

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**PROPUESTA DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO BASADO EN
TECNOLOGÍAS IoT PARA EL PROCESO DE FERMENTACIÓN
DEL CACAO EN LA ZONA CENTRAL DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

NÉSTOR BALMORE GUEVARA PAULA

JULIO ERNESTO CLARA VÁSQUEZ

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

MSC. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE GRADUACION PREVIO A LA OPCION AL GRADO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

TITULO:

**PROPUESTA DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO BASADO EN
TECNOLOGÍAS IoT PARA EL PROCESO DE FERMENTACIÓN
DEL CACAO EN LA ZONA CENTRAL DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**NÉSTOR BALMORE GUEVARA PAULA
JULIO ERNESTO CLARA VÁSQUEZ**

TRABAJO DE GRADUACION APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

SAN SALVADOR, NOVIEMBRE DE 2025

TRABAJO DE GRADUACION APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, lunes 20 de octubre de 2025, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director


Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE
(Docente Asesor)


Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS


Firma

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

PROPUESTA DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO BASADO EN TECNOLOGÍAS IoT PARA EL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO EN LA ZONA CENTRAL DE EL SALVADOR

A cargo de los Bachilleres:

- GUEVARA PAULA NÉSTOR BALMORE
- CLARA VÁSQUEZ JULIO ERNESTO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.0
(OCHO PUNTO CERO)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, elevo mi agradecimiento a Dios todopoderoso, fuente de toda sabiduría y fortaleza, por iluminar mi camino en cada paso de mi vida, por darme la fortaleza en los momentos difíciles y ser la fuente de paz que necesitaba para culminar este trabajo.

Quiero expresar mi amor y agradecimiento infinito a mis queridos y amados padres, Concepción de Clara y Julio Clara. Ellos son el pilar fundamental sobre el que se ha construido todo mi futuro. Gracias, mamá, por tu ternura y tu fe inquebrantable en mí. Gracias, papá, por tu esfuerzo diario y por tus enseñanzas. Sin su apoyo incondicional, sus sabios consejos y sus innumerables sacrificios que han hecho por mí, este logro no sería una realidad. Les dedico, con todo mi corazón, el fruto de este esfuerzo.

A mis queridos hermanos, José David y María Griselda, agradezco su apoyo constante, su complicidad y su capacidad para infundir alegría incluso en los días más difíciles. Cada risa compartida y cada palabra de ánimo fortalecieron mi espíritu; su compañía incondicional, especialmente en las noches de desvelo, fue un pilar fundamental en este camino.

A todos mis familiares y amigos que, con su afecto y apoyo incondicional, me acompañaron en cada etapa de este proceso, les expreso mi más profundo agradecimiento.

A mi compañero y amigo, Néstor Guevara, le extiendo un especial agradecimiento por su dedicación, compañerismo y la valiosa colaboración brindada durante el desarrollo de este trabajo. El esfuerzo compartido y la disposición para superar cada desafío fueron fundamentales para avanzar con éxito.

A la Srta. Reina Vides, por su constante apoyo, su infinita paciencia y su invaluable ayuda, que fueron esenciales en esta etapa final. Finalmente, al Ing. Werner Meléndez, nuestro docente asesor, le expreso mi sincero reconocimiento por su guía académica, sus sabios consejos y por compartir generosamente su conocimiento y experiencia. Su mentoría fue fundamental para darle rigor y calidad a esta investigación.

Este logro no es solo mío, sino de todos aquellos que creyeron en mí incluso cuando yo dudaba.

A todos los que de alguna manera contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad, ¡mil gracias!

Julio Ernesto Clara Vásquez

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por no soltarme de su mano en los días más difíciles y por enseñarme que, con fe y perseverancia, todo es posible. Le agradezco por permitirme culminar este proyecto y cerrar así un ciclo que anhelé durante mucho tiempo.

A mis padres, Balmore y Yesenia, y a mi hermana Karla, los pilares fundamentales de mi vida. Gracias por acompañarme incondicionalmente y brindarme su apoyo inmenso. Nada de esto habría sido posible sin ustedes. Mi éxito es el resultado directo de su amor y su fe inquebrantable. A mis abuelos, tíos y primos, por llevarme siempre en sus oraciones y por demostrarme su cariño constante. Y un agradecimiento especial a mi amigo del alma, Ángel Márquez, por su apoyo incondicional desde que tengo memoria.

Mi gratitud se extiende a mis amigos y compañeros de carrera, quienes fueron una compañía clave en los días difíciles de desvelo, evaluaciones y proyectos. A pesar de lo complicado del camino, siempre hubo risas y esperanza que nos motivaba a continuar ciclo tras ciclo. Un agradecimiento especial a Julio Clara Vásquez, con quien tuve el honor de desarrollar este proyecto, su aporte fue fundamental para obtener un resultado exitoso.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor Ing. Werner Meléndez, por su dirección y acompañamiento durante el desarrollo de todo este trabajo, a Reinita Vides por su disposición y ayuda durante este proceso, como también a todo el personal docente de la EIE por la formación académica que me han brindado y me ha llevado hasta este punto.

Gracias también a todas las personas que, aunque no he nombrado, me motivaron y brindaron sus palabras de aliento en el momento justo.

Al finalizar este largo camino, miro hacia atrás y veo a muchas personas que fueron luz en los momentos difíciles. ¡Gracias Totales!

