. C., Parra, M. Á. V., Burgos, J. G. C., Acurio, J. A. G., Mina, M. G. G. C., & Quiñónez, B. F. C. (2022). Diseño de un sistema de monitorización de la calidad de aire, basado en una red sensorial y técnicas de IOT





para la ciudad de Esmeraldas / Projeto de um sistema de monitoramento da qualidade do ar baseado em uma rede de sensores e técnicas IOT para a cidade de Esmeraldas. Brazilian Applied Science Review, 6(2), 692-730.
<https://doi.org/10.34115/basrv6n2-020>

[19] Wilson, A. D., & Baietto, M. (2009). Applications and advances in electronic-nose technologies. Sensors, 9(7), 5099-5148.

[20] Palacios, A., & Josefina, G. (2016). Efecto de la temperatura y tiempo de tostado en los caracteres sensoriales y en las propiedades químicas De granos de cacao (Theobroma cacao L.) procedente de Uchiza, San Martín – Perú para la obtención de NIBS. En Repositorio de Tesis - UNMSM.
https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/5009/1/Aldave_pi.pdf

[21] Lince, M. L. P., & Vera, C. S. Z. (2015). Caracterización del proceso de fermentación del cacao variedad nacional mediante el uso de técnicas moleculares y de detección de compuestos de aroma.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/30281>

[22] Sipe, P. C., & Rodríguez, W. (2023). Proceso de fermentación del cacao (Theobroma cacao L.) en cajas de diversas especies maderables y en distintas épocas de cosechas producidas en Alto Beni. CIBUM SCIENTIA, 2(1), 66-76.
<https://doi.org/10.53287/gpig6349gj58o>

[23] Cros, E., & Jeanjean, N. (1995). Cocoa quality : effect of fermentation and drying. Plantations, recherche, développement. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR9602461>

[24] Gutiérrez, J. 2000. Cacao producto fino y de aroma, en cultivos controlados, (Julio2002, Quito Ecuador), Vol. 2, p. 12





[25] Vázquez León, R., Bolaina Torres, C., & Valenzuela Murillo, F. (2017). Datos técnicos para reducir el consumo de energía en secadoras de cacao tipo Samoa. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 1. <https://ri.ujat.mx/bitstream/20.500.12107/3598/1/2.pdf>

[26] Villa, A., & Rodríguez, M. A. (2023). Efecto del tostado y molienda sobre las propiedades del grano de cacao (*Theobroma cacao* linnaeus) y derivados: caso Procesadora del Estado Miranda, Venezuela. Anales de Ciencias Básicas Físicas y Naturales, 38, 69-86. <https://doi.org/10.58479/acbfm.2022.35>

[27] Castillo, P. (. (s.f.). Proceso y transformación del cacao al chocolate – Museo del Chocolate. Obtenido de <https://museodelchocolate.com.co/13594-2/>

[28] Zzaman, W., & Yang, T. A. (2013). Effect of Superheated Steam and Convection Roasting on Changes in Physical Properties of Cocoa Bean (*Theobroma cacao*). Food Science and Technology Research, 19(2), 181–186. <https://doi.org/10.3136/fstr.19.181>

[29] Liendo, Rigel J. 2003. Origen del aroma del Cacao. Revista Digital CENIAP HOY No. 1, enero-abril 2003. Disponible en www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n1/texto/rliendo.htm

[30] González-Alejo, F. A., Barajas-Fernández, J., & García-Alamilla, P. (2019). Extracción de compuestos solubles de la cascarilla de cacao con CO2 supercrítico. caso de metilxantinas y grasa. CienciaUAT, 13(2), 128. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i2.1073>

[31] Afoakwa, E.O., “Introduction to the world cocoa economy”, Cocoa Production and Processing Technology, p. 9–11, 2014.





[32] Domínguez-Pérez, L. A., Concepción-Brindis, I., Lagunes-Gálvez, L. M., Barajas-Fernández, J., Márquez-Rocha, F. J., & García-Alamilla, P. (2019). Kinetic studies and moisture diffusivity during cocoa bean roasting. *Processes*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/pr7100770>

[33] Gutiérrez-Méndez, N., et al. (2019). Monitoring of yeast autolysis by a potentiometric electronic tongue. *Food Chemistry*, 288, 244-251.

[34] Jiménez, J.C. 2000. Efectos de dos Métodos de Fermentación sobre la calidad de tres grupos de cacao (*Theobroma cacao* L.) cultivados en la zona de Quevedo, Provincia de Los Ríos. Tesis Ing. Agr. Guaranda Ecuador, Universidad Estatal de Bolívar, 57 p.





