



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

**“SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> PARA EL  
MONITOREO DE GRADO DE TOSTADO DE CAFÉ”**

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

**Línea de investigación:** Prototipos Industriales

**Autor:**

Lizbeth Solange Imbaquingo Imbaquingo

**Director:**

Hugo Eduardo Salazar García

**Asesor:**

Carlos Xavier Rosero Chandi

Ibarra, febrero de 2025



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

## 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1003184098		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Imbaquingo Imbaquingo Lizbeth Solange		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Atuntaqui, Av. Julio Miguel Aguinaga y Germán Martínez		
<b>EMAIL:</b>	lsimbaquingoi@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	06 2909 164	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0988025709

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	Sistema de medición de concentración de CO <sub>2</sub> para el monitoreo de grado de tostado de café
<b>AUTOR (ES):</b>	Imbaquingo Imbaquingo Lizbeth Solange
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	24 de febrero de 2025
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mecatrónica
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Hugo Eduardo Salazar García

## 2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 24 días del mes de febrero de 2025

### EL AUTOR:

Firma:  .....

Nombre: Lizbeth Solange Imbaquingo Imbaquingo



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

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

Ibarra, 24 de febrero de 2025

Ing. Hugo Eduardo Salazar García

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

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

①.....  .....

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



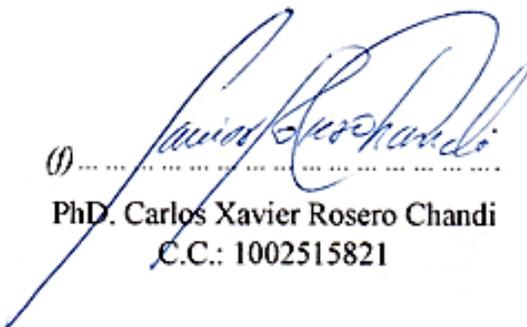
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

## **APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR**

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> PARA EL MONITOREO DE GRADO DE TOSTADO DE CAFÉ” elaborado por LIZBETH SOLANGE IMBAQUINGO IMBAQUINGO, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f) .....  .....

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

(f) .....  .....

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

## **DEDICATORIA**

A mis padres, quienes, con su amor, apoyo incondicional, infinita paciencia y sacrificios me han brindado todo lo necesario para lograr mis sueños. Cada logro que alcanzo es un reflejo de los principios y valores que me han inculcado. A mi hermano, por ser mi ejemplo de resiliencia e inspiración para seguir adelante y por enseñarme que no hay meta imposible cuando se tiene perseverancia y determinación. A mi sobrino, porque con su inocencia y ternura me ha enseñado a valorar la simpleza de la vida, es un recordatorio constante de que la felicidad está en las cosas más genuinas. A esa persona especial, por ser mi refugio en los momentos complicados y mi compañía en los momentos de alegría marcando un antes y después en mi vida.

Este trabajo es fruto de su confianza en mí. Para ustedes, con todo mi corazón.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis profesores por compartir su conocimiento, por su paciencia y por su guía a lo largo de mi formación académica. En especial, agradezco al Ing. Milton Gavilánez, Ing. Hugo Salazar e Ing. Xavier Rosero, por su apoyo y orientación en el desarrollo de esta tesis.

Profundo agradecimiento a mis padres ya que, sin su esfuerzo y sacrificio, este camino habría sido mucho más difícil. Me han enseñado a perseverar, a creer en mí y a nunca rendirme ante los desafíos.

A mis amigos, por estar a mi lado en los momentos de alegría y también en los de dificultad. Gracias por su apoyo, por las risas y por cada conversación motivadora.

A todos los que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este trabajo, mi más sincera gratitud.

## RESUMEN

El café es un cultivo tradicional de Ecuador, para llegar a ser consumible atraviesa una serie de etapas, una de las más críticas es el tostado ya que se trata de un proceso físico químico irreversible en el que se determinan las diferentes características organolépticas que influyen directamente en la calidad del café. Existen diferentes grados de tueste: Tueste claro, medio y oscuro. Las máquinas tostadoras de café actuales monitorean y controlan dos factores, el tiempo y la temperatura, olvidando otras variables que deben ser equilibradas para obtener un café de especialidad. Durante el proceso de tostado se liberan diferentes gases siendo el dióxido de carbono uno de los más significantes, medir este gas aporta en el monitoreo de grado de tostado de café. Por ello, se llevó a cabo la implementación de un sistema de medición de concentración de CO<sub>2</sub> en una tostadora de café para el monitoreo del proceso de tueste. Para obtener el dispositivo se definieron los requerimientos y en base a estos se planteó la solución. Posteriormente se seleccionaron los componentes, sensor y microcontrolador, por medio de una evaluación de criterios ponderados, se diseñaron los respectivos diagramas de conexiones y armazones para posteriormente ensamblar el dispositivo de medición y realizar las pruebas de validación en condiciones reales de tostado obteniendo como resultado diferentes curvas de dióxido de carbono en función del tiempo y cantidad de dióxido de carbono.

**Palabras clave:** Café, Monitoreo, Concentración de CO<sub>2</sub>, Tueste.

## ABSTRACT

Coffee is a traditional crop of Ecuador, to become consumable it goes through a series of stages, one of the most critical is roasting, as it is an irreversible physical-chemical process in which the different organoleptic characteristics that directly influence the quality of coffee are determined. There are different degrees of roasting: Light, medium and dark roast. Current coffee roasting machines monitor and control two factors, time and temperature, forgetting other variables that should be balanced to obtain a specialty coffee. During the roasting process different gases are released, carbon dioxide being one of the most significant, measuring this gas contributes to monitoring the degree of coffee roast. Therefore, the implementation of a CO<sub>2</sub> concentration measurement system in a coffee roaster was carried out to monitor the roasting process. To obtain the device, the requirements were defined and based on these, the solution was proposed. Subsequently, the components, sensor and microcontroller were selected through a weighted criteria evaluation, the respective connection diagrams and frames were designed to later assemble the measuring device and perform the validation tests in real roasting conditions, resulting in different carbon dioxide curves as a function of time and amount of carbon dioxide.

**Keywords:** Coffee, Monitoring, CO<sub>2</sub> Concentration, Roasting.

## INDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	ii
2. CONSTANCIAS .....	iii
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR .....	
CURRICULAR .....	iv
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
RESUMEN .....	viii
ABSTRACT .....	ix
INDICE DE CONTENIDOS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 General .....	2
1.2.2 Específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Justificación .....	3

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	4
2.1    Antecedentes .....	4
2.2    Bases Teóricas .....	5
2.2.1    Proceso de tostado de café.....	5
2.2.2    Grados de tueste.....	6
2.2.3    Fases de tostado de café.....	7
2.2.4    Cambios físicos.....	8
2.2.5    Cambios químicos .....	8
2.2.6    Dióxido de carbono .....	10
2.2.7    Factores relevantes durante el proceso de tostado.....	10
2.2.7.1    Temperatura.....	11
2.2.7.2    Tiempo.....	12
2.2.8    Tostadoras de café .....	12
2.2.8.1    Máquinas calentadas por electricidad.....	13
2.2.9    Técnicas de medición de CO <sub>2</sub> .....	14
2.2.10    Protocolos de comunicación.....	16
2.2.8.1    Protocolo serie asíncrono UART.....	17
2.2.8.2    Protocolo serie síncrono I2C .....	18
2.2.11    Microcontrolador .....	19
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO .....	21

3.1	Enfoque y tipos de investigación.....	21
3.2	Diseño de la Investigación.....	21
CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS .....		26
4.1	Requerimientos .....	26
4.2	Recursos disponibles.....	26
4.3	Diagrama de bloques.....	27
4.4	Caracterización del sistema.....	27
4.4.1	Selección del sensor de CO <sub>2</sub> .....	28
4.4.1.1	Sensor K30 .....	32
4.4.1.2	Pines del sensor K30.....	32
4.4.2	Selección de la unidad de procesamiento .....	33
4.4.2.1	ESP32 .....	36
4.4.2.2	Pines del ESP32.....	36
4.4.3	Pantalla LCD JHD162A .....	37
4.4.3.1	Módulo LCD – I2C.....	37
4.5	Cálculo para divisor de voltaje .....	38
4.6	Conexiones.....	39
4.7	Programación.....	40
4.7.1	Diagrama de flujo general del dispositivo.....	41
4.7.2	Pseudocódigo principal.....	42

4.7.3	Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos .....	43
4.7.4	Pseudocódigo para el almacenamiento de datos.....	44
4.7.5	Librerías.....	44
4.8	Estructura del dispositivo y piezas de protección .....	45
4.8.1	Pieza protectora de sensor .....	45
4.8.2	Armazón principal .....	46
4.9	Montaje y funcionamiento .....	48
4.9.1	Montaje.....	49
4.9.2	Funcionamiento .....	50
4.10	Pruebas.....	51
4.11	Mantenimiento.....	55
	CONCLUSIONES.....	56
	RECOMENDACIONES .....	57
	REFERENCIAS .....	58
	ANEXOS .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 2.1</b> Desarrollo de sabores según el grado de tueste [4].	5
<b>Fig. 2.2</b> SCAA: Escala Agtron (Sistema de puntos para clasificar el grado – color – de diferentes tipos de tostado) [4].	6
<b>Fig. 2.3</b> Principales fases del proceso de tostado [4].	7
<b>Fig. 2.4</b> Curva de tueste [4].	11
<b>Fig. 2.5</b> Clasificación de las tostadoras de café.	13
<b>Fig. 2.6</b> Partes de una tostadora de café eléctrica.	14
<b>Fig. 2.7</b> Estructura básica para un sensor de gas de película semiconductor [32].	15
<b>Fig. 2.8</b> Absorción infrarroja [34].	15
<b>Fig. 2.9</b> Ejemplo de transmisión asincrónica [39].	17
<b>Fig. 2.10</b> Ejemplo de transmisión sincrónica [39].	17
<b>Fig. 2.11</b> Ejemplo de comunicación serie para la letra S [41].	18
<b>Fig. 2.12</b> Comunicación I2C entre varios dispositivos [41].	19
<b>Fig. 2.13</b> Arquitectura mínima de un microcontrolador [44].	19
<b>Fig. 4.1</b> Máquina tostadora de café, vista posterior.	27
<b>Fig. 4.2</b> Diagrama de bloques del sistema.	27
<b>Fig. 4.3</b> Pines a utilizar del sensor K30 [51].	33
<b>Fig. 4.4</b> Pines del ESP32 [52].	37
<b>Fig. 4.5</b> Pines de la pantalla LCD JHD162A [53].	37
<b>Fig. 4.6</b> Módulo LCD – I2C [54].	38
<b>Fig. 4.7</b> Módulo LCD - I2C integrado en una pantalla LCD [54].	38
<b>Fig. 4.8</b> Divisor de voltaje [56].	39
<b>Fig. 4.9</b> Diagrama de conexión de los componentes electrónicos.	40
<b>Fig. 4.10</b> Diagrama de flujo general del funcionamiento del sistema.	41
<b>Fig. 4.11</b> Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en formato CSV.	43
<b>Fig. 4.12</b> Pieza protectora de sensor.	46
<b>Fig. 4.13</b> Armazón principal vista exterior.	47
<b>Fig. 4.14</b> Armazón principal vista interior.	47
<b>Fig. 4.15</b> Sensor de CO <sub>2</sub> dentro de la caja protectora, vista interior.	48
<b>Fig. 4.16</b> Sensor de CO <sub>2</sub> dentro de la caja protectora, vista exterior.	48

<b>Fig. 4.17</b> Ensamblaje del dispositivo de medición de dióxido de carbono, vista interior. ...	49
<b>Fig. 4.18</b> Ensamblaje del dispositivo de medición de dióxido de carbono, vista exterior. ..	49
<b>Fig. 4.19</b> Sensor K30 instalado en el ducto de recirculación de aire. ....	50
<b>Fig. 4.20</b> CO <sub>2</sub> vs Tiempo.....	51
<b>Fig. 4.21</b> CO <sub>2</sub> vs Tiempo para obtener tueste claro.....	52
<b>Fig. 4.22</b> Café tostado ligero o claro. ....	52
<b>Fig. 4.23</b> CO <sub>2</sub> vs Tiempo para obtener tueste medio.....	53
<b>Fig. 4.24</b> Tueste medio. ....	53
<b>Fig. 4.25</b> CO <sub>2</sub> vs Tiempo para obtener tueste oscuro.....	54
<b>Fig. 4.26</b> Tueste oscuro. ....	54
<b>Fig. 4.27</b> Tipos de grado de tostado de café obtenidos de las pruebas de validación del dispositivo.....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Cambios macroscópicos durante el proceso de tostado [10]. .....	8
<b>Tabla 2.2</b> Repercusión organoléptica de los componentes del café [11]. .....	9
<b>Tabla 4.1</b> Evaluación de criterios para la selección del sensor de CO <sub>2</sub> . .....	30
<b>Tabla 4.2</b> Características principales de los sensores de CO <sub>2</sub> : SCD30, K30 y MH-Z19B..	31
<b>Tabla 4.3</b> Resultado de la evaluación de criterios para la selección del sensor de CO <sub>2</sub> . ....	31
<b>Tabla 4.4</b> Evaluación de criterios para la selección de la unidad de procesamiento. ....	34
<b>Tabla 4.5</b> Características principales de los microcontroladores: Arduino Uno, Arduino Mega y ESP32. ....	35
<b>Tabla 4.6</b> Resultado de la evaluación de criterios para la selección de la unidad de procesamiento. ....	35
<b>Tabla 4.7</b> Piezas del sistema de medición de CO <sub>2</sub> . .....	45

# CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

En Ecuador tradicionalmente se cultiva café siendo uno de los pocos países donde se cosecha dos tipos de café, el Arábico y Robusta [1]. Existen diferentes etapas de producción del café hasta conseguir una de las bebidas más consumidas hoy en día [2]. Una de ellas es el tueste.

El proceso de tostado de café es una actividad longeva que fue evolucionando según las necesidades de los tostadores. El mismo es relevante y crítico dentro de la secuencia de elaboración ya que influye en la calidad del café. Se trata de un proceso físico químico irreversible mediante el cual se modifican las propiedades de la materia prima de café verde para producir distintos elementos, ajustando el sabor, la acidez, y el cuerpo del café según las preferencias del cliente. Este debe ser preciso, ya que de no ser así los granos de café pueden quedar inutilizados. Hay tres tipos de tueste y según sea el caso se determinan las características del café como: Tueste claro o ligero, medio y oscuro.

Un manejo optimizado de la cosecha y aplicar un proceso de tostado eficiente, son elementos importantes para aumentar la competitividad del producto tanto a nivel local como en el mercado internacional [3].

Las máquinas tostadoras de café existentes en su mayoría controlan dos factores, la temperatura y el tiempo, para elaborar distintos niveles de tostado utilizando la misma variedad de café [3], dejando a un lado otros factores que deben ser equilibrados para obtener un café de especialidad. Durante las diversas etapas de tueste ocurren reacciones químicas que liberan gases y compuestos volátiles que influyen en el sabor y aroma del café. Por ende, es importante

considerar como variable adicional el control de los gases emitidos, particularmente el dióxido de carbono, debido a su liberación significativa durante el proceso [4].

La medición de la concentración de CO<sub>2</sub> aportará significativamente en el monitoreo del grado de tostado de café mejorando este proceso que debe ser preciso y efectivo para garantizar la calidad tanto en el sabor como en el aroma del producto final.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Implementar un sistema de medición de CO<sub>2</sub> en una tostadora de café para el monitoreo del proceso de tueste.

### **1.2.2 Específicos**

- Determinar los requerimientos técnicos y operativos para la medición de CO<sub>2</sub> en las tostadoras de café.
- Diseñar el sistema de medición de concentración de CO<sub>2</sub> durante el proceso de tueste en función de los requerimientos.
- Implementar el sistema de medición en una tostadora de café asegurando su correcto funcionamiento.
- Validar la efectividad y precisión del sistema mediante pruebas de campo en condiciones reales de tostado.

## **1.3 Alcance**

El presente proyecto se enfocará en la implementación de un sistema de medición de CO<sub>2</sub> para el monitoreo de grado de tueste de café. Para ello se establecerán los requerimientos técnicos claves y posteriormente se realizará el diseño del sistema de medición. Este se instalará en una

tostadora de café eléctrica, asegurando su correcto funcionamiento dentro del entorno operativo. Finalmente, se realizarán pruebas de validación en condiciones reales de tostado, para evaluar la efectividad del sistema de medición de CO<sub>2</sub> y los datos serán presentados según los requerimientos previamente definidos.

#### **1.4 Justificación**

La implementación del sensor de medición de concentración de CO<sub>2</sub> en la tostadora de café mejorará la precisión en el proceso de tostado y es esencial para el crecimiento y desarrollo de cualquier industria involucrándose en el sector tecnológico. Los datos obtenidos y analizados beneficiarían directamente a los tostadores de café ya que mejorarán los parámetros de calidad del café significativamente aumentando la cuota de mercado.

El proceso de tostado es un factor intrínseco que determina la calidad del café además que es una fase previa para obtener café soluble. Ecuador en las últimas décadas se ha especializado en la industrialización de café soluble o instantáneo. En 2022, se exportó aproximadamente medio millón de sacos de café industrializado que equivale al 79% del monto total de exportación de café del país, el restante se exportó en café en grano [5].

En los últimos años han surgido nuevas tendencias de consumo de café de especialidad por lo que el país ha impulsado la producción cafetalera para ofertarla a nivel nacional e internacional [6]. Varios productores han tomado la iniciativa de darle un valor agregado al café involucrándose en el proceso de tostado para producir café especial aumentando sus ingresos económicos.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

Falah et al [7] diseñaron y construyeron una tostadora de café. El control de temperatura se implementó utilizando lógica difusa. El nivel de tueste claro se determinó a través de la información proporcionada por el sensor de gas mientras que para el tueste de nivel medio y oscuro se empleó el crujido de los granos empleando técnicas como la transformada de Fourier y una red neuronal para el análisis del sonido. Este sistema tiene la capacidad de generar distintos grados de tostado.