Néstor Balmore Guevara Paula

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO	1
INDICE DE TABLAS	3
INDICE DE FIGURAS.....	4
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVOS	9
ALCANCES	10
ANTECEDENTES	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
JUSTIFICACIÓN	13
CAPITULO 1: MARCO TEORICO.....	14
1.1 FERMENTACIÓN DEL CACAO	14
1.2 ETAPAS DE LA FERMENTACIÓN DEL CACAO	16
1.3 METODOS DE FERMENTACIÓN DEL CACAO	18
1.3.1 FERMENTACIÓN EN CAJAS DE MADERA	18
1.3.2 FERMENTACIÓN EN PILAS O MONTONES	19
1.3.4 FERMENTACIÓN EN SACOS DE YUTE	21
1.3.5 FERMENTACIÓN EN SISTEMAS AUTOMATIZADOS	21
1.4 VARIABLES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO.....	24
1.5 MONITOREO DE VARIABLES FISICOQUIMICAS	26
1.5.1 SENSORES DE TEMPERATURA	26
1.5.2 SENSORES DE PH	29
1.5.3 SENSORES DE CO ₂	32
1.5.4 SENSORES DE HUMEDAD.....	35
1.6 ALMACENAMIENTO EN LA NUBE	38
CAPITULO 2: DISEÑO DEL PROTOTIPO	43
2.1 SISTEMA DE VOLTEO.....	43
2.1.1 TOMBOLA DE FERMENTACIÓN.....	43
2.1.2 MECANISMO DE VOLTEO.....	45
2.1.3 CONTROL DE VOLTEOS.....	49
2.1.4 CIRCUITO DE CONTROL DE VOLTEO.....	50

2.2 SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES	51
2.2.1 CIRCUITO DE MONITOREO DE VARIABLES	51
2.2.2 CALIBRACIÓN DE SENSORES	55
2.3 PROGRAMACIÓN DE LOS MICROCONTROLADORES	60
2.3.1 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE VOLTEO.....	60
2.3.2 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES	63
2.4 ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE FERMENTACIÓN.....	66
2.4.1 DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SOLARES	66
2.4.2 DIMENSIONAMIENTO DE BATERIAS	69
2.5 PROTOTIPO DE FERMENTADOR AUTOMATIZADO.....	70
CAPITULO 3: RESULTADOS	71
3.1 FERMENTACIÓN A DISTINTAS CANTIDADES DE CACAO.....	71
3.2 ANALITICA CORRELACIONAL DE VARIABLES	77
3.2.1 PORCENTAJE DE LLENADO DE LA TOMBOLA	77
3.2.2 TEMPERATURA INTERNA DE LA MASA DE CACAO Y TEMPERATURA AMBIENTE.....	79
3.2.3 TEMPERATURA Y TIEMPO	81
3.3 ANALISIS COMPARATIVO DE CORRELACIONES ENTRE DIFERENTES MÉTODOS	82
3.3.1 ANALISIS DE DATOS A UN LLENADO DE LA TÓMBOLA DEL 15%	82
3.3.2 ANALISIS DE DATOS A UN LLENADO DE LA TÓMBOLA DEL 25%	87
3.3.3 ANALISIS DE DATOS A UN LLENADO DE LA TÓMBOLA DEL 70%	92
3.4 EVALUACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL PROTOTIPO IMPLEMENTADO.....	98
DISCUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES.....	106
BIBLIOGRAFIA	107

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Consumo de corriente y RPM del motor en sentido de giro antihorario.....	47
Tabla 2 Consumo de corriente y RPM del motor en sentido de giro horario.....	47
Tabla 3 Valores de pH asociados a su medición de voltaje.....	56

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	<i>Proceso de la producción del chocolate</i>	15
FIGURA 2	<i>Fase anaeróbica y aeróbica de la fermentación del cacao.</i>	17
FIGURA 3	<i>Cajas de madera para fermentar cacao</i>	19
FIGURA 4	<i>Fermentación del cacao por montones.</i>	20
FIGURA 5	<i>Sistema de fermentación de cacao automatizado.</i>	22
FIGURA 6	<i>Sensor DS18B20</i>	27
FIGURA 7	<i>Sensor TL1813</i>	28
FIGURA 8	<i>Sensor FS400-SHT30</i>	29
FIGURA 9	<i>Sensor Atlas Scientific EZO-pH.</i>	30
FIGURA 10	<i>Sensor DFRobot Gravity: Industrial pH Meter.</i>	31
FIGURA 11	<i>Sensor PH-4502C</i>	32
FIGURA 12	<i>Sensor MH-Z19B</i>	33
FIGURA 13	<i>Sensor SCD30.</i>	34
FIGURA 14	<i>Sensor SCD41</i>	35
FIGURA 15	<i>Sensor DHT1</i>	36
FIGURA 16	<i>Sensor DHT22</i>	37
FIGURA 17	<i>Sensor HIH-4030</i>	38
FIGURA 18	<i>Puntuación de plataformas de almacenamiento en la nube</i>	41
FIGURA 19	<i>Características evaluadas a las opciones de almacenamiento en la nube</i>	42
FIGURA 20	<i>Tómbola para fermentación de cacao</i>	44
FIGURA 21	<i>Tómbola para fermentación de cacao</i>	44
FIGURA 22	<i>Motor utilizado para el volteo de la tómbola</i>	45
FIGURA 23	<i>Sistema mecánico para el volteo del cacao</i>	46
FIGURA 24	<i>Interfaz para el control del motor</i>	49
FIGURA 25	<i>Circuito que controla el volteo durante la fermentación</i>	51
FIGURA 26	<i>Circuito de monitoreo de las variables de durante la fermentación.</i>	53
FIGURA 27	<i>Pantalla de inicio en ThinsgBoard.</i>	54
FIGURA 28	<i>Monitoreo de variables.</i>	54
FIGURA 29	<i>Puente entre las terminales BNC del modulo del sensor de PH.</i>	55
FIGURA 30	<i>Valores de voltaje a distintos niveles de pH.</i>	56
FIGURA 31	<i>Gráfica de Voltaje vs pH</i>	57
FIGURA 32	<i>Programación de la calibración del sensor de pH.</i>	57
FIGURA 33	<i>Programación de la calibración forzada del SCD41.</i>	58
FIGURA 34	<i>Calibración por comparación del sensor de CO₂</i>	59
FIGURA 35	<i>Comparación de mediciones de CO₂</i>	59
FIGURA 36	<i>Librerías para el control del motor</i>	60
FIGURA 37	<i>Configuración de credenciales</i>	61
FIGURA 38	<i>Configuración de pines para el control del motor.</i>	61
FIGURA 39	<i>Temporizador de giros</i>	62
FIGURA 40	<i>Función de inicialización</i>	62
FIGURA 41	<i>Configuración de librerías del sistema de sensores.</i>	63
FIGURA 42	<i>Configuración de conexión.</i>	64