Anexos

Código Main en el ESP32

```
import time
import dht
from machine import Pin, ADC

# Pines para los sensores
MQ3_PIN = 39      # Alcohol
MQ7_PIN = 34      # Monóxido de carbono
MQ135_PIN = 2     # Calidad del aire
DHT11_PIN = 23    # Temperatura y Humedad

# Inicialización de sensores MQ
def configurar_sensor(pin):
    sensor = ADC(Pin(pin))
    sensor.atten(ADC.ATTN_11DB)      # Hasta 3.3V
    sensor.width(ADC.WIDTH_12BIT)    # 0-4095
    return sensor

mq3 = configurar_sensor(MQ3_PIN)
mq7 = configurar_sensor(MQ7_PIN)
mq135 = configurar_sensor(MQ135_PIN)

# Sensor DHT11
sensor_dht = dht.DHT11(Pin(DHT11_PIN))

# Rango de detección estimado para cada sensor en ppm
rango_ppm = {
    "mq3": (50, 1000),    # Alcohol
    "mq7": (20, 2000),    # Monóxido de carbono
    "mq135": (10, 1000)   # Amoniac u otros gases
}

# Función para leer un sensor MQ y convertir su valor a porcentaje
# respecto al rango ppm
```





```
def leer_sensor_ppm(sensor, nombre):
    valor = sensor.read()
    if valor <= 0 or valor >= 4095
:
        return None # Lectura inválida

    voltaje = (valor / 4095)*0.1
# Conversión ADC -> Voltaje

    min_ppm, max_ppm = rango_ppm[nombre]

    # Estimamos una lectura lineal
    ppm = (voltaje / 5) * (max_ppm - min_ppm) + min_ppm

    porcentaje = ((ppm - min_ppm) / (max_ppm - min_ppm)) * 100
    porcentaje = max(0, min(porcentaje, 100)) # Limitar entre 0 y
100%
    return porcentaje

# Función para leer DHT11
def leer_dht11():
    try:
        sensor_dht.measure()
        return sensor_dht.temperature(), sensor_dht.humidity()
    except:
        return None, None

# Encabezado CSV
print("MQ3 (Alcohol %),MQ7 (CO%),MQ135 (NH3%),Temperatura (°C),Humedad
(%)")

# Bucle principal
try:
    while True:
        mq3_val = leer_sensor_ppm(mq3, "mq3")
        mq7_val = leer_sensor_ppm(mq7, "mq7")
        mq135_val = leer_sensor_ppm(mq135, "mq135")
        temp, hum = leer_dht11()
```





```
# Verificar si algún sensor está desconectado
if mq3_val is None:
    raise Exception("X Error: MQ-3 no está conectado.")
if mq7_val is None:
    raise Exception("X Error: MQ-7 no está conectado.")
if mq135_val is None:
    raise Exception("X Error: MQ-135 no está conectado.")
if temp is None or hum is None:
    raise Exception("X Error: DHT11 no está conectado o
falló la lectura.")

# Formatear salida: usa "NA" si el sensor no está conectado
fila = [
    f"{mq3_val:.2f}" if mq3_val is not None else " ",
    f"{mq7_val:.2f}" if mq7_val is not None else " ",
    f"{mq135_val:.2f}" if mq135_val is not None else " ",
    f"{temp}" if temp is not None else " ",
    f"{hum}" if hum is not None else " "
]

print(",".join(fila))
time.sleep(3)

except Exception as e:
    print(f"Error en el programa: {e}")
```

Código Python guardado de datos .csv

```
import serial
import csv
from datetime import datetime

# Configura estos parámetros según tu puerto
PUERTO = 'COM4' # ⚠ Cambia esto al puerto de tu ESP32 (ej.
/dev/ttyUSB0 en Linux)
BAUDIOS = 115200
ARCHIVO = 'datos_sensores.csv'

# Abrir conexión serie
```





```
ser = serial.Serial(PUERTO, BAUDIOS, timeout=1)

# Abrir archivo CSV para guardar
with open(ARCHIVO, 'w', newline='') as csvfile:
    writer = csv.writer(csvfile)

    encabezado_guardado = False

    print("⌚ Esperando datos... (Presiona Ctrl+C para detener)")

    try:
        while True:
            linea = ser.readline().decode('utf-8').strip()
            if not linea:
                continue

            # Mostrar en consola
            print(linea)

            # Escribir en archivo
            datos = linea.split(",")

            # Guardar encabezado solo una vez
            if not encabezado_guardado and "MQ3" in datos[0]:
                writer.writerow(datos)
                encabezado_guardado = True
            elif encabezado_guardado:
                writer.writerow(datos)

    except KeyboardInterrupt:
        print("\n✅ Lectura detenida por el usuario.")
    finally:
        ser.close()
```

Paralelo a los trabajos de investigación del presente proyecto, se trabajó en la redacción de un capítulo de memoria de congreso, el cual se encuentra publicado. A continuación, se presenta la referencia al mismo: Kaizen y Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 257 – 274 ISBN: 978-607-9394-28-8, 2023