Samsidar et al [8] desarrollaron y evaluaron un sistema de monitoreo de gases emitidos durante el proceso de tostado de café, utilizando una serie de sensores de gas y un microcontrolador. Las muestras analizadas incluyeron café Arábica, Robusta y Liberica arrojando resultados de concentraciones de CO<sub>2</sub> de alrededor de 21-23 ppm, de CO que iba desde 1500 a 2100 ppm y NOx con valores desde 280 a 300 ppm. Se concluyó que los sensores son efectivos para la medición de los gases.

Wang et al [9] investigaron el contenido y desgasificación de CO<sub>2</sub> después del proceso de tueste de café ya que este es uno de los principales gases producidos durante el tostado e influye en la calidad de este. Se utilizó café de tipo arábica y un tostador de lecho fluidizado demostrando que el comportamiento de desgasificación depende de la composición química y las diferencias microestructurales de los granos de café.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Proceso de tostado de café

El proceso de tostado de café implica aplicar calor a los granos de café crudos mientras se controla la temperatura y tiempo hasta que se desarrolle el aroma y el color del grano del café sea homogéneo [10].

Es una de las fases más importantes por la cual atraviesa el café verde ya que influye en varias de las características del producto final. Es un proceso mediante el cual el café experimenta diferentes reacciones termoquímicas encargadas de generar las sustancias que aportan en las cualidades sensoriales además de cambios físicos [11].

Durante el tueste se cambia el color del café y por ende su sabor, si el café es tostado levemente da como resultado un color más claro y es más ácido, por el contrario, un café oscuro, producto de un tostado intenso, tiene poca acidez, es más amargo e incluso su sabor es fuerte [12]. En la figura 2.1. se muestra las curvas de las características que se destacan en el desarrollo de sabores según el grado de tueste.

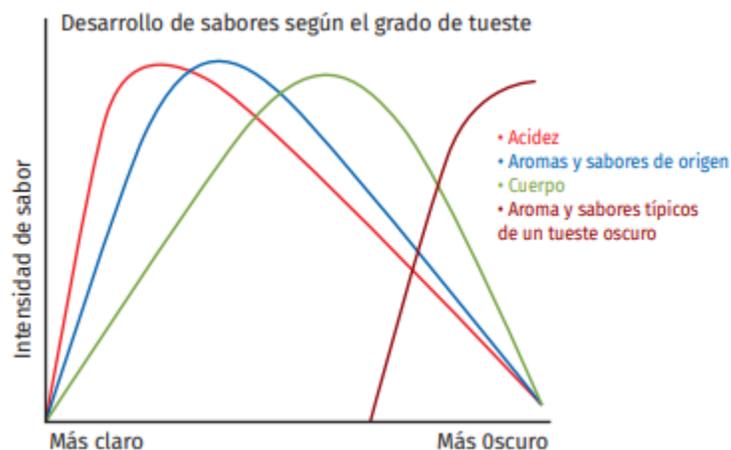


Fig. 2.1 Desarrollo de sabores según el grado de tueste [4].

### 2.2.2 Grados de tueste

Una de las principales características para definir el grado del tueste es el color del grano. El grado de tueste se relaciona directamente con los denominados cafés de alta calidad al definir las cualidades del café tostado [13]. Se pueden determinar tres grados de tueste: ligero o claro, medio y oscuro.

Existe un evaluador para determinar el grado del tueste según el color llamado, escala Agtron, este sistema se basa en puntos mediante los cuales se clasifica el grano por color [14], fue creado por la Asociación Americana de Cafés especiales (SCCA) ya que industrialmente se realiza el análisis del color para identificar los diferentes grados de tostado [15], en la figura 2.2 se visualiza esta escala, respecto a los valores, de 94 a 75 es un tueste claro, de 65 a 55 es medio y por último de 45 a 25 es un tostado oscuro.



Fig. 2.2 SCAA: Escala Agtron (Sistema de puntos para clasificar el grado – color – de diferentes tipos de tostado) [4].

- **Tuestes claros**

La coloración de estos tipos de tuestes es marrón claro con un acabado mate. El sabor es normalmente ácido y delicado ya que se mantiene en su mayoría el sabor original del grano. Se tuestan hasta el inicio del primer crack, sonido característico indicador de que el grano se ha expandido [16].

- **Tuestes medios**

Son tuestes que estuvieron a mayor temperatura y tiempo que los tuestes claros dando como resultado un color más oscuro. Tienen un balance entre la acidez y aroma debido a que se unen las propiedades naturales del café y su brillo al cuerpo consistente que se obtiene con el tueste [16].

- **Tuestes oscuros**

Estos tipos de tuestes incluyen colores desde marrón oscuro hasta un negro carbón brillante, alcanzan el segundo crack, son menos densos como consecuencia de que pierden mayor humedad y el sabor es más profundo y menos ácido dado que proviene del tueste dejando a un lado el sabor original del grano [16].

### 2.2.3 Fases de tostado de café

El grano verde de café atraviesa una serie de cinco fases desde que inicia el proceso de tostado hasta su culminación, en cada fase sufre una serie de cambios físicos y químicos. Las fases son: Fase de secado, de caramelización, de transición térmica, de desarrollo del grano y de enfriamiento. En la figura 2.3. se explica a detalle las principales características de cada fase.



Fig. 2.3 Principales fases del proceso de tostado [4].

#### 2.2.4 Cambios físicos

En la tabla 2.1. se indican los cambios físicos que experimenta el grano verde de café a medida que aumenta la temperatura.

**Tabla 2.1** Cambios macroscópicos durante el proceso de tostado [10].

<b>Cambios macroscópicos durante el tostado</b>	
Temperatura °C	Efecto
20 – 130	Pérdida de la humedad interna de los granos (secado). El color se desvanece.
130 – 140	Pico máximo de la reacción endotérmica. Coloración amarilla e hinchazón del grano dando inicio al pardeamiento no enzimático. Se forman ciertos gases que comienzan a evaporarse.
140 – 160	Sucesión de picos endotérmicos y exotérmicos. Color marrón claro. El grano aumenta el volumen y los microporos, se vuelve quebradizo y se forman ciertas fisuras. Inicia la formación del aroma. En esta fase se decide cuando terminar el tostado según el tipo de tueste que se desee.
160 – 190	Las reacciones del proceso de tostado se dirigen hacia la estructura interior seca del grano.
190 – 240	Formación de micro fisuras dentro del grano. Se liberan grandes cantidades de dióxido de carbono y el grano queda poroso. Aparece el conocido aroma y sabor de café tostado.

#### 2.2.5 Cambios químicos

Los granos de café están integrados por una serie de compuestos químicos y cada uno de ellos aporta con diferentes propiedades al sabor y aroma del café. En la tabla 2.2. se indica la repercusión organoléptica de los componentes del café. Las características organolépticas son aquellas que pueden ser percibidas por los órganos de los sentidos [17].

**Tabla 2.2** Repercusión organoléptica de los componentes del café [11].

<b>Compuesto químico</b>	<b>Propiedades que confiere a la taza del café</b>
Cafeína	Amargor, cuerpo y fuerza
Trigonelina	Amargor, aroma por sus productos de degradación
Proteínas y aminoácidos	Aroma por sus productos de degradación
Productos de condensación	Aroma y pigmentos coloreados
Hidratos de carbono	Cuerpo, viscosidad y aroma por los productos de condensación
Ácidos clorogénicos	Astringencia y cuerpo
Ácidos carboxílicos	Acidez y aroma
Lípidos	Cuerpo, aroma y crema
Compuestos volátiles	Aroma

Durante el proceso de tostado ocurren diferentes reacciones químicas en cada uno de los elementos que influyen en el sabor y aroma como se mencionan en la Tabla 2.2. Cabe destacar que el principal factor a tomar en cuenta es la liberación y retención de dióxido de carbono [18].

El agua que es contenida en los granos crudos y el agua generada por las reacciones junto con el dióxido de carbono se liberan mientras se realiza el proceso de tostado, en conjunto de algunas cantidades de monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles [10].

Estos productos son generados por las reacciones de Maillard, esta reacción o glicación de proteínas es un proceso químico que se desarrolla fundamentalmente entre un azúcar reductor y el grupo amino de una proteína, los productos que se generan juegan un papel importante en las características finales que presentan los alimentos, incluyendo el aroma, el color, el sabor y la textura [19].

Además, esta reacción determina los beneficios para la salud y seguridad alimentaria, durante el tueste de café, inicia con la condensación de carbohidratos y aminoácidos provocando alteraciones en el color, sabor y contenido nutricional. Las melanoidinas son las responsables del color marrón del grano tostado y aportan al cuerpo y sensación en boca de la bebida de café, las proteínas, los lípidos e hidratos de carbono se encargan de la liberación y o transformación de un gran porcentaje de dióxido de carbono. No obstante, como resultado de esta reacción también se producen componentes como la acrilamida que compromete la seguridad alimentaria [20].

### **2.2.6 Dióxido de carbono**

El dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  se presenta como un gas inodoro e incoloro en condiciones ambientales y en estado sólido se conoce como hielo seco, está formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno unidos por medio de un enlace covalente [21], la concentración de este gas se mide en partes por millón (ppm) [22].

Se obtiene cuando se quema en exceso de oxígeno las sustancias que contienen carbono, cuando se calientan ciertos carbonatos [23] e incluso en procesos de fermentación y respiración.

### **2.2.7 Factores relevantes durante el proceso de tostado**

Mientras se realiza el proceso de tostado de café existen dos factores importantes a tomar en cuenta: la temperatura y el tiempo. Si se usan de manera correcta, se obtienen diferentes grados de café con la misma materia prima además que dan como resultado las curvas de tueste, ver figura 2.4, que brindan información sobre las características del café tostado [4].

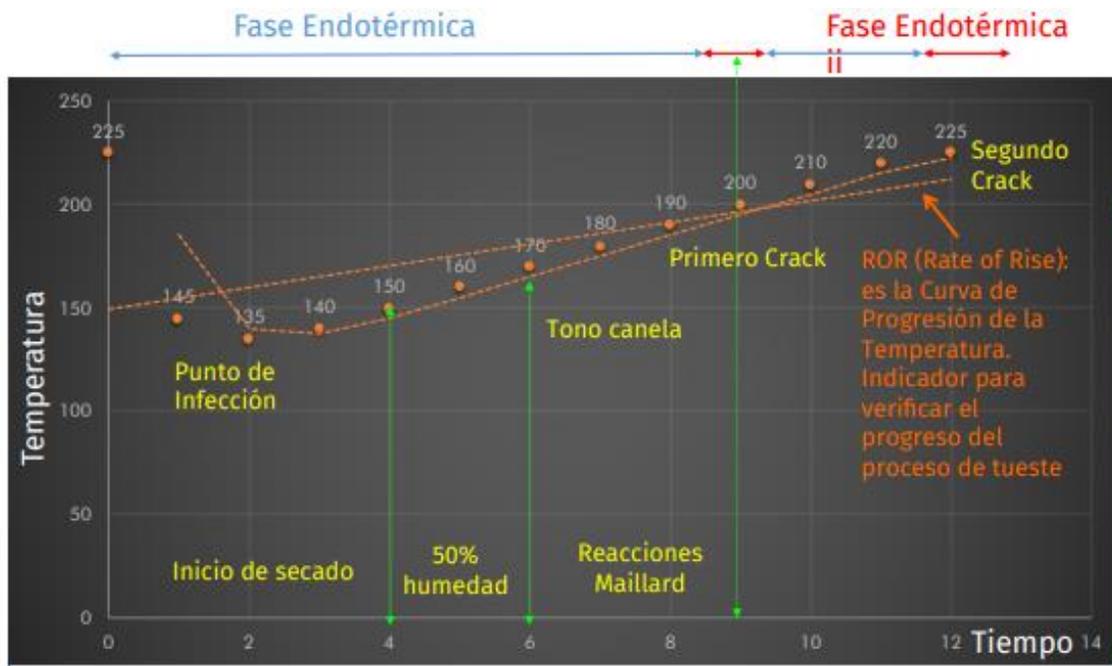


Fig. 2.4 Curva de tueste [4].

### 2.2.7.1 Temperatura

La temperatura influye en la variación de la acumulación de los compuestos químicos y en la calidad del café tostado [24].

De todas las fases de tuestado, la temperatura toma relevancia en dos de ellas: la fase de secado donde la temperatura está por debajo de los 160° y existe una pérdida de humedad en los granos de café y la fase de tuestado que al alcanzar una temperatura mayor a 190° se evidencia cambios físicos como cambio de color y volumen y químicos encargados de desarrollar las propiedades organolépticas del café tostado [25].

Para obtener un café de calidad es importante controlar la temperatura de tueste por lo tanto la máquina debe contar con un termómetro para tener un seguimiento constante de esta variable [26].

### **2.2.7.2 Tiempo**

Según el tipo de tostadora el tiempo varía de entre 6 a 25 minutos. No es recomendable un tueste demasiado rápido porque se vuelve difícil controlar el proceso ni un tueste lento ya que se pueden perder los compuestos volátiles [4].

Una máquina de tostar café artesanal tarda un tiempo estimado de entre 12 a 20 minutos junto con una temperatura que varía alrededor de 204 °C y 218 °C para obtener uniformidad en el color de los granos de café tostado [27].

A nivel industrial se requiere un tueste rápido por lo que el tiempo de tostado está entre 3 a 6 minutos, tiempo en el cual el café alcanza las cualidades para ser café soluble [15].

### **2.2.8 Tostadoras de café**

El rol principal de las máquinas tostadoras de café es aportar el calor suficiente para convertir tanto la estructura física como química de los granos verdes de café en un producto consumible para el ser humano. Para ello, la máquina tiene tres partes esenciales: un sistema que genera calor, un sistema de mezcla para que el calor sea homogéneo en todos los granos y un espacio de dimensiones considerables para almacenar el café durante el proceso de tostado [28].

Las tostadoras de café iniciaron con modelos muy sencillos como una “sartén”, sin embargo, evolucionaron con el paso del tiempo para responder al crecimiento industrial y consumismo hasta obtener las tostadoras que se conocen en la actualidad [29].

Se puede clasificar a las tostadoras de café de diversas maneras como se indica en la figura 2.4.

Según el método de transferencia de calor	Según el sistema de calentamiento	Según la fuente de calor	Segun su uso
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas con caldera</li> <li>• Máquina con lecho fluido</li> <li>• Máquinas con cinta transportadora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas de transferencia directa de calor</li> <li>• Máquinas de circulación de aire caliente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas calentadas por electricidad</li> <li>• Máquinas calentadas por gas</li> <li>• Máquinas calentadas por productos petrolíferos líquidos</li> <li>• Máquinas calentadas por leña</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas accionadas manualmente</li> <li>• Máquinas utilizadas con sistema de perfil de tostado</li> <li>• Máquinas totalmente automáticas</li> </ul>

**Fig. 2.5** Clasificación de las tostadoras de café

### 2.2.8.1 Máquinas calentadas por electricidad

Las tostadoras de café que son calentadas por electricidad contienen resistencias eléctricas en el espacio que se almacena el producto a tostar. Este sistema de calentamiento tiene como ventajas la fácil construcción y reparación además de que se utiliza en todo tipo de recipientes de cocción aun así tiene algunos riesgos como quemaduras en caso de no contar con un sistema de protección y shock eléctrico por no poseer conexión a tierra [30].

En la figura 2.6, se denota una representación general de una tostadora de café que tiene resistencias eléctricas como sistema de calentamiento además está compuesta por una cámara de tostado y un enfriador.



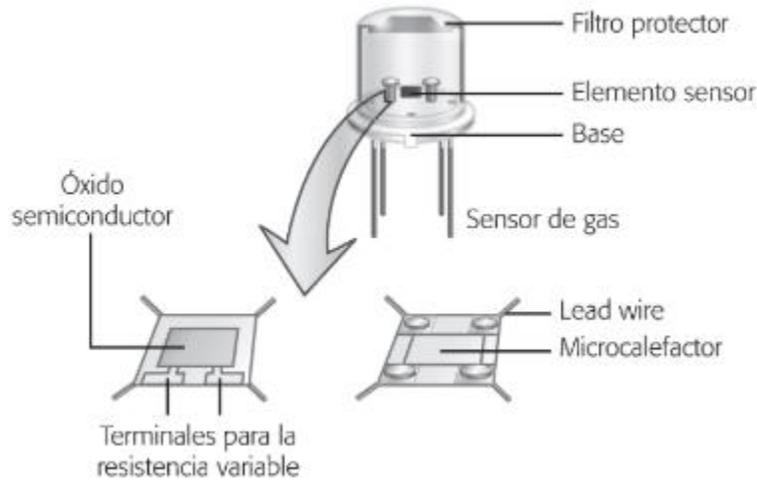
Fig. 2.6 Partes de una tostadora de café eléctrica.

### 2.2.9 Técnicas de medición de CO<sub>2</sub>

Los métodos existentes para la medición y monitoreo de CO<sub>2</sub> son diversos, entre ellos se tiene: cromatografía de gases, espectro infrarrojo, electroquímico, electrólito sólido, cerámica semiconductor, entre otros [31].