FIGURA 43	<i>Asignación de pines en el sistema de monitoreo de variables.</i>	65
FIGURA 44	<i>Temporizador de mediciones de sensores.</i>	66
FIGURA 45	<i>Consumo de corriente de la bomba de succión.</i>	67
FIGURA 46	<i>Selección de parámetros para la obtención de valores de irradiación en Nasa Power</i>	68
FIGURA 47	<i>Fermentador de cacao con tecnologías IoT.</i>	70
FIGURA 48	<i>Datos registrados con la tómbola al 15% de su capacidad.</i>	71
FIGURA 49	<i>Datos registrados con la tómbola al 25% de su capacidad.</i>	73
FIGURA 50	<i>Datos registrados con la tómbola al 70% de su capacidad.</i>	74
FIGURA 51	<i>Cambios físicos durante la fermentación al 15% de capacidad de la tómbola.</i>	75
FIGURA 52	<i>Cambios físicos durante la fermentación al 25% de capacidad de la tómbola.</i>	76
FIGURA 53	<i>Cambios físicos durante la fermentación al 70% de capacidad de la tómbola.</i>	76
FIGURA 54	<i>Comportamiento de la temperatura a diferente porcentaje de llenado de la tómbola.</i>	77
FIGURA 55	<i>Comportamiento del CO₂ a diferente porcentaje de llenado de la tómbola</i>	78
FIGURA 56	<i>Temperatura de la masa de cacao y la temperatura ambiente al 15% de capacidad de la tómbola.</i>	79
FIGURA 57	<i>Temperatura de la masa de cacao y la temperatura ambiente al 25% de capacidad de la tómbola.</i>	80
FIGURA 58	<i>Temperatura de la masa de cacao y la temperatura ambiente al 70% de capacidad de la tómbola.</i>	81
FIGURA 59	<i>Matriz de correlación por el método de Pearson para datos al 15% de llenado.</i>	82
FIGURA 60	<i>Matriz de correlación por el método de Spearman para datos al 15% de llenado.</i>	83
FIGURA 61	<i>Matriz de correlación por el método de Tau de Kendall para datos al 15% de llenado.</i>	83
FIGURA 62	<i>Correlación por Pares – Barras Horizontales para datos al 15% de llenado.</i>	84
FIGURA 63	<i>Gráficos de dispersión para datos al 15% de llenado.</i>	85
FIGURA 64	<i>Mapa de calor para los distintos métodos de correlación de datos al 15% de llenado.</i>	86
FIGURA 65	<i>Diagrama de cajas y bigotes para datos tomados al 15% de llenado.</i>	87
FIGURA 66	<i>Matriz de correlación por el método de Pearson para datos al 25% de llenado.</i>	87
FIGURA 67	<i>Matriz de correlación por el método de Spearman para datos al 25% de llenado.</i>	88
FIGURA 68	<i>Matriz de correlación por el método de Tau de Kendall para datos al 25% de llenado.</i>	89
FIGURA 69	<i>Correlación por Pares – Barras Horizontales para datos al 25% de llenado.</i>	89
FIGURA 70	<i>Gráficos de dispersión para datos al 25% de llenado.</i>	90
FIGURA 71	<i>Mapa de calor para los distintos métodos de correlación de datos al 25% de llenado.</i>	91
FIGURA 72	<i>Diagrama de cajas y bigotes para datos tomados al 25% de llenado.</i>	92
FIGURA 73	<i>Matriz de correlación por el método de Pearson para datos al 70% de llenado.</i>	92

FIGURA 74	<i>Matriz de correlación por el método de Spearman para datos al 70% de llenado.</i>	93
FIGURA 75	<i>Matriz de correlación por el método de Tau de Kendall para datos al 70% de llenado</i>	94
FIGURA 76	<i>Correlación por Pares – Barras Horizontales para datos al 70% de llenado.</i>	94
FIGURA 77	<i>Gráficos de dispersión para datos al 70% de llenado.</i>	95
FIGURA 78	<i>Mapa de calor para los distintos métodos de correlación de datos al 70% de llenado.</i>	96
FIGURA 79	<i>Diagrama de cajas y bigotes para datos tomados al 70% de llenado.</i>	97
FIGURA 80	<i>Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de volteo.</i>	98
FIGURA 81	<i>Irradiación solar promedio diaria durante la primera medición del comportamiento de tensión</i>	99
FIGURA 82	<i>Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de sensores.</i>	100
FIGURA 83	<i>Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de volteo.</i>	102
FIGURA 84	<i>Irradiación solar promedio diaria durante la segunda medición del comportamiento de tensión.</i>	102
FIGURA 85	<i>Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de sensores.</i>	103

INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) representa un pilar agrícola importancia para El Salvador. La calidad excepcional de estos granos, que define su valor en el mercado internacional, no se origina únicamente en la genética de la planta, sino que se desarrolla críticamente durante el proceso de beneficio post-cosecha. De todas las etapas, la fermentación es la más decisiva, es aquí donde se forman los precursores del sabor y aroma del chocolate, y se reducen la astringencia y el amargor.