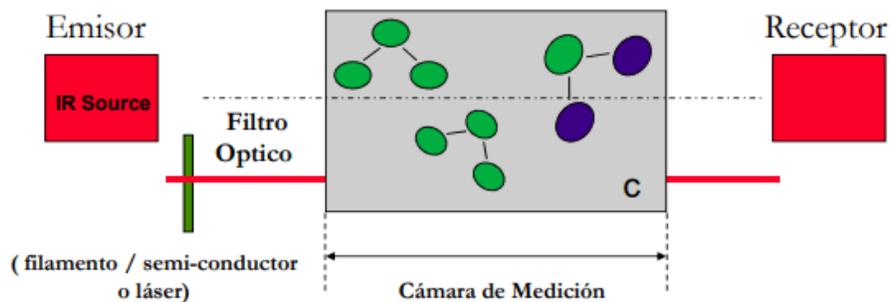
Cada método tiene sus respectivas ventajas y desventajas, la cromatografía de gases ofrece sensibilidad, velocidad y precisión, pero su costo es elevado y sus dimensiones grandes [31].

Por otro lado, los sensores electroquímicos y semiconductores tienen un tamaño adecuado sin embargo no son estables ni precisos y su vida útil es corta [31], estos últimos son transductores entre una resistencia de óxido semiconductor y un determinado gas junto con la variación de la resistividad del material que da lugar a la reacción que absorbe o libera electrones. Sus componentes principales son: Una película sensora, un microcalefactor y un circuito de acondicionamiento, cabe mencionar que deben ser cuidadosamente utilizados ya que los cambios de temperatura y humedad relativa pueden ocasionar errores en la medición [32], en la figura 2.7 se visualiza la estructura básica para este tipo de sensor de gas.



**Fig. 2.7** Estructura básica para un sensor de gas de película semiconductor [32].

Los sensores NDIR (Radiación Infrarroja No Dispersiva) brindan precisión, estabilidad [31], su vida útil es larga, son resistentes al polvo, suciedad, humedad alta, entre otras condiciones extremas [33], su costo no es excesivamente elevado y su tamaño es ideal. Este principio es uno de los más utilizados para la detección de gases a base de carbono como el  $\text{CO}_2$ , ya que los gases con más de un tipo de átomo absorben radiación infrarroja [34], su funcionamiento es sencillo, ingresa el gas al sensor y la luz de la fuente de infrarrojos cae sobre las moléculas de gas [35], se mide la intensidad de absorción ya que se relaciona proporcionalmente a la concentración de gas, esta absorción se determina por la ley de Beer-Lambert [36]. La longitud de onda a la que absorben las moléculas la cantidad de luz es  $4.26 \mu\text{m}$  [35].



**Fig. 2.8** Absorción infrarroja [34].

### 2.2.10 Protocolos de comunicación

Un protocolo se describe como un conjunto de reglas que se determinan para dar lugar a una comunicación entre varios equipos o dispositivos [37]. Por medio de estas reglas se establece el formato de los datos, la temporización, la secuenciación, el control del acceso y el control de errores, entre otras [38].

Un protocolo se caracteriza por los siguientes puntos:

- **Sintaxis:** Formato de los datos, codificación y niveles de la señal.
- **Semántica:** Se encarga del control para la coordinación y manejo de errores.
- **Temporización:** Incluye la sincronización de velocidad y secuenciación de datos. No existe en protocolos sencillos.

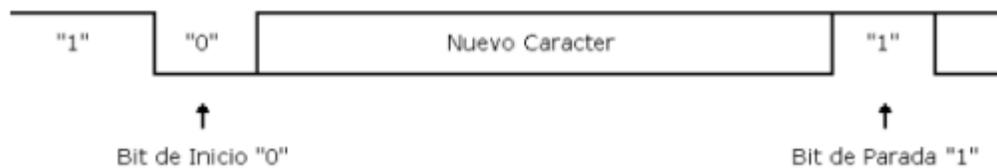
El seguimiento de estos puntos principales asegura que se comuniquen los diferentes dispositivos bajo los mismos símbolos y reglas [39].

Una clasificación de los protocolos de comunicación es:

- **Protocolos paralelos:** Transmiten simultáneamente múltiples bits por medio de canales o cables separados obteniendo una alta velocidad de transferencia por lo que son ocupados en tareas que requieren un procesamiento rápido de grandes volúmenes de datos, sin embargo, presentan desventajas cuando la transmisión es a larga distancia como ruido eléctrico [40], otro de sus puntos negativos es su elevado costo, por estas razones casi no se utilizan para la comunicación con microcontroladores ya que aumentan la complejidad de los circuitos periféricos al microcontrolador [39].

- Protocolos seriales: Transmiten un bit a la vez por lo tanto requieren de menos cableado y son funcionales para aplicaciones de larga distancia [40]. Este tipo de protocolos permite transferencia de datos asíncrona y sincrónica.

En la comunicación asíncrona el emisor dispone el momento en el que va a enviar el mensaje por la red por lo que proporciona una señal para sincronizar los relojes con el receptor y poder decodificar el mensaje [39], en la figura 2.9 se visualiza un ejemplo de transmisión asíncrona.



**Fig. 2.9** Ejemplo de transmisión asíncrona [39].

La comunicación síncrona se basa en enviar una trama de datos para configurar un bloque de información, el cual inicia con un conjunto de bits de sincronismo denominados SYN cuya finalidad es sincronizar los relojes del emisor y receptor y finaliza con otro grupo de bits de final de bloque ETB [39], en la fig. 2.10 se muestra un ejemplo de transmisión síncrona.



**Fig. 2.10** Ejemplo de transmisión síncrona [39].

### 2.2.8.1 Protocolo serie asíncrono UART

Recepción – Transmisión Asíncrona Universal es uno de los protocolos que se utiliza mayormente para la comunicación con una computadora o periférico, trabaja de

manera sencilla con dos líneas de datos, una para transmitir y otra para recibir datos. Dispone un bit inicial a nivel bajo, 8 bits de datos y un bit final a nivel alto que sirve como parada [41] como se indica en la fig. 2.11.

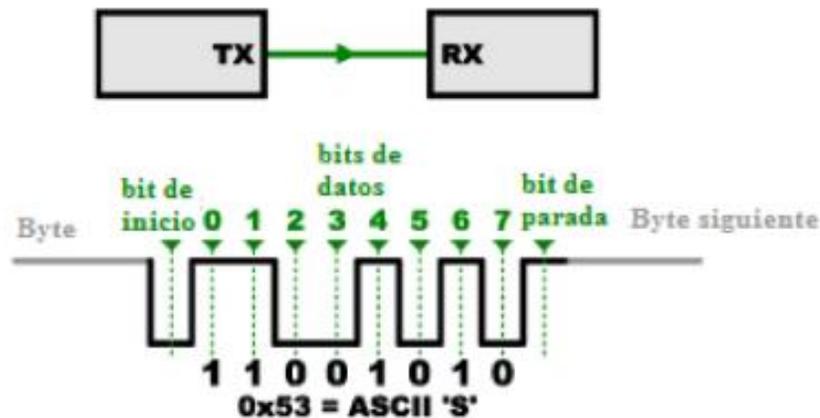


Fig. 2.11 Ejemplo de comunicación serie para la letra S [41].

Entre las principales características de este tipo de comunicación es el aviso hacia el microprocesador de cuando ha iniciado o finalizado el envío de información por medio de una interrupción o registro de estado además que serializa la información enviada y paraleliza la información recibida [38].

### 2.2.8.2 Protocolo serie síncrono I2C

Two Wire Interface utiliza tres líneas, una para el reloj SCL, otra para el dato SDA y para el aterramiento GND, el maestro es quien genera la señal de reloj por ende es el único que puede iniciar una transmisión, y tanto maestro como esclavo envían los datos por el mismo cable, se utiliza el direccionamiento para identificar que periférico ha enviado la información [41] como se visualiza en la fig. 2.12 donde existe un único  $\mu$ C maestro (microcontrolador) y tres dispositivos esclavos: ADC (Convertidor Analógico - Digital), DAC (Convertidor Digital – Analógico) y  $\mu$ C (microcontrolador).

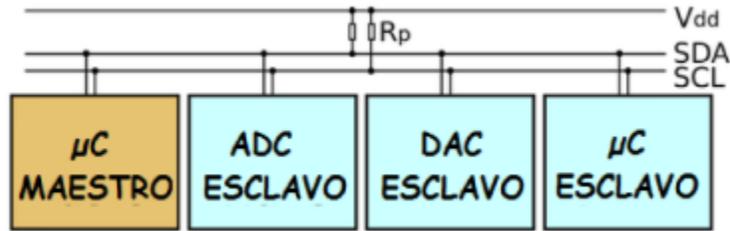


Fig. 2.12 Comunicación I2C entre varios dispositivos [41].

Las características que destacan de este tipo de protocolo de comunicación es que tiene la capacidad de sostener múltiples maestros y hasta 128 dispositivos utilizando el mismo bus ya que identifica a los dispositivos por medio de direccionamiento y controla el flujo de datos a través de mecanismos de estiramiento del reloj y reconocimiento [42].

### 2.2.11 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado independiente que consta de una unidad central de proceso CPU, que se encarga de ejecutar el conjunto de instrucciones almacenadas en una memoria, y recursos internos: Memoria RAM, memoria ROM, memoria EEPROM, puerto serie, puertos de entrada/salida, comparadores, entre otros [43], en la fig. 2.13 se presenta la arquitectura mínima de un microcontrolador.



Fig. 2.13 Arquitectura mínima de un microcontrolador [44].

Tener un único chip es el principal requisito de un sistema microcontrolador, su clasificación depende de la cantidad de bits que procesan: 8 bits son los más conocidos, 16 y 32 bits son más potentes y costosos [44].

Entre sus principales ventajas se destaca su tamaño reducido, el bajo consumo de corriente y su económico costo por lo que son una opción fiable para diversas aplicaciones en campos como: robótica, electrodomésticos, instrumentación, alarmas, sistemas de navegación espacial, industria automotriz, entre otros [45].

## **CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1 Enfoque y tipos de investigación**

El presente trabajo de titulación se desarrolla en torno a una perspectiva fundamentada en la investigación aplicada, la cual afianza los conocimientos en una o varias áreas especializadas por medio de la resolución de problemas del sector social o industrial [46]. Se evidencia el uso de este tipo de investigación ya que se implementa un sistema de medición con el propósito de mejorar el proceso de tueste por medio del monitoreo de CO<sub>2</sub>.

Además, se emplea la investigación documental, se basa en la búsqueda de datos en diversas fuentes informativas ya sea material impreso, electrónico, gráfico o audiovisual [47] y en conjunto se aplica las técnicas de la investigación de campo, la observación, exploración e interrogación [48], ya que es indispensable obtener información sobre el proceso de tostado con personal especializado.

Se aplica en el diseño del dispositivo la investigación descriptiva, ya que se puntualizan y evalúan determinadas características, en base a varios parámetros, las posibles soluciones [49]. Por último, se usa en el modelo la investigación experimental, se integra de una serie de tareas metódicas y técnicas con la finalidad de reunir datos [46], los cuales son fundamentales para validar el sistema de medición de CO<sub>2</sub>.

### **3.2 Diseño de la Investigación**

El diseño de la investigación se estructura en cuatro fases, con la finalidad de implementar un sistema de medición de CO<sub>2</sub> para monitorear el proceso de tueste en una tostadora de café. Cada fase se relaciona directamente con los objetivos específicos planteados e incluye diferentes actividades detalladas de manera continua y organizada que abarcan la investigación, el diseño, la

implementación y finalmente las respectivas pruebas de funcionamiento del dispositivo de monitoreo de CO<sub>2</sub>.

### **3.2.1. Fase 1: Determinación de los requerimientos técnicos y operativos para la medición de CO<sub>2</sub> en las tostadoras de café**

A través de esta etapa, se ejecuta una investigación detallada obteniendo información de diversas fuentes sobre el proceso de tostado de café enfocándose en la liberación de CO<sub>2</sub> y las técnicas utilizadas en la medición de este gas con el propósito de definir las características esenciales del sistema de medición.

*Actividad 1.1: Investigación sobre el proceso de tostado;* por medio de esta actividad, se identifica y analiza todos los parámetros que influyen en el proceso de tostado de café poniendo en énfasis la liberación de CO<sub>2</sub>, con esta información se busca entender el entorno en el que se va a realizar la medición de CO<sub>2</sub>, además se indaga sobre las técnicas de medición de dióxido de carbono que vayan acorde al ambiente donde se va a realizar el monitoreo.

*Actividad 1.2: Investigación sobre el funcionamiento de las tostadoras de café;* se indaga sobre la operatividad de las tostadoras de café primordialmente se toma en cuenta la máquina en la cual va a funcionar el sistema de medición con el objetivo de recabar información sobre las necesidades técnicas y operativas, así como los desafíos y consideraciones prácticas involucradas en la implementación del sistema de medición de CO<sub>2</sub>.

*Actividad 1.3: Definición de los requerimientos;* se define las características técnicas y operativas del sistema de medición de CO<sub>2</sub> en base a la información previamente recopilada. Se fijan las variables bajo las cuales el sistema debe monitorear el CO<sub>2</sub> además que se pone en

consideración criterios como la incorporación del sistema en la tostadora de café y el mantenimiento de este

### **3.2.2. Fase 2: Diseño del sistema de medición de concentración de CO<sub>2</sub> durante el proceso de tueste en función de los requerimientos**

En esta fase, se elabora el diseño del sistema de medición de CO<sub>2</sub> en base a los requerimientos anteriormente establecidos. Este proceso contiene la generación y evaluación de la solución viable haciendo uso de varios parámetros de diseño.

*Actividad 2.1: Planteamiento de la solución;* en esta actividad, se presenta la solución que cumpla con el objetivo de monitorear CO<sub>2</sub> en condiciones reales de tostado, en base a los parámetros previamente establecidos como factibilidad técnica, precio, simplicidad de implementación y mantenimiento.

*Actividad 2.2: Selección de componentes;* después de definir la solución apropiada, se escogen los materiales y componentes necesarios para el sistema de acuerdo con criterios de calidad, resistencia, compatibilidad y precio. Se considera que los materiales aseguren el funcionamiento óptimo del sistema.

*Actividad 2.3: Diseño electrónico y diagramas de conexiones;* se realiza el diseño electrónico del sistema de medición de CO<sub>2</sub>, integrando todos los componentes elegidos en un circuito. Se garantiza que el diseño cubra con el objetivo del presente trabajo, y se disponen los diagramas de conexiones primordiales para el desarrollo del sistema. Los diagramas tienen como propósito que todas las conexiones se efectúen correctamente ya que ofrecen una directriz comprensible y precisa para la instalación y configuración del sistema.

### **3.2.3. Fase 3: Implementación del sistema de medición en la tostadora de café asegurando su correcto funcionamiento**

Por medio de esta fase, se integran todos los componentes del sistema, se programa el algoritmo con el cual se va a realizar la tarea de medir el dióxido de carbono y ejecuta la incorporación del dispositivo en la tostadora de café.

*Actividad 3.1: Ensamblaje del sistema;* una vez adquiridos los componentes se integran, formando el sistema de medición para posteriormente ser instalado en la tostadora de café. Se comprueba que cada elemento esté conectado de forma correcta conforme a los diagramas de conexiones anteriormente realizados.

*Actividad 3.2: Programación del algoritmo para el dispositivo;* se inicia con la programación del algoritmo que requiere el dispositivo, incluyendo el desarrollo y carga del software, esencial para que el sistema realice las mediciones de CO<sub>2</sub> con precisión y eficiencia.

### **3.2.4. Fase 4: Pruebas de funcionamiento del sistema mediante pruebas de campo en condiciones reales de tostado**

En esta fase, se realizan las verificaciones de desempeño del sistema en un entorno real de tostado con la finalidad de evaluar su rendimiento por medio de la recopilación de las mediciones que se requieran para efectuar el monitoreo de dióxido de carbono de forma efectiva y precisa.

*Actividad 4.1: Realización de pruebas de funcionamiento;* finalmente, se evalúa el rendimiento del sistema de medición de CO<sub>2</sub> durante el proceso de tostado a través de pruebas de campo, las cuales implican realizar diferentes ciclos de tostado con el objetivo de compilar datos.

*Actividad 4.2: Ajustes del sistema;* en caso de ser necesario, se procede a realizar cambios en el sistema para maximizar la precisión y la efectividad basándose en los resultados que se

consiguieron en las pruebas de operatividad. Uno de los cambios significativos que se puede realizar es la recalibración del sensor debido al entorno en el cual va a operar. Se llevan a cabo pruebas adicionales después de realizar los ajustes para corroborar que el rendimiento del sistema sea el adecuado.

## CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

### 4.1 Requerimientos

El diseño del sistema de medición de dióxido de carbono está sujeto a cumplir ciertos requerimientos y criterios que se detallan a continuación.

- **Rango y precisión de la medición:** Se necesita tomar valores tanto mínimos como máximos además de asegurar su confiabilidad y precisión.
- **Compatibilidad al entorno operativo:** El sistema trabaja en condiciones ambientales donde influyen directamente factores como temperatura, humedad relativa y contaminantes principalmente hollín y cáscaras.
- **Visualización de datos:** Los valores tomados por el sistema de medición deben ser presentados mediante una pantalla.
- **Calibración:** Simple calibración del sensor con el cual se va a trabajar y de ser posible contar con auto calibración.
- **Mantenimiento:** El sistema debe ser accesible ya que requiere de un mantenimiento periódico, considerando el entorno bajo el cual va a funcionar, para asegurar su rendimiento y consistencia de los resultados a lo largo del tiempo.

### 4.2 Recursos disponibles

El presente trabajo de titulación cuenta para su ejecución con una tostadora de café eléctrica que se encuentra en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA). La fuente de calor de la tostadora son resistencias, el funcionamiento de este tipo de máquina se explicó en el capítulo 2.2.8, además tiene un sistema de recirculación de aire mediante un ducto y un extractor en el cual se instalará el sistema de medición para la obtención

de datos. En la fig. 2.6 se indica la máquina y en la fig. 4.1 el lugar donde se instalará el sistema para el monitorio de CO<sub>2</sub>.



Fig. 4.1 Máquina tostadora de café, vista posterior.

### 4.3 Diagrama de bloques

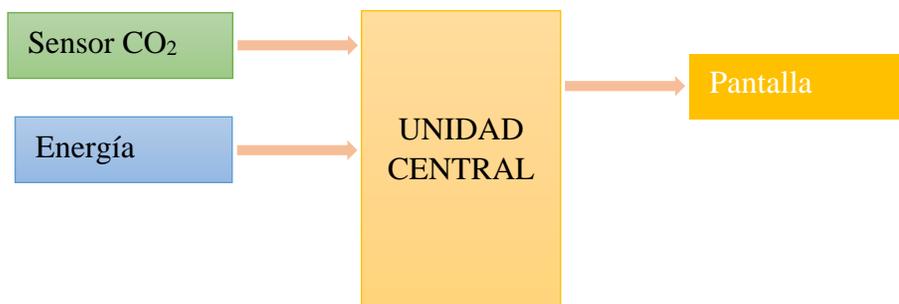


Fig. 4.2 Diagrama de bloques del sistema.

### 4.4 Caracterización del sistema

Una vez definidos los requerimientos del sistema de medición, por medio de una evaluación de criterios ponderados se realiza la selección del sensor y unidad de procesamiento garantizando como resultado la efectividad y rendimiento adecuado del sistema.

El método de criterios ponderados se trata de comparar las posibles alternativas por medio de diferentes tablas donde se califican varios parámetros a conveniencia, los valores a asignar son:

- **1:** parámetro de la fila es más importante que el parámetro de la columna.
- **0.5:** tanto el parámetro de la fila como el de la columna tienen la misma importancia.
- **0:** parámetro de la columna es más importante que el parámetro de la fila.

En este método, primero se comparan los criterios planteados para realizar la selección, se suman los valores de cada fila y se obtiene como resultado los principales criterios a tomar en cuenta. Posteriormente, se compara las posibles alternativas tomando en cuenta un único criterio generando una serie de tablas donde se obtiene cual alternativa satisface a cada criterio. Finalmente, se realiza una tabla comparativa de los criterios junto con las alternativas tomando en cuenta los valores ponderados obtenidos de las anteriores tablas, esta tabla arroja a través de valores numéricos, la opción que cumple con todos los requerimientos previamente establecidos.

#### 4.4.1 Selección del sensor de CO<sub>2</sub>

Las distintas técnicas que existen para realizar la medición de dióxido de carbono se presentaron en el capítulo 2.2.9, con ello se obtuvo una serie de sensores a estudiar para posteriormente seleccionar el adecuado en base a los siguientes requerimientos:

- **Rango de medición:** Este criterio toma en cuenta los valores de concentración de dióxido de carbono que el sensor es capaz de medir, este rango se expresa en unidades de partes por millón (ppm). Un mayor rango de medición permitirá tomar al sistema medidas más precisas.
- **Precisión:** Este criterio permite identificar que tan cerca está la medición realizada por el sensor del valor real de concentración de dióxido de carbono, una forma de expresar es

indicando el valor de grado de desviación entre la lectura del sensor y el valor real. Se preferirá una mayor precisión para evitar errores en las mediciones.

- **Entorno operativo:** En este criterio, se toma en cuenta factores como temperatura, humedad, presión, presencia de contaminantes, entre otros, del lugar en el cual el sensor va a operar. Se busca un sensor que sea apto para el lugar en el cual será instalado.
- **Temperatura de funcionamiento:** Criterio a tomar en cuenta ya que cada sensor tiene un rango de temperatura en el cual mide los datos de manera precisa. Un sensor que opera en un rango de temperatura ambiente servirá para el sistema de medición.
- **Tamaño:** En este criterio, se toma en cuenta las dimensiones del sensor, es decir, el volumen que ocupa en el montaje. Al ser un espacio limitado se necesitará un sensor compacto que facilite la instalación y posterior mantenimiento.
- **Calibración:** Criterio que asegura que el sensor mantenga su precisión a lo largo del tiempo en el lugar donde estará ubicado. Se preferirá sensores que tengan calibración automática o sea sencilla.
- **Costo:** Se refiere al valor económico además de la disponibilidad del sensor en el mercado, para mayor accesibilidad se requerirá un menor costo y una mayor disponibilidad.

En la tabla 4.1 se presenta la evaluación de criterios para la elección del sensor de medición de CO<sub>2</sub>:

**Tabla 4.1** Evaluación de criterios para la selección del sensor de CO<sub>2</sub>.

<b>SENSOR CO<sub>2</sub></b>									
	Rango de medición	Precisión	Entorno operativo	Temperatura de funcionamiento	Tamaño	Calibración	Costo	$\Sigma+I$	Ponderación
Rango de medición	-	0,5	0,5	0	1	0	1	4	16,0
Precisión	0,5	-	0,5	0,5	1	0,5	1	4,5	18,0
Entorno operativo	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	1	4	16,0
Temperatura de funcionamiento	1	0,5	0,5	-	1	0,5	0,5	4	16,0
Tamaño	0	0	0,5	0	-	0	0,5	2	8,0
Calibración	1	0,5	0,5	0,5	1	-	1	4,5	18,0
Costo	0	0	0	0,5	0,5	0	-	2	8,0
<b>SUMA</b>								<b>25</b>	<b>100,0</b>

La tabla nos da como resultado que los principales criterios a tomar en cuenta son la precisión junto con la calibración, aspectos como el rango de medición, el entorno operativo y la temperatura de funcionamiento son de igual importancia a considerar. Se tomó como posibles opciones tres sensores: SCD30, K30 y MH-Z19B, en la tabla 4.2 se muestra las principales características de estos sensores.

**Tabla 4.2** Características principales de los sensores de CO<sub>2</sub>: SCD30, K30 y MH-Z19B.

Sensor	Alimentación	Método de medición	Rango de medición	Precisión	Comunicación	Calibración	Temperatura de funcionamiento	Humedad
SCD30	5V/19mA	NDIR	400 – 10,000ppm	±30ppm	I2C UART	No	< 50°C	< 100 %RH
K30	5V/40mA	NDIR	0 – 10,000ppm 0 – 5,000ppm	±30ppm	I2C UART	No	< 50°C	< 95 %RH
MH-Z19B	5V/60mA	NDIR	400 a 5,000ppm	±50ppm	UART	No	< 50°C	< 90 %RH

Se evaluaron todos los criterios junto con los posibles sensores a utilizar ver Anexo I.

**Tabla 4.3** Resultado de la evaluación de criterios para la selección del sensor de CO<sub>2</sub>.

Sensor	Rango de medición	Precisión	Entorno operativo	Temperatura de funcionamiento	Tamaño	Calibración	Costo	Σ	%	Ponderación
SCD 30	0,0533	0,075	0,0533	0,0533	0,040	0,060	0,027	0,3617	36,17	2
K30	0,0800	0,075	0,0800	0,0533	0,013	0,060	0,027	0,3883	38,83	1
MH - Z19B	0,0267	0,03	0,0267	0,0533	0,027	0,060	0,027	0,2500	25,00	3

## **Conclusiones:**

El sensor K30 cumple con los principales criterios que son la precisión y no requiere de calibración facilitando el proceso de diseño del sistema además que es apto para el entorno operativo en el cual va a realizar las mediciones de CO<sub>2</sub> donde existen factores como temperatura y humedad relativa, se puede comunicar por medio del protocolo I2C y UART, su tamaño es adecuado y de fácil mantenimiento además que su vida útil supera los 15 años.

### **4.4.1.1 Sensor K30**

El sensor K30 es un módulo que trabaja bajo el principio de Radiación Infrarroja no Dispersiva NDIR para el monitoreo de dióxido de carbono como se explicó en el capítulo 2.2.9, es conocido en la industria por sus amplias ventajas como bajo costo, precisión, fácil mantenimiento y calibración y larga vida útil [50]. En adición, es de tamaño compacto y tiene un bajo consumo de energía idealmente diseñado para ser implementado en equipos basados en microcontroladores.

### **4.4.1.2 Pines del sensor K30**

Este sensor dispone de dos salidas analógicas y dos digitales, en la fig. 4.3 se indica las salidas a trabajar para la construcción del dispositivo de medición de CO<sub>2</sub>, en el Anexo III se encuentran todas las especificaciones de este módulo.

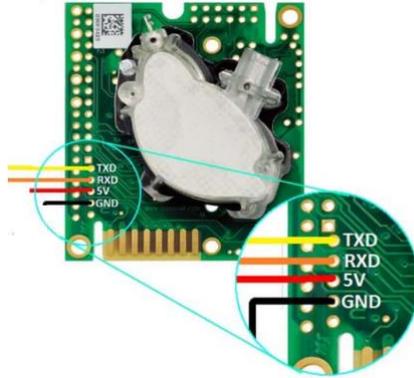


Fig. 4.3 Pines a utilizar del sensor K30 [51].

#### 4.4.2 Selección de la unidad de procesamiento

En el capítulo 2.2.11 se explicó sobre los microcontroladores y sus principales funciones, tomando en cuenta los requerimientos del sistema se consideran los siguientes criterios para la selección de la tarjeta embebida a utilizar con la finalidad de procesar los datos que arrojará el sensor ya seleccionado:

- **Comunicación:** Criterio a tomar en cuenta para la transmisión de datos. Se asegurará que el microcontrolador tenga los suficientes puertos I2C y UART para realizar las respectivas conexiones con el sensor y la pantalla.
- **Velocidad:** En este criterio se evalúa la capacidad del microcontrolador para procesar y almacenar la información enviada por el sensor. Se preferirá una mayor velocidad para que el sensor y el microcontrolador trabajen a la misma rapidez.
- **Tamaño:** Este criterio se toma en cuenta para el sistema de medición culminado, mientras más compacto sea el microcontrolador se integrará mejor con los demás componentes y así el volumen del sistema final estará en concordancia con la máquina.
- **Conectividad:** Este criterio se refiere a la capacidad del microcontrolador para enviar datos a la nube en tiempo real, útil si se desea expandir el sistema.

- **Costo:** Se buscará un microcontrolador que cumpla con un menor costo y mayor disponibilidad.
- **Programación:** Criterio a tomar en cuenta incluyendo que existan las librerías necesarias para programar las funciones con las que trabajará el sistema de medición.

**Tabla 4.4** Evaluación de criterios para la selección de la unidad de procesamiento.

UNIDAD DE PROCESAMIENTO								
	Comunicación	Velocidad	Tamaño	Conectividad	Costo	Programación	$\Sigma+1$	Ponderación
Comunicación	-	0,5	1	0,5	1	1	5	25,0
Velocidad	0,5	-	1	0,5	1	1	4,5	22,5
Tamaño	0	0	-	0	0,5	0	1,5	7,5
Conectividad	0,5	0,5	1	-	1	1	4,5	22,5
Costo	0	0	0,5	0	-	0,5	2	10
Programación	0	0	1	0	0,5	-	2,5	12,5
							<b>SUMA</b>	<b>20</b>
								<b>100,0</b>

La tabla 4.4 da como resultado que la comunicación es lo primordial a tomar en cuenta al momento de seleccionar la unidad de procesamiento, seguido de criterios como velocidad, conectividad y programación. En la tabla 4.5 se indica los datos generales de diferentes microcontroladores planteados: Arduino Uno, Arduino Mega y ESP32.

**Tabla 4.5** Características principales de los microcontroladores: Arduino Uno, Arduino Mega y ESP32.

<b>Microcontrolador</b>	<b>Alimentación</b>	<b>CPU</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Costo</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Conectividad</b>
Arduino Uno	5V	16 MHz	Compacto	\$18	I2C UART	-
Arduino Mega	5V	16 MHz	Grande	\$30	I2C UART	-
ESP32	3,3V- 5V	240 MHz	Moderado	\$15	I2C UART	Wifi – Bluetooth

Se realizó la evaluación de los criterios para la elección de la unidad de procesamiento y las posibles alternativas de microcontroladores, ver Anexo II.

**Tabla 4.6** Resultado de la evaluación de criterios para la selección de la unidad de procesamiento.

<b>Microcontrolador</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Conectividad</b>	<b>Costo</b>	<b>Programación</b>	$\Sigma$	<b>%</b>	<b>Ponderación</b>
Arduino Uno	0,0833	0,05625	0,0313	0,0563	0,033	0,042	0,3021	30,21	2
Arduino Mega	0,0833	0,05625	0,0125	0,0563	0,017	0,042	0,2667	26,67	3
ESP32	0,0833	0,1125	0,0313	0,1125	0,050	0,042	0,4313	43,13	1

## **Conclusiones:**

En cumplimiento de los principales criterios tomados para la elección del microcontrolador se obtiene que ESP32 cumple con todas las especificaciones que requiere el sistema además que su costo es económico y no necesita módulos adicionales para conectividad, otra opción viable es el Arduino Uno y poco factible el Arduino Mega por las numerosas entradas que no van a ser utilizadas.

### **4.4.2.1 ESP32**

El ESP32 es un microcontrolador integrado por Wifi y Bluetooth, cuenta con el chip ESP32-D0WDQ6 que es escalable y adaptable, la frecuencia de reloj es ajustable de 80MHz a 240Mhz, tiene 30 pines multi propósito, interfases para SD, UART, I2C, SPI de alta velocidad, Ethernet e I2S, sus niveles lógicos son de 3,3V así que requiere de un divisor de voltaje para trabajar con otros componentes con niveles lógicos de 5V, es compatible con Arduino IDE, Micro Python, Visual Studio Code, se destaca por su alto rendimiento, bajo costo y fácil integración a otros productos, es utilizado ampliamente en aplicaciones de electrónica portátil y con batería.

### **4.4.2.2 Pines del ESP32**

En la fig. 4.4 se describe cada uno de los pines contenidos en el microcontrolador ESP32 – WROOM – 32, esta placa es una parte fundamental en el sistema de medición de CO<sub>2</sub>.

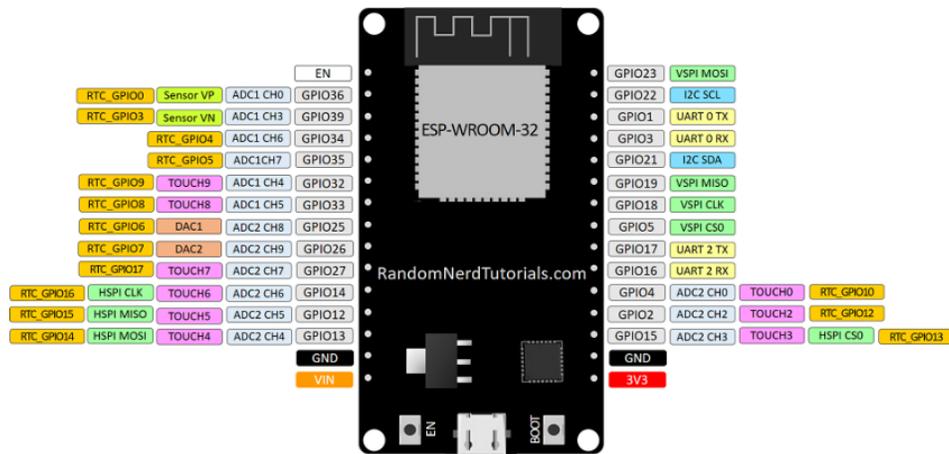


Fig. 4.4 Pines del ESP32 [52].

### 4.4.3 Pantalla LCD JHD162A

La pantalla de cristal líquido JHD162A es uno de los módulos de visualización alfanumérico más utilizados, cuenta con 16 caracteres por 2 líneas, la retroalimentación LED puede encenderse o apagarse según el requerimiento por lo cual puede servir en espacios con poca visibilidad, funciona en modo de operación de 4 u 8 bits, en la fig. 4.5 se describen sus pines.

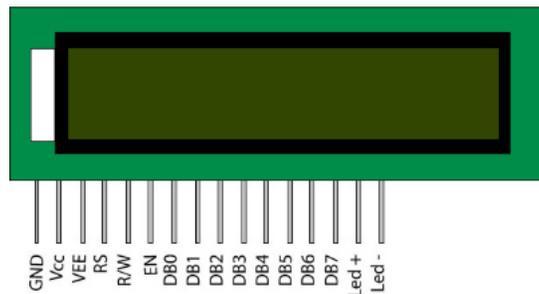


Fig. 4.5 Pines de la pantalla LCD JHD162A [53].

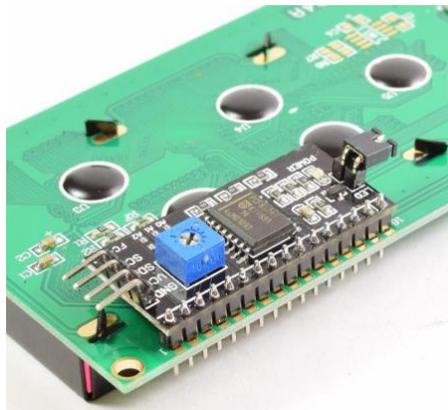
#### 4.4.3.1 Módulo LCD – I2C

Este módulo controla un LCD alfanumérico, simplifica la cantidad de pines requeridos en el microcontrolador puesto que convierte la conexión paralela de la pantalla LCD en una comunicación serie a través de I2C y facilita la programación de la pantalla al

contar con bibliotecas populares. Dispone de un potenciómetro para regular el contraste de los dígitos, en la fig. 4.6 se visualiza el módulo y en la fig. 4.7 se presenta la pantalla LCD conectada con este módulo.



**Fig. 4.6** Módulo LCD – I2C [54].



**Fig. 4.7** Módulo LCD - I2C integrado en una pantalla LCD [54].

#### **4.5 Cálculo para divisor de voltaje**

Un divisor de voltaje se basa en el principio de división de tensión, donde a mayor resistencia, mayor es la caída de tensión. Por medio de N resistencias en serie y una tensión en la fuente, se obtiene un voltaje de salida equivalente a una fracción del voltaje de entrada [55], ver ecuación (4.1), en la fig. 4.8 se observa un divisor de voltaje.