Tradicionalmente, en la región, este proceso se ha gestionado de forma artesanal. Si bien esta práctica posee un profundo valor cultural, a menudo se enfrenta a desafíos significativos en cuanto a la consistencia y el control de calidad. La fermentación se ve influenciada principalmente por la temperatura, la humedad, el pH, y la concentración de dióxido de carbono (CO₂), así como por factores físicos como la frecuencia de volteo y el material donde se fermentan los granos. El manejo manual de estas variables es intensivo en mano de obra y susceptible a inconsistencias, resultando en una calidad final variable.

La falta de estandarización y monitorización precisa es una barrera directa para la competitividad de los productores locales. En respuesta a esta problemática, las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) emergen como una solución viable y de alto impacto. La capacidad de monitorear en tiempo real, almacenar datos en la nube y automatizar procesos físicos ofrece una oportunidad sin precedentes para optimizar la fermentación del cacao.

La presente investigación propone el diseño de un sistema automatizado basado en tecnologías IoT para optimizar el proceso de fermentación del cacao en las condiciones. El objetivo es desarrollar un prototipo funcional que no solo monitoree las variables críticas, sino que también automatice las tareas físicas, como el volteo, permitiendo un control preciso y una mayor eficiencia.

Por lo que se realiza una revisión exhaustiva de los métodos de fermentación del cacao, destacando la importancia crítica del proceso. Se identifican y analizan las variables que ejercen mayor influencia (temperatura, CO₂, humedad, pH, tipo de madera y volteo), y se exploran las opciones tecnológicas actuales en sensores y plataformas de almacenamiento en la nube aplicables al monitoreo agrícola.

Lo que conlleva a el diseño mecánico del sistema, incluyendo la tómbola de fermentación y el mecanismo de volteo automatizado por motor. Se explica la arquitectura de hardware, el monitoreo de variables mediante sensores específicos, la conexión de componentes y la lógica para la captura y transmisión de datos.

El prototipo fue sometido a pruebas utilizando diferentes volúmenes de llenado de la tómbola (15%, 25% y 70%) para evaluar su impacto en el proceso. Se analizan las correlaciones fundamentales, como la relación entre el nivel de llenado y la temperatura interna, el llenado y la generación de CO₂, y la influencia de la temperatura ambiente. Finalmente, se ofrece un análisis correlacional conjunto de todas las variables y se evalúa el comportamiento y la autonomía energética del prototipo, demostrando su viabilidad técnica y operativa.

OBJETIVOS

GENERAL

Proponer un sistema de automatización para el proceso de fermentación del cacao utilizando tecnologías IoT.

ESPECIFICOS

1. Identificar los parámetros físicos predominantes en el proceso de fermentación del cacao que indiquen en la calidad del producto terminado.
2. Evaluar las opciones de sensores IoT que permitan el monitoreo y control de los parámetros identificados en el numeral anterior
3. Analizar las opciones que ofrecen las tecnologías de computación en la nube, para el almacenamiento y presentación de la información objeto del presente trabajo.
4. Implementar un prototipo de cámara de fermentación de cacao, que incluya sensores IoT, sistema de transmisión y recepción de datos, para el monitoreo y control de este tipo de proceso.
5. Evaluar el desempeño del sistema propuesto, y la factibilidad de implementación en El Salvador.

ALCANCES

- Evaluar las opciones de hardware de bajo costo, para el monitoreo de los parámetros de temperatura, humedad, pH, alcohol y CO₂.
- Propuestas de mecanismos de control y actuación automática, para la regulación de la temperatura en el recipiente de fermentación.
- Evaluación de opciones basadas en computación en la nube, para el almacenamiento de los datos proporcionados por los sensores.
- Desarrollo de una interfaz gráfica que facilite la interacción del usuario con el sistema a proponer.
- Diseño e implementación de un prototipo que incluya los subsistemas antes evaluados.

ANTECEDENTES

El concepto de Internet de las Cosas (IoT) tiene sus raíces en el desarrollo de tecnologías de comunicación y control remoto desde mediados del siglo XX. Durante los años 1950 y 1960, surgieron los primeros sistemas de automatización y control industrial, mientras que en las décadas de 1970 y 1980, el desarrollo de Internet y los protocolos de red como TCP/IP permitieron la interconexión de dispositivos.

El término "Internet de las Cosas" fue acuñado en 1999 por Kevin Ashton, quien visualizó un mundo en el que los objetos físicos podrían estar conectados a Internet mediante sensores y etiquetas RFID. A partir del 2000, la tecnología de comunicación inalámbrica, junto con la miniaturización de sensores y la reducción de costos de componentes electrónicos, impulsó la expansión del IoT.

Con el crecimiento de las redes móviles, Wi-Fi, y la computación en la nube, el IoT comenzó a integrarse en sectores como la domótica, la salud, la agricultura, el transporte, y la industria.

El Internet de las Cosas (IoT) en El Salvador es un campo emergente que ha comenzado a ganar tracción en los últimos años, en línea con el crecimiento global de esta tecnología.