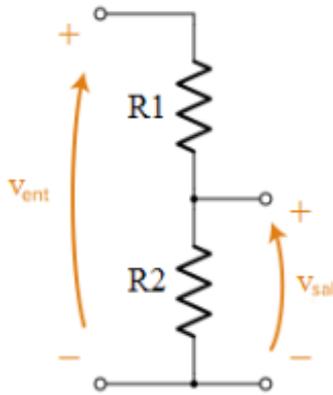


Fig. 4.8 Divisor de voltaje [56].

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde:

$V_{out}$  = Voltaje de salida

$V_{in}$  = Voltaje de entrada

$R_n$  = Resistencias en serie

Se utilizará este principio para reducir el voltaje del nivel lógico de 5V, al que opera los datos de salida y de entrada del sensor K30, a niveles lógicos de 3.3V que utiliza la ESP32.

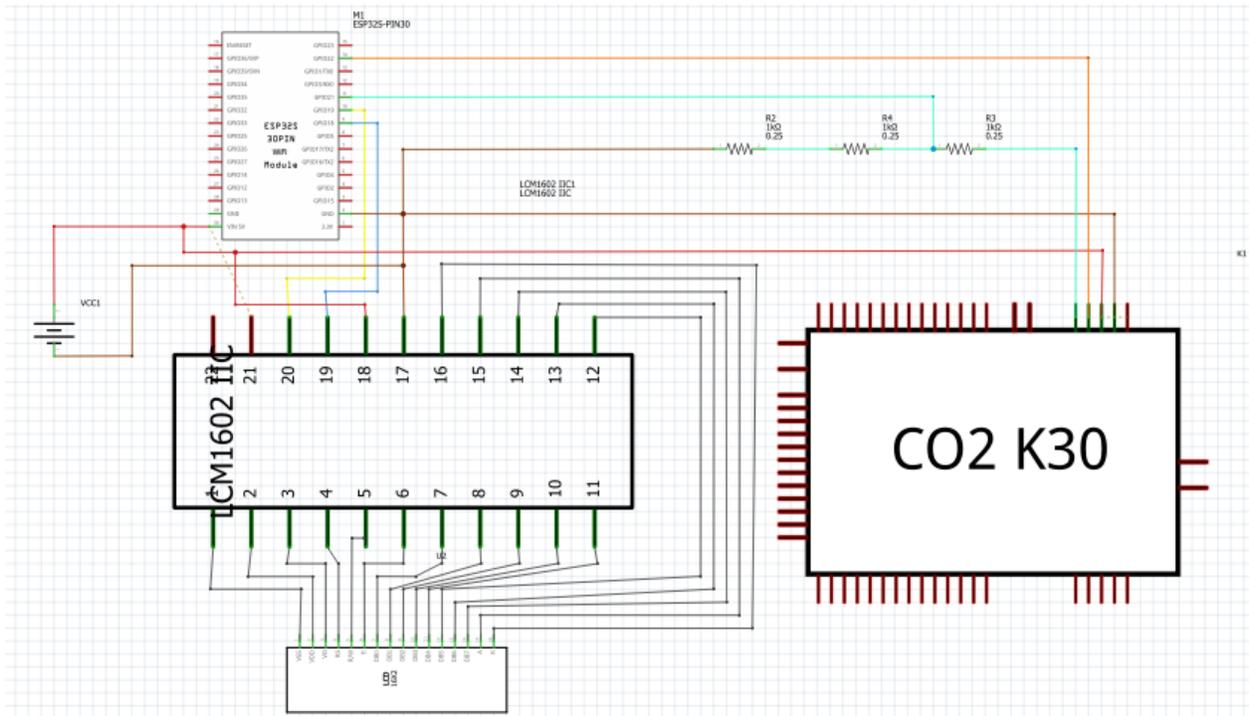
Si  $V_{out} = 3.3V$ ,  $V_{in} = 5V$  y  $R_1 = 1k\Omega$  :

$$R_2 = 2k\Omega$$

## 4.6 Conexiones

El diagrama de conexiones elaborado es la integración de todos los materiales seleccionados para el sistema de medición de dióxido de carbono, para ello se utilizó el software

libre Fritzing. En la fig. 4.9 se visualiza de forma esquemática las respectivas conexiones de los componentes, ofreciendo una directriz visual detallada y comprensible con la finalidad de que los elementos se conecten adecuadamente, además en Anexo IV se ofrece una representación gráfica de los componentes interconectados.



**Fig. 4.9** Diagrama de conexión de los componentes electrónicos.

## 4.7 Programación

La programación del algoritmo del dispositivo se realizó en base a un diagrama de flujo y pseudocódigo que permitieron detallar secuencialmente los pasos del programa para mejor comprensión, con la finalidad de garantizar la precisión y eficiencia de las mediciones de CO<sub>2</sub>, en la fig. 4.10 se observa el diagrama de flujo del funcionamiento de todo el sistema, además en la fig. 4.11 se encuentra el diagrama de flujo del algoritmo para el almacenamiento de datos en formato CSV.

#### 4.7.1 Diagrama de flujo general del dispositivo

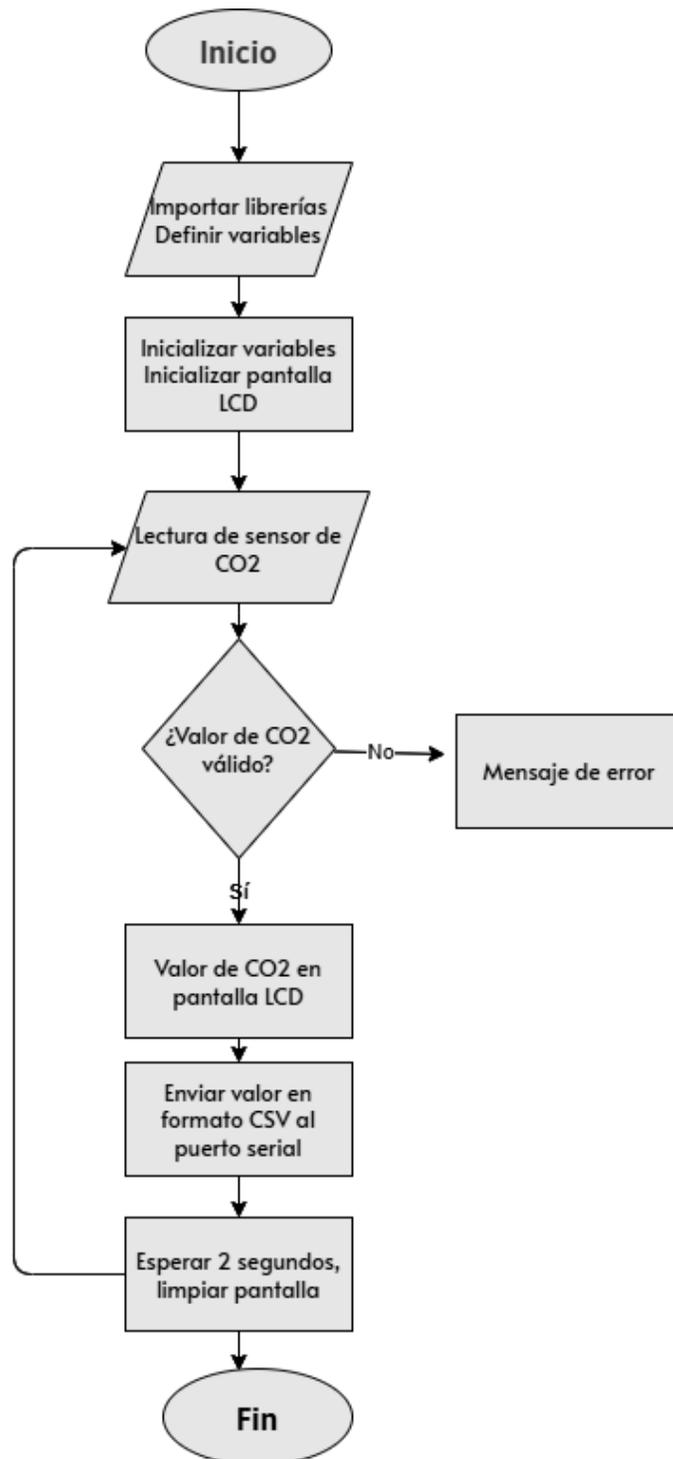


Fig. 4.10 Diagrama de flujo general del funcionamiento del sistema.

#### **4.7.2 Pseudocódigo principal**

A continuación, se presenta el pseudocódigo general del funcionamiento del dispositivo, en cumplimiento con la fig. 4.10.

##### **Inicio**

**Paso1:** Importar bibliotecas necesarias, definir variables

**Paso2:** Inicializar variables y pantalla LCD

**Paso3:** Ejecutar bucle, si el valor de CO<sub>2</sub> es válido se muestra en la pantalla y se envía en formato CSV al puerto serial, si el valor no es válido se muestra un mensaje de error

##### **Fin**

En el Anexo V se presenta el código Arduino implementado en el sistema de medición.

### 4.7.3 Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos

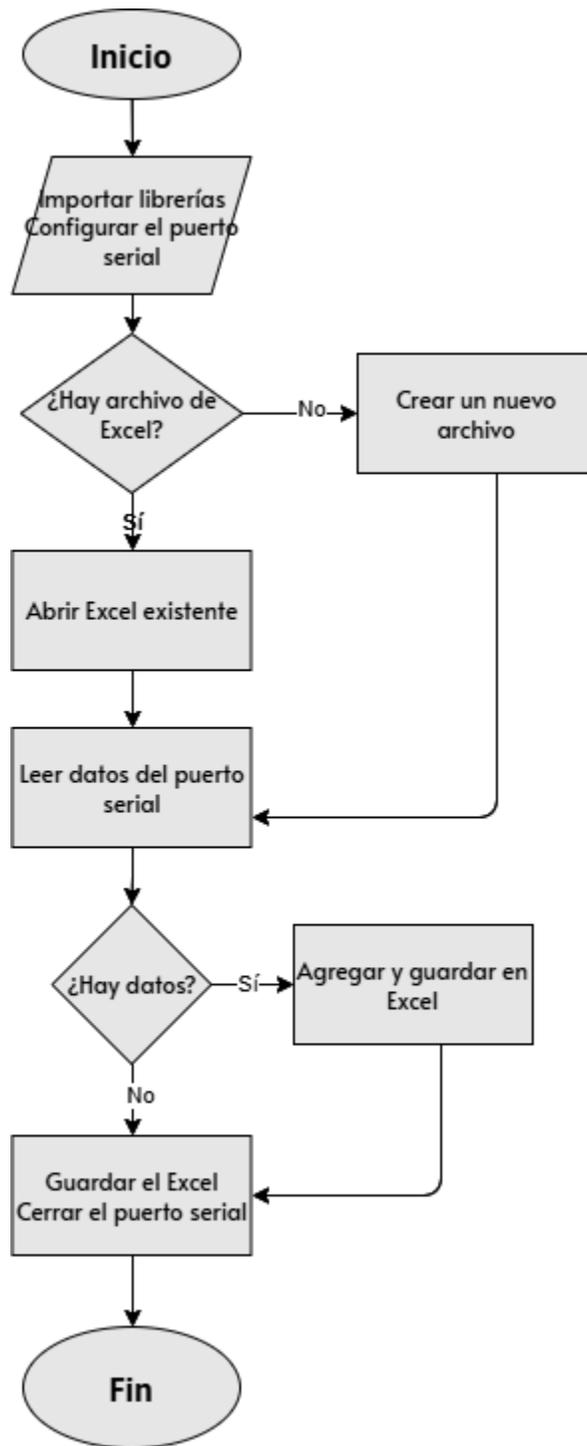


Fig. 4.11 Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en formato CSV.

#### 4.7.4 Pseudocódigo para el almacenamiento de datos

El pseudocódigo almacena los datos obtenidos por medio del puerto serial en formato CSV, como se indica en la figura 4.11.

##### **Inicio**

**Paso1:** Importar librerías, configurar puerto serial

**Paso2:** Abrir o crear un archivo Excel

**Paso3:** Se ejecuta el bucle de obtención de datos, se guarda e imprime los valores hasta que se detecte una interrupción que permite guardar el archivo Excel y cerrar el puerto serial

##### **Fin**

En el Anexo V se presenta el código en lenguaje Python implementado para el almacenamiento de datos en formato CSV.

#### 4.7.5 Librerías

Se detalla la funcionalidad de las librerías utilizadas en Arduino para la programación del dispositivo de medición de CO<sub>2</sub>:

- **“HardwareSerial.h”:** Útil para manejar comunicación serial con dispositivos adicionales, en este caso con el sensor K30, utilizando los pines UART del ESP32.
- **<Wire.h>:** Maneja la comunicación I2C para la conexión con la pantalla LCD por medio de los pines SDA y SCL.
- **<LiquidCrystal\_I2C.h>:** Controla la pantalla LCD con interfaz I2C con la finalidad de simplificar las conexiones entre la pantalla y el ESP32.

Se describe el uso de las librerías utilizadas en lenguaje Python para el almacenamiento de datos en formato CSV:

- **Serial:** Maneja la comunicación serial entre un dispositivo y la computadora, ideal para dispositivos que utilicen un puerto serial UART.
- **Openpyxl:** Sirve para manipular archivos de Excel en formato .xlsx.
- **Datetime:** Permite trabajar con fechas y horas.

## 4.8 Estructura del dispositivo y piezas de protección

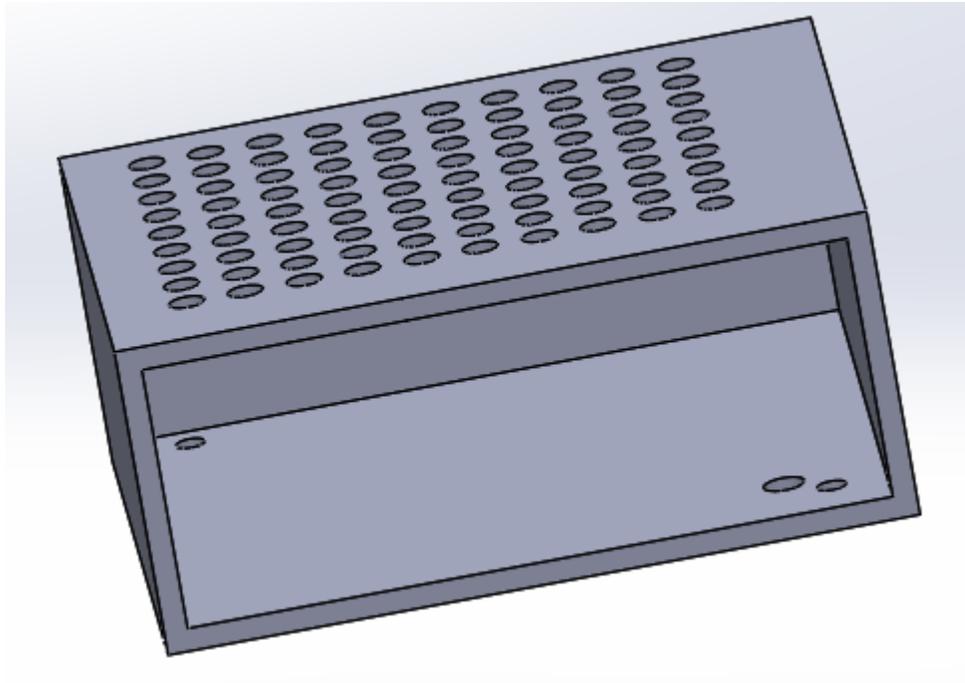
Se realizó el diseño de una pieza para cubrir el sensor debido a los factores ambientales bajo los cuales va a operar con el objetivo de brindar protección y un mantenimiento sencillo, además se realizó la estructura en la cual se encuentran los demás componentes electrónicos con la finalidad de mantener a salvo las conexiones y brindar un dispositivo intuitivo y de fácil uso. Todos los elementos fueron correctamente ubicados y sujetos por medio de pernos y tuercas.

**Tabla 4.7** Piezas del sistema de medición de CO<sub>2</sub>.

<b>Pieza</b>	<b>Cantidad</b>
Pieza protectora de sensor	1
Armazón principal	1

### 4.8.1 Pieza protectora de sensor

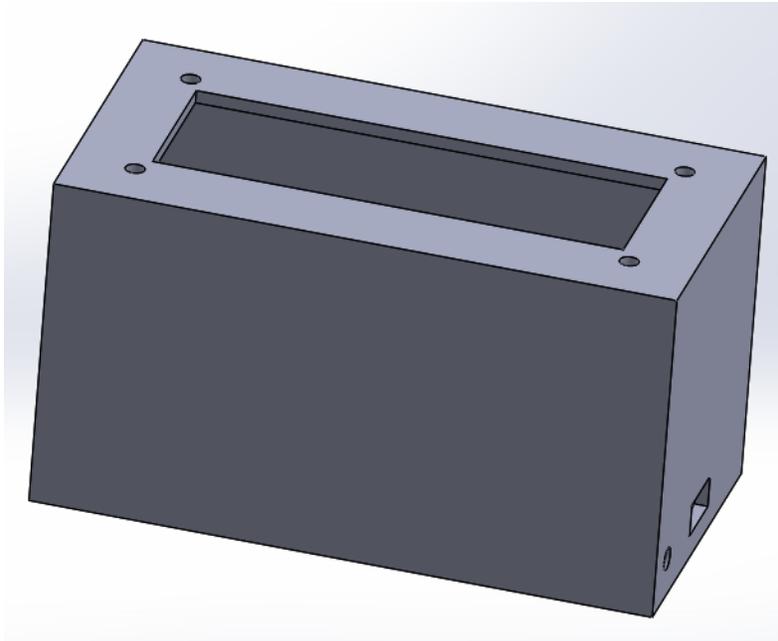
Se diseñó una caja protectora para ubicar en su interior el sensor con la finalidad de brindar la protección necesaria para que opere correctamente en el lugar donde se ubicó. Esta pieza tiene perforaciones en la parte superior para el flujo de aire, en la parte inferior tiene dos perforaciones para la sujeción de esta en el ducto de recirculación de aire que se encuentra en la máquina tostadora de café y por último tiene una tercera perforación para los cables de alimentación y comunicación como se visualiza en la fig. 4.12.



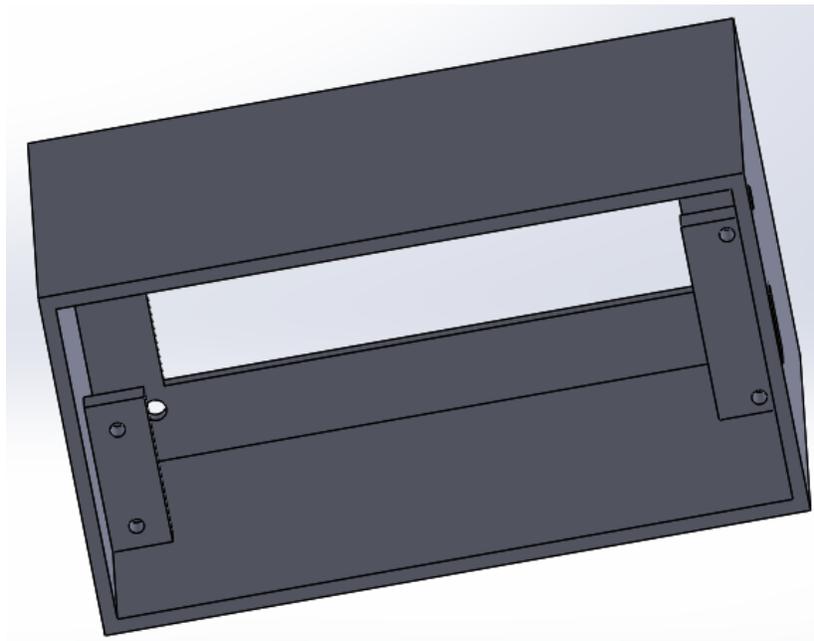
**Fig. 4.12** Pieza protectora de sensor.

#### **4.8.2 Armazón principal**

Se construyó el armazón principal del dispositivo de medición de dióxido de carbono para la pantalla LCD, el módulo LCD – I2C, el ESP32, y el divisor de voltaje. Tiene una ranura en la parte superior para ubicar la pantalla LCD y perforaciones para la sujeción de esta, en un lado se encuentra una abertura para la comunicación con el puerto serial y alimentación del sistema como se observa en la fig. 4.13. En el interior se encuentra un pequeño soporte para la sujeción del ESP32 y otro soporte para el divisor de voltaje. Todas las sujeciones se realizaron utilizando pernos y tuercas.



**Fig. 4.13** Armazón principal vista exterior.



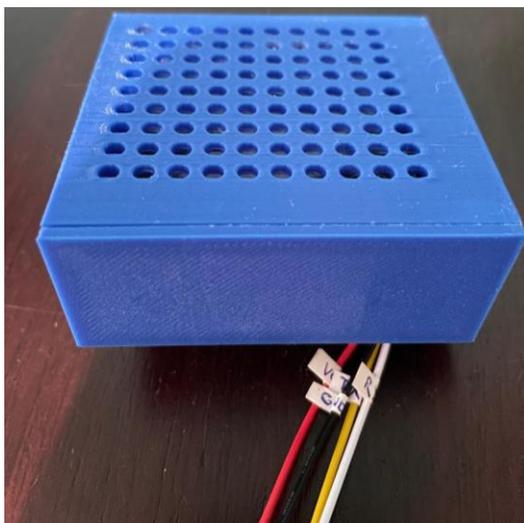
**Fig. 4.14** Armazón principal vista interior.

## 4.9 Montaje y funcionamiento

Se ensambló todos los componentes electrónicos en sus respectivas cajas. El sensor K30 se ingresó dentro de la caja protectora como se muestra en la fig. 4.15 y fig. 4.16.



**Fig. 4.15** Sensor de CO<sub>2</sub> dentro de la caja protectora, vista interior.



**Fig. 4.16** Sensor de CO<sub>2</sub> dentro de la caja protectora, vista exterior.

En el armazón principal se instaló la pantalla LCD junto con su módulo LCD - I2C, el microcontrolador y el divisor de voltaje como se visualiza en la fig. 4.17. y fig. 4.18.



Fig. 4.17 Ensamblaje del dispositivo de medición de dióxido de carbono, vista interior.



Fig. 4.18 Ensamblaje del dispositivo de medición de dióxido de carbono, vista exterior.

#### 4.9.1 Montaje

La tostadora de café en la cual se mide la concentración de dióxido de carbono cuenta con un sistema de recirculación de aire por medio de un ducto como se indicó en la fig. 4.1, este es el lugar ideal para la instalación el sensor. Además, antes de ingresar los gases por este ducto de recirculación pasan por un enfriador de aire para mantener el proceso de tostado a una temperatura constante lo que resulta beneficioso para la

operatividad del sensor sin exceder su temperatura de funcionamiento. Se instaló el sensor dentro del ducto con sus respectivas sujeciones como se muestra en la fig. 4.19.

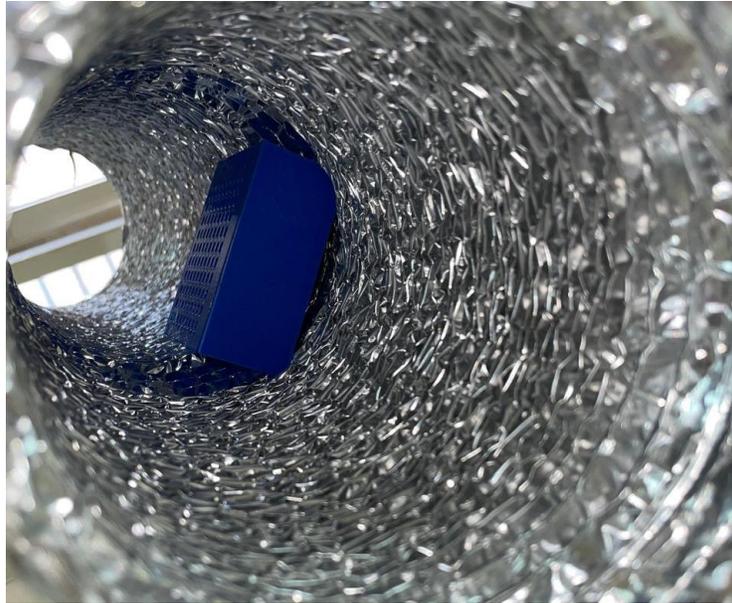


Fig. 4.19 Sensor K30 instalado en el ducto de recirculación de aire.

#### 4.9.2 Funcionamiento

El sistema de medición de CO<sub>2</sub> opera de manera correcta, una vez energizado el sistema entra en operatividad instantáneamente, mide los datos de dióxido de carbono y los muestra en la pantalla LCD a la vez que los almacena en el archivo de Excel. Este sistema cumple con los objetivos del presente trabajo ya que:

- Se obtienen los datos de concentración de dióxido de carbono
- Precisión  $\pm 30$ ppm
- Rango de medición de CO<sub>2</sub> de 0 a 5000ppm
- Dimensiones compactas tanto del sensor como del armazón principal
- Esperanza de vida >15años
- Fuente de alimentación 5V

- Sensor libre de mantenimiento ya que cuenta con calibración automática

#### 4.10 Pruebas

Las pruebas se realizaron utilizando la tostadora de café eléctrica, ver fig. 4.1, que se encuentra en los laboratorios de FICAYA, se obtuvo los siguientes resultados.

Se realizaron varias pruebas con una cantidad de 300g de café verde, con un rango de temperatura de 190 a 220° y un tiempo de 20 a 40 minutos obteniendo valores de dióxido de carbono cada 2 segundos.

De la fig. 4.20 se destacan dos grandes elevaciones en los valores de dióxido de carbono, el primer pico correspondería como se explicó en la tabla 2.1 al inicio de la liberación de los respectivos gases dando una pauta esencial para la determinación de grado de tostado de café ya que a partir de este punto se decide cuando terminar el tostado según el tipo de tueste que se desee obtener. El segundo pico corresponde a la liberación de dióxido de carbono debido a la formación de micro fisuras dentro del grano. Si se detiene después de este pico se obtiene un café de grado medio.

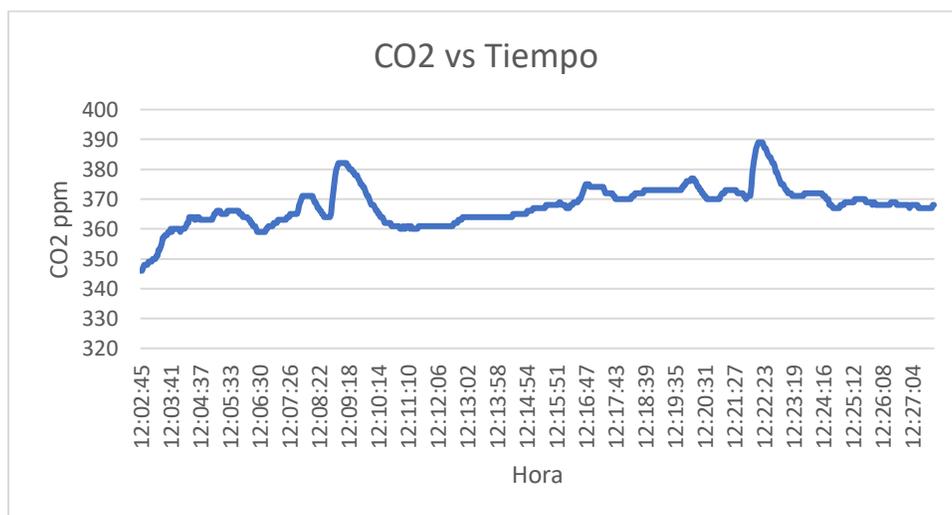
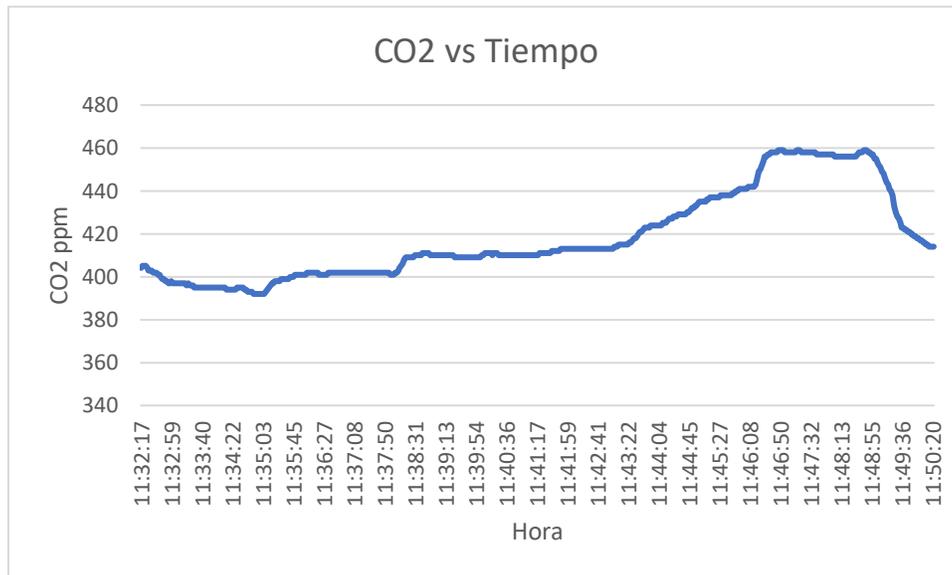


Fig. 4.20 CO<sub>2</sub> vs Tiempo.

Para obtener un café de tueste claro se debe detener el proceso después de que los valores de dióxido de carbono superen la primera elevación de valores como se muestra en la fig. 4.21. En la fig. 4.22 se observa el café de grado claro obtenido.

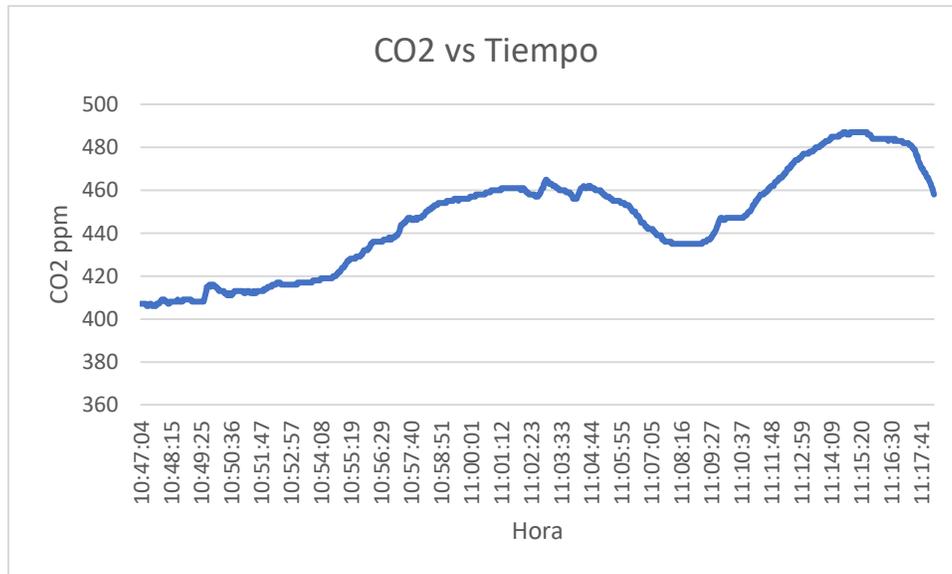


**Fig. 4.21** CO<sub>2</sub> vs Tiempo para obtener tueste claro.



**Fig. 4.22** Café tostado ligero o claro.

Para alcanzar un café de tueste medio el proceso de tostado se detiene después de alcanzar la segunda elevación de los valores de dióxido de carbono como se muestra en la fig. 4.23. En la fig. 4.24 se muestra el café de grado medio.

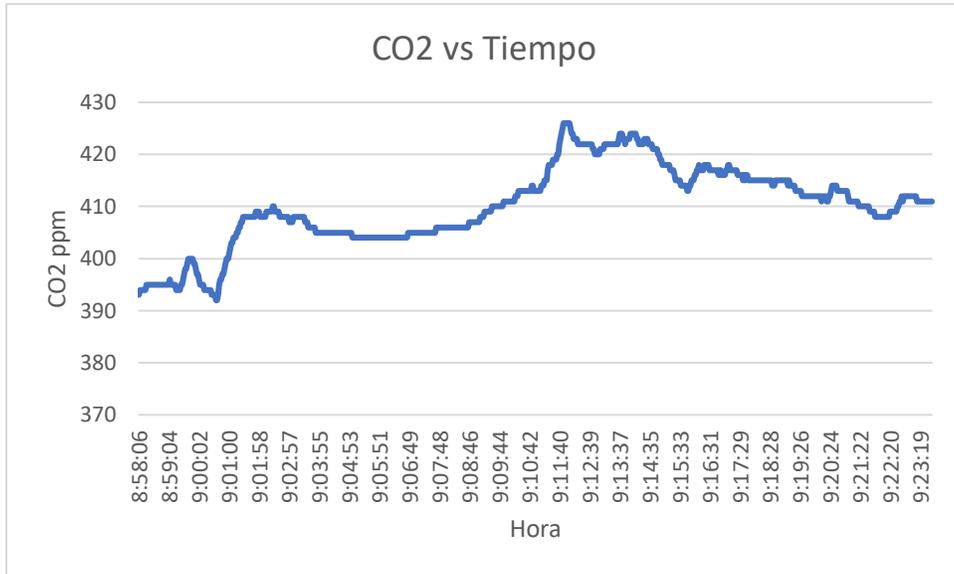


**Fig. 4.23** CO<sub>2</sub> vs Tiempo para obtener tueste medio.



**Fig. 4.24** Tueste medio.

Finalmente, para lograr un tueste de grado oscuro se debe continuar el proceso por un tiempo de aproximadamente 10 minutos después que se alcanzó la segunda elevación en los valores de CO<sub>2</sub> como se indica en la fig. 4.25. En la fig. 4.26 se observa un café de grado oscuro. Por último, en la fig. 4.27 se encuentran los tres tipos de grados de tueste alcanzados.



**Fig. 4.25** CO<sub>2</sub> vs Tiempo para obtener tueste oscuro.



**Fig. 4.26** Tueste oscuro.



**Fig. 4.27** Tipos de grado de tostado de café obtenidos de las pruebas de validación del dispositivo.

#### **4.11 Mantenimiento**

El sensor K30 es libre de mantenimiento en condiciones normales al contar con el algoritmo de corrección automática de fondo ABC, el cual, funciona tomando el valor medido más bajo durante un periodo de 180 horas y lo asume como un valor conocido para ajustar la salida según la diferencia de estos valores. En caso de ser necesario se puede desactivar esta configuración y calibrar manualmente a 400ppm, este es el valor de concentración de dióxido de carbono del ambiente.

El dispositivo opera dentro de un entorno sometido a varios factores como el hollín por lo que se debe limpiar regularmente el interior de la caja protectora y las perforaciones para evitar la acumulación los diversos residuos producidos durante el proceso de tostado de café.