El país ha invertido en mejorar su infraestructura digital, incluyendo la expansión de la cobertura de internet y la adopción de tecnologías móviles. Esto ha facilitado el crecimiento de aplicaciones IoT en diversas áreas. A pesar de los avances, el desarrollo de IoT en El Salvador enfrenta desafíos como la falta de regulaciones claras, la necesidad de mayor inversión en infraestructura y la brecha de habilidades en la fuerza laboral. Sin embargo, las oportunidades son significativas, especialmente en sectores como la salud, la manufactura y la agricultura.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La fermentación, siendo una de las etapas más importantes del procesamiento del cacao, en nuestro país, aun se realiza con métodos tradicionales, donde presenta varias limitaciones, como la variabilidad en la calidad del producto, la dependencia de la habilidad y experiencia del operario, y la dificultad para controlar las condiciones ambientales.

Al contar con un método automatizado con medición de parámetros a través sensores IoT, proporciona la información necesaria para establecer una calidad basada en los datos recolectados por estos. Este nivel de precisión y control es difícil de alcanzar con los métodos tradicionales, donde el control es más empírico y depende en gran medida de la experiencia y juicio del operario.

La automatización de la fermentación del cacao ofrece la mejora en la consistencia y calidad del producto final gracias al control preciso de variables críticas como la temperatura, la humedad y PH. Además, optimiza el proceso al reducir la dependencia de habilidades manuales y minimizar errores humanos, lo que incrementa la eficiencia y permite producir cacao de alta calidad de manera más uniforme. También aumenta el valor de mercado del cacao al garantizar una calidad constante, y proporciona mayor trazabilidad y control durante el proceso, aspectos muy valorados por consumidores y reguladores.

JUSTIFICACIÓN

La fermentación del cacao es una etapa crítica en la cadena de valor del chocolate, ya que durante este proceso se desarrollan los precursores de los sabores y aromas que definen la calidad del producto final. Sin embargo, los métodos tradicionales, presentan varios desafíos, como la inconsistencia en la calidad del cacao, la susceptibilidad a errores humanos, y la falta de control sobre variables clave como la temperatura, la humedad, PH y el tiempo de fermentación.

La adopción de tecnologías IoT para automatizar la fermentación del cacao se presenta como una solución innovadora y prometedora. Las tecnologías IoT permiten la implementación de sensores avanzados y sistemas de control remoto que pueden monitorear en tiempo real las condiciones de fermentación, garantizando un control preciso y consistente de las variables críticas. Esta automatización no solo mejora la calidad y la homogeneidad del cacao producido, sino que también optimiza el proceso al reducir el desperdicio, aumentar la eficiencia, y minimizar la dependencia de la intervención manual.

La automatización del proceso de fermentación mediante tecnologías IoT, no solo contribuye al conocimiento científico y técnico, sino que también ofrece soluciones prácticas para mejorar la calidad y rentabilidad del cacao, beneficiando a productores, chocolateros y consumidores por igual.

CAPITULO 1: MARCO TEORICO

1.1 FERMENTACIÓN DEL CACAO

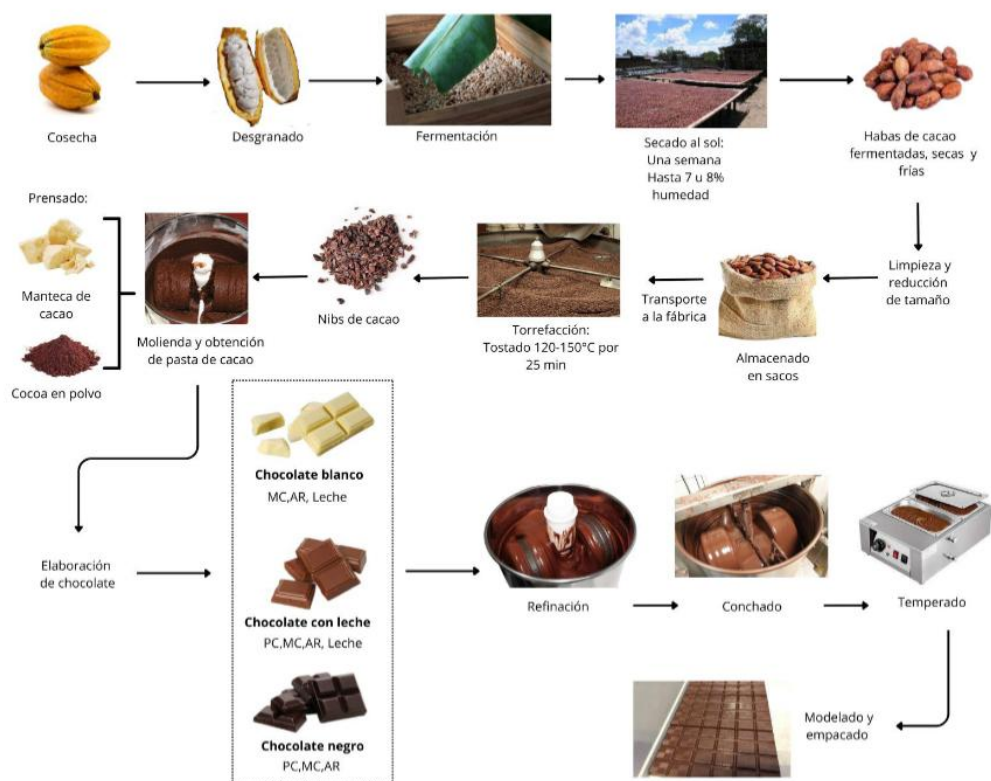
La producción de chocolate, implica una serie de procesos por los cuales debe pasar el cacao, hasta obtener el producto final. Conformado por las siguientes etapas: cosecha, fermentación, secado, tostado, descascarillado y triturado, prensado, mezclado, conchado, templado, moldeo y enfriamiento.