## CONCLUSIONES

Se determinaron los requerimientos técnicos y operativos del sistema de medición de dióxido de carbono como el rango y precisión de la medición, la compatibilidad con el entorno operativo, la visualización de datos por medio de una pantalla y una calibración y mantenimiento simples en base al correcto funcionamiento y toma de datos del dispositivo.

Se diseñó el sistema de medición que admite la toma de muestras de datos de la concentración de dióxido de carbono considerando todas las posibles opciones para los principales componentes electrónicos y seleccionando los elementos que cumplen con los requisitos definidos.

Se ensamblaron los diferentes componentes electrónicos del sistema de medición obteniendo un dispositivo económico e intuitivo. Se implementó el sensor de CO<sub>2</sub> dentro de la tostadora de café asegurando una toma de datos precisos y confiables además que se añadió un registro de los datos tomados para su posterior análisis.

La efectividad y precisión del dispositivo se validó por medio de pruebas de campo en condiciones reales de tostado obteniendo diferentes curvas de concentración de dióxido de carbono en función del tiempo y temperatura aplicadas al momento de realizar el proceso de tueste.

## RECOMENDACIONES

Utilizar las curvas de concentración de dióxido de carbono para adecuar el sistema de control con la finalidad de obtener un café de calidad.

No instalar el sensor en lugares donde la temperatura supere los 50°, temperatura de operatividad del sensor, para evitar errores en las mediciones de los datos y posibles daños en el sensor.

Realizar el mantenimiento periódico del sensor sobre todo limpiar la caja protectora ya que debido al entorno en el cual está operando se acumula residuos como hollín y cáscaras del café y pueden obstruir a las perforaciones por las cuales circula el aire hacia el sensor.

El sensor K30 no necesita calibración debido al algoritmo de corrección ABC con el cual cuenta, en caso de desactivar esta función se recomienda la calibración periódica del mismo para evitar errores de precisión en la toma de datos.

Se podría utilizar el microprocesador para enviar los datos adquiridos a un almacenamiento en la nube evitando el uso del puerto serial.

## REFERENCIAS

- [1] S. Venegas Sánchez, D. Orellana Bueno, y P. Pérez Jara, “La realidad Ecuatoriana en la producción de café”, *RECIMUNDO*, pp. 72–91, mar. 2018, doi: 10.26820/recimundo/2.(2).2018.24-44.
- [2] A. M. Rendón-Mera, D. C. Corrales, y G. A. Peñuela Mesa, “A Systematic Mapping Study of Coffee Quality throughout the Production-to-Consumer Chain”, *J Food Qual*, vol. 2022, pp. 1–18, jun. 2022, doi: 10.1155/2022/8019251.
- [3] “Manual básico de buenas prácticas para el tostado de café”. Consultado: el 28 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/view/67301400/manual-tueste-cafe-basico>
- [4] G. Rodríguez *et al.*, “Manual básico del catador de café Tueste de café”, 2020.
- [5] P. González, “Ecuador industrializa café en grano de Vietnam y Brasil”, *Primicias*, el 20 de marzo de 2023.
- [6] M. Chango y J. García, “Análisis de la competitividad de las exportaciones de café de Ecuador versus Colombia y Brasil hacia el mercado de USA”, *X-Pendientes Económicos*, vol. 5, 2021.
- [7] A. Falah, M. Rivai, y D. Purwanto, “Implementation of gas and sound sensors on temperature control of coffee roaster using fuzzy logic method”, *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*.
- [8] Samsidar *et al.*, “Integration of Gas Sensors as an Exhaust Gas Monitoring Device from Green Roasting Process of Various Coffee Beans”, *J Phys Conf Ser*, vol. 1282, núm. 1, p. 012024, jul. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1282/1/012024.
- [9] X. Wang y L.-T. Lim, “Effect of roasting conditions on carbon dioxide degassing behavior in coffee”, *Food Research International*, vol. 61, pp. 144–151, jul. 2014, doi: 10.1016/j.foodres.2014.01.027.
- [10] A. Illy y R. Viani, *Espresso Coffee*. Italia : Elsevier Academic Press, 2005.
- [11] I. Astiasarán y A. Martínez, *Alimentos Composición y Propiedades*. España: McGraw-Hill, 2000.
- [12] D. Ávila y A. González, *El proceso de producción cafetalero en la Región Vertiente del Golfo de México*. México: Plaza y Valdés, 2016.
- [13] M. C. Porras-Zúñiga, G. Vargas-Elías, L. Araúz- Madrid, y Y. N. Abarca-Alpizar, “Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café”, *Revista Tecnología en Marcha*, abr. 2019, doi: 10.18845/tm.v32i7.4255.
- [14] F. J. Barriga Paredes, “Diseño de un sistema HACCP en planta de procesamiento de café en la finca ‘La Estancia de Pacho’ ubicada en Nanegalito”, Universidad de las Américas, Ecuador, 2018.

- [15] V. M. Coello Ochoa, “Diseño y construcción de una máquina tostadora de café con capacidad de 3Kg utilizando una fuente energética de biomasa (pellets)”, Escuela Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2023.
- [16] “Tueste Claro, Canela, City: ¿Qué Significan Estos Nombres? - Perfect Daily Grind Español”. Consultado: el 29 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://perfectdailygrind.com/es/2020/01/17/tueste-claro-canela-city-que-significan-estos-nombres/>
- [17] Real Academia Española, “Organoléptica”, 2014.
- [18] R. Abarca Mora, “Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional”, Universidad de Costa Rica, Costa Rica , 2017.
- [19] Á. Gómez, “La reacción de Maillard y su impacto en la salud”, Universidad de Sevilla, 2020.
- [20] M. D. Castillo y A. Iriondo, *El café*, vol. 1. Madrid, 2023.
- [21] M. Arroyo y A. Ramírez-Monroy, “Dióxido de carbono, sus dos caras”, *Anales de Química*, vol. 116, 2020.
- [22] H. y D. S. Dirección de Seguridad, “Instructivo para uso de medidores de dióxido de carbono”.
- [23] M. Rizzotto, *Diccionario de química general e inorgánica*. Argentina : Corpus Editorial, 2007.
- [24] G. I. Puerta Quintero y L. F. Echeverri Giraldo, “Relaciones entre las concentraciones de compuestos químicos del café y las temperaturas de torrefacción”, *Cenicafé*, pp. 67–80, 2019.
- [25] L. Virgen Navarro, E. Herrera López, H. Espinosa Andrews, G. Guatemala Morales, R. Corona González, y E. Arriola Guevara, “Estimación del coeficiente de difusividad durante el tostado de café en un lecho fuente utilizando un modelo difuso”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química* , México, pp. 513–524, el 29 de enero de 2016.
- [26] L. Bernabé Dávila y C. Rivera Calongos, “Diseño de una máquina tostadora de café mediante flujo del aire caliente en lecho fluidizado para una capacidad de una tonelada”, Universidad Señor de Sipán, Perú, 2018.
- [27] R. De la Cruz Casaño, “Influencia del tipo de perfil de tostado del café en la calidad en taza para una tostadora de 2Kg”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, 2018.
- [28] C. Rincones Castañeda, “Diseño de prototipo a escala de tostadora de café ”, Universidad de los Andes, 2017.
- [29] C. D. Castillo Rivera, “Sistema de control de temperatura de una máquina tostadora de café alimentada con gas licuado de petróleo”, Universidad Técnica del Norte, Ecuador , 2023.

- [30] J. P. Pozo Enríquez, “Diseño y construcción de un tostador por resistencias eléctricas para la elaboración de café de quinua con capacidad de 25 libras”, Universidad Técnica del Norte , Ecuador , 2016.
- [31] W. Zheng, X. Zhang, X. Qiao, H. Yan, y W. Wu, “The design of smart wireless carbon dioxide measuring instrument used in Greenhouse”, en *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture*, China, ene. 2010, pp. 75–83.
- [32] L. G. Corona Ramírez y G. S. Abarca Jiménez, *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino (2a. ed.)*, 2a ed. México: Grupo Editorial Patria, 2019.
- [33] Vaisala, “Mediciones de dióxido de carbono”. [En línea]. Disponible en: <https://www.vaisala.com/>
- [34] Praxair, “Principios detección de gas”, Casella. [En línea]. Disponible en: <https://www.ucm.es/>
- [35] Prana Air, “Sensor de dióxido de carbono NDIR”. [En línea]. Disponible en: <https://www.pranaair.com/>
- [36] Globe Thesis, “Design and experiment research of carbon dioxide detection based on infrared spectrum absorption theory”. [En línea]. Disponible en: <https://globethesis.com/?t=2178360272997608>
- [37] M. Santos González y J. C. Moreno Pérez, *Sistemas informáticos y redes locales*. Madrid: RA-MA Editorial , 2015.
- [38] N. Oliva, *Redes de comunicaciones industriales*. Madrid : Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.
- [39] A. D. Perez, “Protocolos de comunicación entre microcontroladores. Caso de estudio: Protocolo CAN ”, Universidad Nacional de la Plata, 2016.
- [40] EMA Design Automation, “Protocolos de comunicación serial y paralela para dispositivos electrónicos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.ema-eda.com/>
- [41] R. E. Pérez Guzmán y O. González Rivero, *Prototipo de adquisición de señales biológicas utilizando Arduino* . La Habana: Editorial Universitaria , 2016.
- [42] O. Weis, “Protocolos de comunicación. Principales tipos de transferencia serie.”, Serial Port Monitor. [En línea]. Disponible en: <https://www.serial-port-monitor.org/>
- [43] C. Doblado Alcázar, J. González Gómez, A. Prieto Moreno, y J. J. San Martín, *Microcontrolador 68HC11: Fundamentos, Recursos y Programación*. España.
- [44] I. Dogan, *Programación de microcontroladores PIC* . Barcelona: Marcombo, 2008.
- [45] N. F. Penagos Quintero, *Microcontroladores Microchip, Atmel, NXP - freescale y Texas instruments: pasos* . Bogotá: Universidad Piloto de Colombia, 2018.

- [46] A. Cevallos, E. Polo, y D. Salgado, *Métodos y técnicas de investigación*, Grupo Compás. Ecuador, 2017.
- [47] H. Martínez, *Metodología de la investigación*, Cengage Learning. México, 2012.
- [48] G. M. E. Baena Paz, *Metodología de la investigación*, Editorial Patria. México, 2017.
- [49] R. Hernández, C. Fernández-Collado, y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, McGraw-Hill., vol. 4. México, 2006.
- [50] CO2 Meter: Gas Measurement Specialists, “CO2 Sensor”. [En línea]. Disponible en: <https://www.co2meter.com/>
- [51] Autodesk Instructables, “Measure CO2 levels with Arduino and K-30 Sensor”. [En línea]. Disponible en: <https://www.instructables.com/>
- [52] G. Florian, “ESP32 Wroom-32 (30)Pin Layout”, ESPRESSIF ESP32. [En línea]. Disponible en: <https://esp32.com/>
- [53] PotentialLabs, “16x2 LCD Display”. [En línea]. Disponible en: <https://potentiallabs.com/cart/>
- [54] “Tutorial LCD con I2C”, NAYLAMP MECHATRONICS. [En línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/>
- [55] C. Alexander y M. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos* , Quinta Edición. Mc Graw Hill Education, 2013.
- [56] W. McAllister, “Divisor de voltaje”, Khan Academy . [En línea]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/>

## ANEXOS

### Anexo I: Evaluación de opciones de sensor de CO<sub>2</sub>

Rango de medición	SCD 30	K30	MH-Z19B		Ponderación
SCD 30	-	0	1	2	33,3
K30	1	-	1	3	50,0
MH-Z19B	0	0	-	1	16,7
			SUMA	6	100,0

Precisión	SCD 30	K30	MH-Z19B		Ponderación
SCD 30	-	0,5	1	2,5	41,7
K30	0,5	-	1	2,5	41,7
MH-Z19B	0	0	-	1	16,7
			SUMA	6	100,0

Entorno operativo	SCD 30	K30	MH-Z19B		Ponderación
SCD 30	-	0	1	2	33,3
K30	1	-	1	3	50,0
MH-Z19B	0	0	-	1	16,7
			SUMA	6	100,0

Temperatura de funcionamiento	SCD 30	K30	MH-Z19B		Ponderación
SCD 30	-	0,5	0,5	2	33,3
K30	0,5	-	0,5	2	33,3
MH-Z19B	0,5	0,5	-	2	33,3
			SUMA	6	100,0

Tamaño	SCD 30	K30	MH-Z19B		Ponderación
SCD 30	-	1	1	3	50,0
K30	0	-	0	1	16,7
MH-Z19B	0	1	-	2	33,3
			SUMA	6	100,0

Calibración	SCD 30	K30	MH-Z19B		Ponderación
SCD 30	-	0,5	0,5	2	33,3
K30	0,5	-	0,5	2	33,3
MH-Z19B	0,5	0,5	-	2	33,3
			SUMA	6	100,0

Costo	SCD 30	K30	MH-Z19B		Ponderación
SCD 30	-	1	0,5	2,5	41,7
K30	0	-	0	1	16,7
MH-Z19B	0,5	1	-	2,5	41,7
			SUMA	6	100,0

## Anexo II: Evaluación de opciones de unidad de procesamiento

Comunicación	Arduino Uno	Arduino Mega	ESP 32		Ponderación
Arduino Uno	-	0,5	0,5	2	33,3
Arduino Mega	0,5	-	0,5	2	33,3
ESP 32	0,5	0,5	-	2	33,3
			SUMA	6	100,0

Velocidad	Arduino Uno	Arduino Mega	ESP 32		Ponderación
Arduino Uno	-	0,5	0	1,5	25,0
Arduino Mega	0,5	-	0	1,5	25,0
ESP 32	1	1	-	3	50,0
			SUMA	6	100,0

Tamaño	Arduino Uno	Arduino Mega	ESP 32		Ponderación
Arduino Uno	-	1	0,5	2,5	41,7
Arduino Mega	0	-	0	1	16,7
ESP 32	0,5	1	-	2,5	41,7
			SUMA	6	100,0

Conectividad	Arduino Uno	Arduino Mega	ESP 32		Ponderación
Arduino Uno	-	0,5	0	1,5	25,0
Arduino Mega	0,5	-	0	1,5	25,0
ESP 32	1	1	-	3	50,0
			SUMA	6	100,0

Costo	Arduino Uno	Arduino Mega	ESP 32		Ponderación
Arduino Uno	-	1	0	2	33,3
Arduino Mega	0	-	0	1	16,7
ESP 32	1	1	-	3	50,0
			SUMA	6	100,0

Programación	Arduino Uno	Arduino Mega	ESP 32		Ponderación
Arduino Uno	-	0,5	0,5	2	33,3
Arduino Mega	0,5	-	0,5	2	33,3
ESP 32	0,5	0,5	-	2	33,3
			SUMA	6	100,0

## Anexo III: Datasheet Sensor K30

### Datasheet: K-30 Sensor

The K30 sensor is a low cost, infrared and maintenance-free transmitter module intended to be built into different host devices that require CO2 monitoring data.

#### Applications

The K30 is an accurate, yet low cost gas sensing solution for OEMs who wish to integrate CO2 gas sensing into their product without investing in their own gas sensor development. The compact sized and low powered module is intended to be an add-on component to compliment other microprocessor-based controls and equipment.

The K30 may be software customized in different ways in order to optimize the total system with respect to the OEM application.

The K30 is offered for installation in OEM IAQ sensor housings, OEM air handling units, OEM alarm sensor housings, among other applications. The only restriction for what this product can be used for is the creativity and inventiveness of the customer.

This new product version is a RoHS compliant upgrade replacing the former the K30 product, has the same key product performance, but now has an improved speed of response and a reduced spatial build-in height.



#### Terminal Descriptions

The table below specifies what terminals and I/O options are available in the general K30 platform (see also the layout picture Fig. 2). Please note, however, that in the K30-STA default configuration, only OUT1, OUT2, OUT3, OUT4, Din1, Din2 and Status have any pre-programmed functions. These are described in the chapter "Default Configuration".

Functional group	Descriptions and ratings
<b>Power supply</b>	
G+ referred to G0:	Absolute maximum ratings 5.5 to 14V, stabilized to within 10% 5V to 9V preferred operating range. <b>Unprotected against reverse connection!</b>
<b>Serial Communication</b>	
UART (Tx/D, Rx/D)	CMOS, ModBus communication protocol. Logical levels corresponds 3.3V powered logics. Refer " <i>ModBus on CO2 Engine K30</i> " for electrical specification.
<b>Outputs</b>	
OUT1	Buffered linear output 0..4 or 1..4VDC or 0..10V or 2..10V, depending on specified power supply and sensor configuration. ROUT < 100 W, RLOAD > 5 kW <b>Load to ground only!</b> Resolution 10mV (8.5 bits in the range 0..4V).
OUT2	Buffered linear output 0..4 or 1..4VDC or 0..5V or 1..5V, depending on specified power supply and sensor configuration. ROUT < 100 W, RLOAD > 5 kW <b>Load to ground only!</b> Resolution 5mV Can be used as alternative for OUT1, or for a second data channel, or in an independent linear control loop, such as a housing temperature stabilization
OUT3	CMOS <b>unprotected</b> . Digital (High/Low) output. High Output level in the range 2.3V min to DVDD = 3.3V. (1 mA source) Low output level 0.75V max (4 mA sink)

	Can be used for gas alarm indication, or for status indication etc.
OUT4	CMOS <b>unprotected</b> . Digital (High/Low) output. High Output level in the range 2.3V min to DVDD = 3.3V. (1 mA source) Low output level 0.75V max (4 mA sink) Can be used for gas alarm indication, or for status indication etc.
Status	CMOS <b>unprotected</b> . High Output level in the range 2.3V min to DVDD
	DVDD Regulated Voltage Output 3.3V to 50mA
<b>Inputs</b>	
Din0, Din1, Din2, Din3, Din4	Digital switch inputs, pull-up 120k to DVCC 3.3V. Driving it Low or connecting to ground G0 activates input. Pull-up resistance is decreased to 4..10k during read of input or jumper. Advantages are lower consumption most of the time the input/jumper is kept low and larger current for jumpers read in order to provide cleaning of the contact. Can be used to initiate calibration or to switch output range or to force output to predefined state. All depends on customer needs.
<b>I2C extension.</b>	
See our I2C Comm. guide	Pull-up of SDA and SCL lines to 3.3V

**Table 1.** I/O notations used in this document for the K30 platform with some descriptions and ratings. Please, beware of **the red colored texts that pinpoint important features** for the system integration!



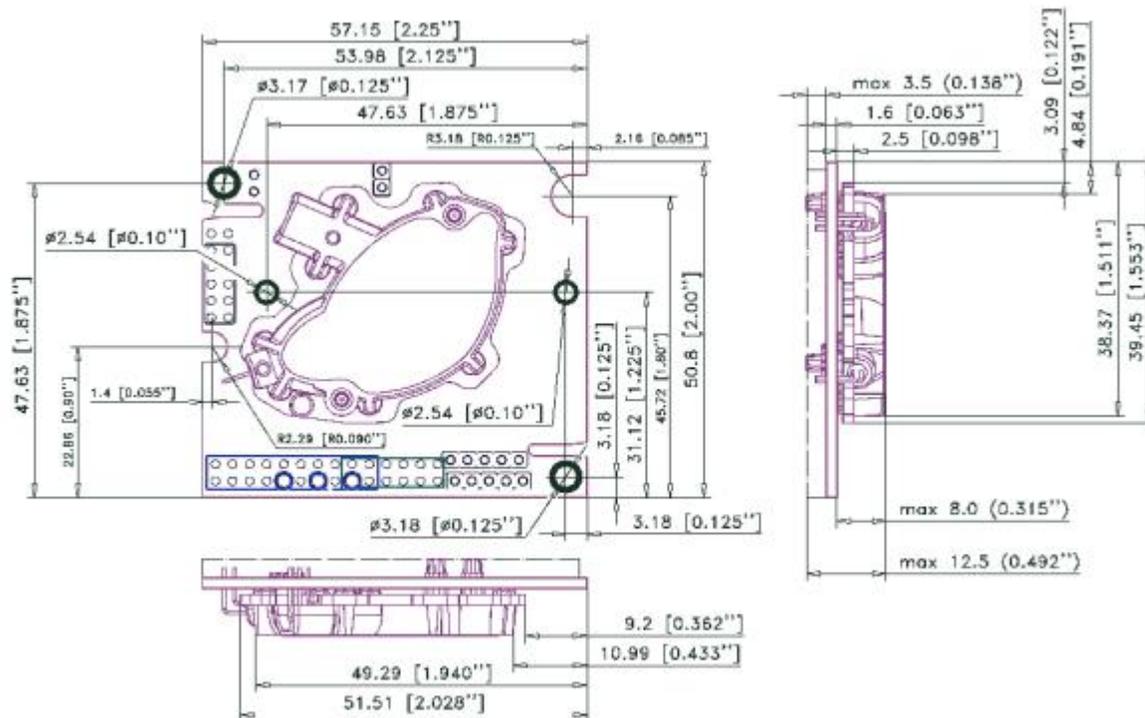


Figure 4. K30 mechanical drawing.

## Installation

The modules are factory calibrated and ready for use directly after power up. There are several alternative ways to connect the K30 to a host system (see also Figure 2):

1. Using "UART connector", including terminals for power supply (G+ and G0), UART (TxD, RxD).
2. Using the 3 pins main terminal. Available signals are power supply (G+ and G0) and the buffered analogue output (OUT1). A variety of user selections exist for this option regarding standard 5.08 mm pitch components and mounting alternatives (top/bottom).
3. Using 20 pin connector strips, or IDC connector, most of the system information is reached.

### Host Integration Considerations and EMI Shielding

If an IDC connector is being used to connect the K30 module to a host PCB, this connector can in some situations be used as the only fixture. If instead fixing the K30 PCB using mechanical poles and screws, no more than 2 positions should be considered. This is because the PCB should not be exposed to any mechanical stress, and it is small and lightweight enough for just 2 attachment points.

To provide means for attachments, there are 4 possible screw holes available, all of them having a collar that is electrically connected to ground (G0). These connections are, however, not totally equivalent:

The two screw points in the upper left corner (having the IDC and edge connectors faced downwards, as in Figure 2) are connected to the analogue ground. They are the preferred choice for connection to some EMI shield, if so is required. This is normally necessary only if the application is such that large EMFs are foreseen. If this option is being used, precaution must be taken so as to exclude any power supply currents! Sensor reading instability is an indication of the need for shielding, or of improper enclosure system groundings.

The two screw points in the right bottom corner are connected to the digital ground. Connection to some EMI housing shield is less effective when this option is used, but on the other hand the sensor may be powered via these connections.

**Note 1:** To avoid ground loops, one should avoid connecting the analogue and digital grounds externally! They are connected internally on the K30 PCB.

**Note 2:** The terminals are not protected against reverse voltages and current spikes! Proper ESD protection is required during handling, as well as by the host interface design.

## Default Functions / Configuration

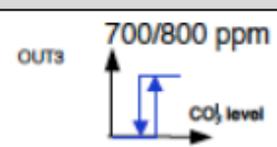
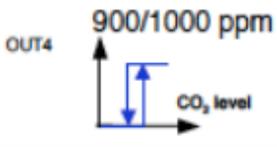
### Outputs

The basic K30-STA configuration is a simple analogue output sensor transmitter signal directed to OUT1 and OUT2. Via the edge connector serial communication terminal, the CO<sub>2</sub> readings are available to an even higher precision (Modbus protocol), together with additional system information such as sensor status, analogue outputs, and other variables.

Terminals	Output	Correspondence
OUT1	0,0...4,0 VDC	0...2,000 ppm CO <sub>2</sub>
OUT2	1,0...5,0 VDC	0...2,000 ppm CO <sub>2</sub>

**Table 2.** Default analogue output configuration for K30-STA

The basic K30-STA configuration provides digital outputs to indicate if CO<sub>2</sub> concentration exceeds alarm threshold.

Terminals	Output	Correspondence
OUT3	Logical levels: Low < 0.75V High = 5V	
OUT4	Logical levels: Low < 0.75V High = 5V	

**Table 3.** Default digital output configuration for K30-STA

### Calibration

The default sensor OEM unit is maintenance free in normal environments thanks to the built-in self-correcting ABC algorithm (Automatic Baseline Correction). This algorithm constantly keeps track of the sensor's lowest reading over a 7.5 days interval and slowly corrects for any long-term drift detected as compared to the expected fresh air value of 400 ppm CO<sub>2</sub>.

### Defaults

- K30 Sensors – ABC on by default
- K30 SDKs – ABC off by default
- For applications where the sensor will never read 400ppm (fresh) air, the K30 should be ordered with ABC disabled.

## Manual Calibration

Rough handling and transportation may reduce sensor reading accuracy. With time, the ABC function will tune the readings back to the correct numbers. The default "tuning speed" is however limited to about 30 ppm/week. For post calibration convenience, in the event that one cannot wait for the ABC algorithm to cure any calibration offset, or if ABC is disabled, two switch inputs - Din1 and Din2 - select of two prepared calibration codes. If Din1 is shorted to ground for a minimum of 8 seconds, the internal calibration code bCAL (background calibration) is executed, in which case it is assumed that the sensor is operating in a fresh air environment (400 ppm CO<sub>2</sub>). If Din2 is shorted for a minimum of 8 seconds, the alternative operation code CAL (zero calibration) is executed in which case the sensor is assumed to be in a gas mixture free from CO<sub>2</sub> (i.e. Nitrogen or Soda Lime CO<sub>2</sub> scrubbed air).

Input Switch Terminal (normally open)	Default function (when closed for minimum 8 seconds)
Din1	bCAL (background calibration) assuming 400 ppm CO <sub>2</sub> sensor exposure
Din2	CAL (zero calibration) assuming 0 ppm CO <sub>2</sub> sensor exposure

**Table 3.** Switch input default configurations for K30

## Manual Calibration Procedure

The 0ppm CO<sub>2</sub> calibration procedure is as follows. For fresh air, skip steps 1-2.

1. Connect the sensor on top with a tube (soft tubing 2x4 mm) and a nipple (nylon tubing 30x0.8x2.2 mm), see Figure 4 below. There are 2 alternative positions for nipple attachment.
2. Let a gas mixture flow into the sensor through the applied tube. The flow shall be in the range of 0.3 – 1.0 liter/minute during 3 minutes. Keep the gas mixture flowing during the whole procedure.
3. Short circuit the Din2 (Din1 for fresh air) for a minimum of 8 seconds.
4. Verify the zero calibration. The meter will show 0 ppm CO<sub>2</sub> (400ppm for fresh air).
5. If zero calibration is not executed (sensor detects unstable gas concentration) wait 10 sec and repeat steps 3 and 4 again.

**Human breath contains 300,000ppm CO<sub>2</sub>. Do not breath anywhere near the sensor, or the fresh air will be contaminated!**



**Figure 4.** K30 with connected tube

## Self-Diagnostics

The system contains complete self-diagnostic procedures. A full system test is executed automatically every time the power is turned on. In addition, constantly during operation, the sensor probes are checked against failure by checking the valid dynamic measurement ranges. All EEPROM updates, initiated by the sensor itself, as well as by external connections, are checked by subsequent memory read back and data comparisons. These different system checks return error bytes to the system RAM. If this byte is not zero, the logic output terminal Status will be put into Low level state. The full error codes are available from the UART port or via I2C communication. Offset regulation error and Out of Range are the only bits that are reset automatically after return to normal state. All other error bits have to be reset after return to normal by UART overwrite, or by power off/on.

Output Terminal	Default function
Status	High level = OK ; Low level = Fault

**Table 5.** Default Logic output configured for K30

## Error Codes and Action Plan

Error codes can be read via one of communication channels.

Bit #	Error code	Error description	Suggested action
0	1	<b>Fatal Error</b>	Try to restart sensor by power OFF/ON. Contact local distributor.
1	2	<b>Offset regulation error</b>	Try to restart sensor by power OFF/ON. Contact local distributor.
2	4	<b>Algorithm Error.</b> Indicate wrong EEPROM configuration.	Try to restart sensor by power OFF/ON. Check detailed settings and configuration with software tools. Contact local distributor.
3	8	<b>Output Error</b> Detected errors during output signals calculation and generation.	Check connections and loads of outputs. Check detailed status of outputs with software tools.
4	16	<b>Self-Diagnostic Error.</b> May indicate the need of zero calibration or sensor replacement.	Check detailed self-diagnostic status with software tools. Contact local distributor.
5	32	<b>Out Of Range Error</b> Accompanies most of other errors. Can also indicate overload or failures of sensors and inputs. Resets automatically after source of error disappearance.	Check connections of temperature and relative humidity probe (if mounted). Try sensor in fresh air. Perform CO2 background calibration. Check detailed status of measurements with software tools. <i>See Note 1!</i>
6	64	<b>Memory Error</b> Error during memory operations.	Check detailed settings and configuration with software tools.
7	128	<b>Reserved</b>	

**Note 1.** Any probe is out of range. Occurs, for instance, during over-exposure of CO2 sensor, in which case the error code will automatically reset when the measurement values return to normal. Could also indicate the need of zero point calibration. If the CO2 readings are normal, and still the error code remains, any other sensor probe mounted (if any) can be defect, or the connection to this probe is broken.

**Remark:** If several errors are detected at the same time the different error code numbers will be added together into one single error code!

## Maintenance

The K30 is basically maintenance free in normal environments if the ABC algorithm is active. When checking the sensor accuracy, note that the sensor accuracy is defined as after 3 weeks of continuous operation.

## General Performance

Storage Temperature Range .....	-30 to +70 °C
Sensor Life Expectancy .....	> 15 years
Maintenance Interval .....	no maintenance required
Self-Diagnostics .....	complete function check of the sensor module
Warm-up Time .....	≤ 1 min
Conformance with the standards.....	Emission: EN61000-6-3:2001 Immunity: EN61000-6-2:2001 RoHS directive 2002/95/EG
Operating Temperature Range .....	0 to 50 °C
Operating Humidity Range .....	0 to 95% RH (non-condensing)
Operating Environment .....	Residential, commercial, industrial spaces and Potentially dusty air ducts used in HVAC (Heating Ventilation and Air-Conditioning) systems.

## CO2 Measurement

Measurement Range .....	0 – 5,000 ppm vol. within specifications 0 – 10,000 ppm vol. total CO2 detection range
Sensing Method .....	non-dispersive infrared (NDIR) waveguide technology with ABC automatic background calibration algorithm
Sampling Method .....	Diffusion
Response Time (T <sub>1%</sub> ) .....	20 sec diffusion time
Response Rate .....	2 sec
Sensitivity .....	± 20 ppm ± 1 % of measured value within specifications
Accuracy .....	± 30 ppm ± 3 % of measured value within specifications
Pressure Dependence.....	+ 1.6 % reading per kPa deviation from normal pressure, 100 kPa
On-board calibration support .....	Din1 switch input to trigger Background Calibration @ 400 ppm CO2 Din2 switch input to trigger Zero Calibration @ 0 ppm CO2

## Electrical/Mechanical

Power Input.....	5-14 VDC, stabilized to within 10%
Current Consumption .....	40 mA average < 150 mA peak current (averaged during IR lamp ON, 120 msec) < 300 mA peak power (during IR lamp start-up, the first 50 msec)
Dimensions .....	5.1 x 5.7 x 1.4 cm (Length x Width x approximate Height)
Electrical Connections .....	Terminals not mounted (G+, G0, OUT1, OUT2, Din1, Din2, Status, TxD, RxD)

## Linear Signal Outputs

D/A Conversion Accuracy.....	± 2 % of reading ± 20 mV
OUT1 D/A Resolution .....	10 mV
Linear Conversion Range .....	0 - 4 VDC for 0 - 2 000 ppm vol.
Electrical Characteristics .....	ROUT < 100 W, RLOAD > 5 kW , Power input > 4.5 V
OUT1 D/A Resolution .....	5 mV
Linear Conversion Range .....	0 - 5 VDC for 0 - 2 000 ppm vol.
Electrical Characteristics .....	ROUT < 100 W, RLOAD > 5 kW , Power input > 5.5 V

## Digital Outputs

Electrical Characteristics .....	High Output level in the range 2.3V min to DVDD = 3.3V. (1 mA source) Low output level 0.75V max (4 mA sink). Protection 56R resistor in series.
Function .....	High level at CO <sub>2</sub> High
OUT3, CO <sub>2</sub> High Alarm /Reset Level ...	800/700 ppm
OUT4, CO <sub>2</sub> High Alarm /Reset Level ...	1000/900 ppm

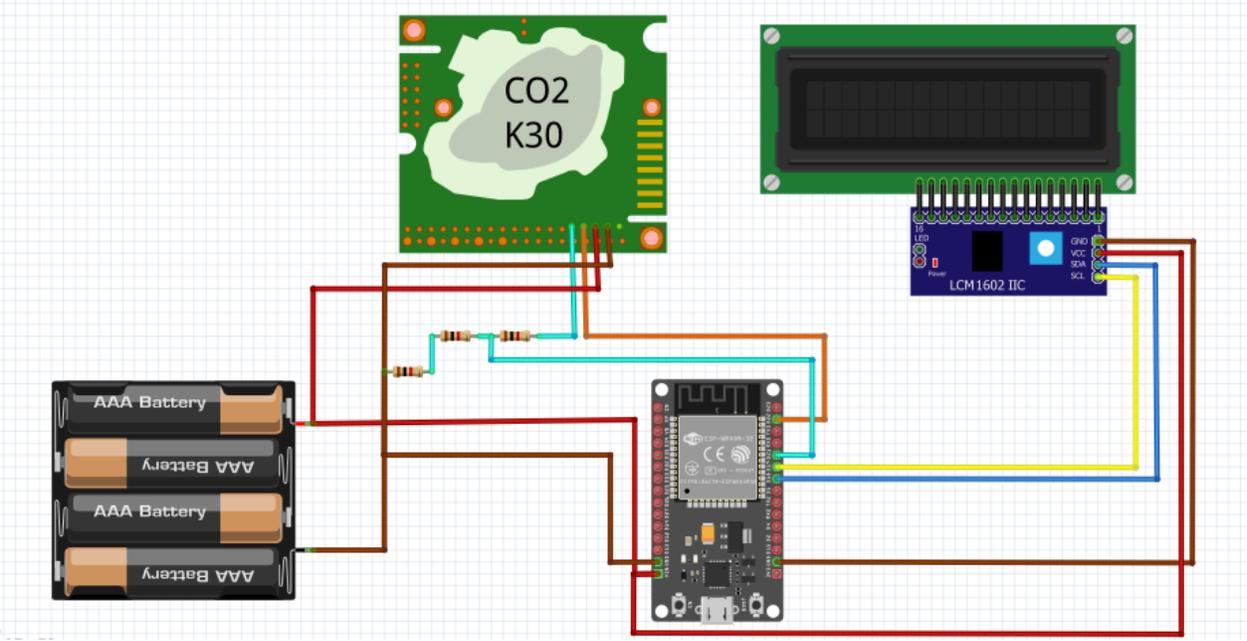
## UART Serial COM Port

Protocol .....	MODBUS open protocol, refer specification and registers definitions
Hardware interface .....	CMOS UART with RxD, TxD and R/T
Baud Rate .....	9600

## Warranty

90 days

**Anexo IV: Diagrama de conexiones tipo Protoboard del sistema de medición**



## **Anexo V: Código de Arduino y Python**

[https://github.com/lizsol14/k30\\_esp32](https://github.com/lizsol14/k30_esp32)