Siendo la fermentación, una de las etapas más importantes de todo del proceso, la cual se inicia inmediatamente después de la cosecha, cuando las almendras aún se encuentran cubiertas por el mucílago azucarado. Este sustrato sirve como medio de cultivo para una comunidad de microorganismos que transforman los compuestos presentes a través de un proceso natural que puede durar entre cinco y siete días.

Esta consiste en la eliminación del mucílago que cubre al grano de cacao. Este favorece la muerte del embrión, evita la germinación del grano que deteriora su calidad y permite obtener un cacao de buena calidad. Durante este proceso ocurren una sucesión de diferentes procesos bioquímicos, microbiológicos y enzimáticos, los cuales favorecen la reducción del amargor y astringencia del cacao, así como también el desarrollo de las sustancias precursoras del aroma y sabor característico del chocolate. (Loayza Lozano, 2014)

El proceso de la fermentación influye directamente en la formación de los precursores de los compuestos volátiles que, durante el tostado, se convierten en los aromas característicos del chocolate. Estos precursores incluyen aminoácidos, ácidos grasos y azúcares reductores, los cuales, cuando se someten a las altas temperaturas del proceso de tostado, reaccionan para producir una variedad de compuestos aromáticos que son fundamentales para la calidad sensorial del chocolate. Los sabores y aromas desarrollados en esta etapa inicial de la cadena de producción no solo dependen de la acción microbiana, sino también de factores como el tiempo de fermentación y la composición química de las semillas, lo que hace que cada lote de cacao sea único. (Sabando et al., 2024)

FIGURA 1
Proceso de la producción del chocolate



Nota. Tratamiento del cacao desde su cosecha hasta la elaboración del chocolate, donde la fermentación constituye uno de los procesos iniciales. Fuente: (Rosales-Valdívía et al., 2024)

Según el *Chocolate Science and Technology (2020)*, la fermentación del cacao involucra la acción de levaduras, bacterias y otros microorganismos que interactúan en diversas fases del proceso. Donde son las levaduras las que inician la fermentación al consumir los azúcares de pulpa del cacao, generando una liberación de etanol y otros compuestos. Luego, las bacterias acéticas convierten el alcohol en ácido acético, esto contribuye al desarrollo de los ácidos orgánicos que son responsables de los sabores ácidos y frutales del cacao fermentado. Esta transformación es esencial para reducir el amargor y la astringencia natural de las semillas de cacao crudas, permitiendo así que los sabores más complejos se desarrollen durante el proceso de tostado. (Afoakwa, 2016)

En el contexto de la fermentación del cacao, el proceso también juega un papel fundamental en la disminución de compuestos indeseables, como los polifenoles y los compuestos fenólicos, que contribuyen al sabor amargo del cacao. La adecuada fermentación reduce estos compuestos y permite una mayor expresión de los sabores deseables, mejorando así la calidad del chocolate. (Rodríguez Silva et al., 2023)

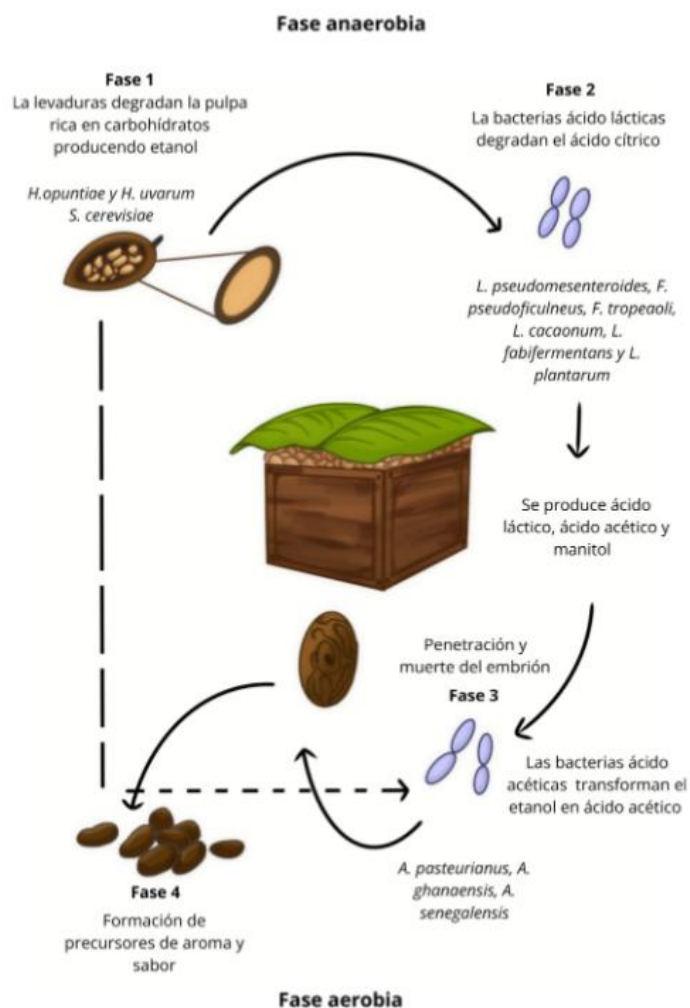
Finalmente, la fermentación del cacao no solo es esencial para el desarrollo de los sabores y aromas del chocolate, sino que también tiene un impacto directo en la percepción sensorial del producto final. La manera en que se lleva a cabo la fermentación influye en la calidad del chocolate, ya que una fermentación bien realizada puede dar lugar a un chocolate con notas más complejas y agradables, mientras que una fermentación deficiente puede producir un producto con sabores no deseados. (Rosales-Valdívía et al., 2024)

Es un proceso de gran importancia para el desarrollo de los sabores y aromas del chocolate. Este proceso, que involucra la acción de microorganismos como levaduras y bacterias, permite la transformación de compuestos precursores en sabores complejos y aromas agradables que caracterizan al chocolate. La correcta gestión de este proceso es crucial para obtener productos de alta calidad que sean apreciados tanto por su sabor como por su aroma.

1.2 ETAPAS DE LA FERMENTACIÓN DEL CACAO

La primera etapa de la fermentación es la fase anaeróbica, la cual inicia inmediatamente después de la cosecha del cacao, cuando las almendras aún están cubiertas por el mucílago, un líquido azucarado. Durante esta etapa, las condiciones de oxígeno son limitadas, lo que favorece la actividad de levaduras presentes en el mucílago. Estas levaduras convierten los azúcares en etanol y dióxido de carbono a través de la fermentación alcohólica. Este proceso, que dura entre 24 y 48 horas, es crucial para iniciar la transformación de los granos de cacao, ya que establece las bases para las posteriores reacciones bioquímicas que afectan tanto la calidad del grano como el sabor del chocolate final. La falta de oxígeno en esta fase hace que la fermentación sea anaeróbica y permite que los microorganismos anaeróbicos predominen, llevando a cabo esta conversión inicial. (Flores Dávila, 2023)

FIGURA 2
Fase anaeróbica y aeróbica de la fermentación del cacao.



Nota. Diagrama de las fases de la fermentación del cacao y los aspectos que involucra cada una de ellas. Fuente: (Rosales-Valdívía et al., 2024)

Una vez concluida la fase anaeróbica de la fermentación, las almendras de cacao se voltean para permitir el ingreso de oxígeno, lo que marca el inicio de la fase aeróbica. En esta etapa, bacterias acéticas, como acetobacter, oxidan el etanol generado previamente, transformándolo en ácido acético. Esta conversión resulta esencial para la formación de compuestos que influirán directamente en el perfil sensorial del cacao, especialmente en su sabor y aroma.

A medida que el ácido acético penetra en los granos, la temperatura interna de las semillas se eleva, provocando una muerte parcial del embrión. Este efecto, además de inhibir la germinación, desencadena una serie de reacciones bioquímicas cruciales para la generación de precursores de sabor. La fase aeróbica suele extenderse entre tres y cinco días y desempeña un papel determinante en el desarrollo de las propiedades organolépticas que caracterizan al chocolate de alta calidad. (Carmen & Erazo, 2019)

Cada una de estas etapas desempeña un papel crucial en la transformación de los granos, desde la descomposición inicial de los azúcares hasta el desarrollo de los compuestos que determinan el sabor y aroma del chocolate. Un control adecuado de ambas fases es esencial para garantizar la calidad sensorial y comercial del cacao.

1.3 METODOS DE FERMENTACIÓN DEL CACAO

Existen diversos métodos que buscan optimizar este proceso, entre ellos destacan los métodos tradicionales en cajas de madera, fermentación en sacos y métodos experimentales como los que utilizan microorganismos específicos o fermentadores automatizados.

1.3.1 FERMENTACIÓN EN CAJAS DE MADERA

Uno de los métodos más utilizados es la fermentación en cajas de madera. Estas cajas, comúnmente elaboradas con maderas como el guayacán blanco, laurel o pino, permiten una buena aireación y retención de calor.

En una investigación desarrollada en Ecuador se comparó el efecto de estas maderas sobre la fermentación del cacao de las variedades Nacional y Trinitario. Las cajas, generalmente construidas con madera de laurel, guayacán o pino, permiten mantener temperaturas óptimas (entre 45 °C y 50 °C) y facilitan la aireación mediante orificios laterales.

Antes de iniciar la fermentación, los granos de cacao recién extraídos del fruto (en su estado mucilaginoso) se colocan en cajas. Las cajas suelen tener dimensiones estándar (aproximadamente 60x60x60 cm), con capacidad para contener entre 200 y 1000 kg de granos. Incorporan perforaciones o rendijas en la base y los laterales para favorecer el drenaje de los líquidos liberados durante el proceso y mejorar la entrada de oxígeno, esencial para el crecimiento de levaduras y bacterias beneficiosas. (Solarte Rangel, 2021)

Una vez colocados los granos en las cajas, se cubren con hojas de plátano o costales de yute para conservar el calor y la humedad. El proceso generalmente dura entre 5 y 7 días, dependiendo de la variedad del cacao y las condiciones climáticas. Durante este tiempo, el pH del grano disminuye, se elimina el mucílago, y el interior del grano cambia de color blanco a marrón oscuro, señal de una buena fermentación. Para asegurar un proceso uniforme, los granos se remueven (voltean) cada 48 horas. Este volteo también ayuda a oxigenar la masa y redistribuir el calor. (CORDOVA, 2019)

FIGURA 3

Cajas de madera para fermentar cacao.



Nota. Cajas donde se depositan los granos de cacao al extraerlos de la mazorca, posteriormente son recubiertas con sacos de yute u hojas de plátano para dejar que se desarrolle el proceso de fermentación. Fuente: (CAJONES FERMENTADORES, n.d.)

1.3.2 FERMENTACIÓN EN PILAS O MONTONES

Consiste en apilar los granos de cacao en el suelo, generalmente sobre hojas de plátano, cubriéndolos también con estas para conservar el calor. Sin embargo, a diferencia de métodos más controlados como las cajas de madera, la temperatura en los montones puede ser menos uniforme,

lo que provoca fermentaciones desiguales entre los granos del centro y los de los bordes. (Teneda Llerena, 2016).

Generalmente, no se realiza un volteo sistemático durante la fermentación en pilas. Esto limita el ingreso de oxígeno, ralentiza el crecimiento de bacterias beneficiosas y favorece la proliferación de microorganismos indeseables. Suele durar entre 5 y 8 días, dependiendo de las condiciones ambientales. Sin estructuras que retengan bien el calor, el proceso puede ser más lento o incompleto, afectando negativamente los atributos organolépticos del grano. (Jimenez-Peralta et al., 2023)

FIGURA 4

Fermentación del cacao por montones.



Nota. Método de fermentación del cacao por montones, colocando los granos sobre hojas de plátano. Fuente: (*CAUSAS DE UNA MALA FERMENTACIÓN EN EL CACAO - Poscosecha Cacao*, n.d.)

1.3.4 FERMENTACIÓN EN SACOS DE YUTE

Es un método utilizado principalmente por pequeños productores de cacao en regiones donde el acceso a infraestructura especializada es limitado. A pesar de su bajo costo, este sistema presenta retos significativos en términos de control y calidad.

Los granos de cacao frescos, aún cubiertos por el mucílago, se colocan directamente en sacos elaborados de fibras naturales como el yute o el fique. Estos sacos permiten una cierta transpiración, pero su capacidad para mantener el calor es inferior a la de otros métodos como las cajas de madera. Los sacos se ubican sobre plataformas o esteras vegetales para evitar el contacto directo con el suelo y facilitar el drenaje de los jugos fermentativos.

Generalmente, los sacos no se voltean con regularidad. En algunos casos, se trasladan o se rotan ligeramente cada dos o tres días para mejorar el intercambio de aire y redistribuir la masa, pero esto no siempre es suficiente para asegurar una fermentación homogénea. Esto da como resultado una variabilidad significativa en el nivel de fermentación entre los granos de un mismo lote. (Jimenez-Peralta et al., 2023)

El proceso puede durar entre 5 y 8 días, dependiendo de factores como la temperatura ambiental, la variedad de cacao y el volumen de granos en cada saco. A menudo, el resultado es una fermentación incompleta, donde el color interior del grano no alcanza el marrón deseado y el embrión no se destruye del todo, lo que impacta negativamente en el sabor final del chocolate.

1.3.5 FERMENTACIÓN EN SISTEMAS AUTOMATIZADOS

Los sistemas automatizados representan un avance significativo en la fermentación del cacao, ya que permiten un control preciso de las variables críticas del proceso. Estos sistemas emplean sensores avanzados para monitorear parámetros como la temperatura, la humedad y el pH en tiempo real. Además, integran motores que realizan el volteo automático de los granos, asegurando una fermentación uniforme y reduciendo la necesidad de intervención manual.

Según el estudio de Zamorano, la automatización no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también garantiza la consistencia en la calidad del producto final. Esto es especialmente relevante en un mercado global donde los estándares de calidad son cada vez más exigentes. Los sistemas automatizados también ofrecen la posibilidad de recopilar datos durante el proceso, lo que permite

a los productores analizar y optimizar continuamente sus métodos. Este enfoque combina tecnología de punta con la tradición cacaotera, ofreciendo una solución sostenible y competitiva para los productores. (Sagastume, 2007)

FIGURA 5

Sistema de fermentación de cacao automatizado.



Nota. Sistema de fermentación automático del cacao, que incluye motor y componentes electrónicos que automatizan y temporizan los volteos del tambor rotatorio. Fuente: (FERMENTADORA DE CACAO | Autodesk Community Gallery, n.d.)

Sin embargo, en América Latina (especialmente para pequeños productores) persisten limitaciones tecnológicas. El 85% de la fermentación sigue realizándose en cajones de madera artesanales, con poco control de variables, lo que genera inconsistencia en la calidad y pérdidas económicas (Como solución, se han propuesto diseños de fermentadores mejorados que optimizan la aireación, el aislamiento térmico y el drenaje, utilizando materiales de bajo costo (ESPOL, 2022; ResearchGate, 2021). (Briones Arias et al., 2023)

Además, han surgido soluciones basadas en la automatización del proceso de fermentación. Estas nuevas propuestas permiten un mayor control sobre las condiciones del entorno, utilizando sensores y sistemas electrónicos que registran en tiempo real aspectos fundamentales como la temperatura, la humedad relativa o la acidez. De esta manera, se mejora la trazabilidad del proceso y se reduce la dependencia del conocimiento empírico de los operarios, permitiendo una fermentación más precisa y uniforme. (Figueroa, 2023)

Los métodos automatizados desarrollados hasta ahora presentan distintos niveles de complejidad, desde sistemas básicos de monitoreo hasta soluciones más avanzadas que integran mecanismos automáticos para voltear los granos, controlar la ventilación o regular la temperatura. En países productores como Colombia, Ecuador y Perú ya se han implementado prototipos funcionales que responden a las necesidades tanto de pequeños como de medianos productores.

Uno de los enfoques más utilizados en estos desarrollos es la incorporación de tecnologías IoT (Internet de las Cosas), que permiten recopilar datos en tiempo real, almacenarlos en la nube y realizar ajustes automáticos cuando se detectan desviaciones respecto a los parámetros ideales. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también facilita la toma de decisiones basada en datos y reduce las pérdidas por errores humanos o por falta de seguimiento adecuado.

Un ejemplo es el desarrollo de un biorreactor cilíndrico y vertical fabricado en acero inoxidable, cuyo objetivo es permitir el control automático de la temperatura, la humedad y la agitación mediante el uso de sensores y actuadores electrónicos. Este enfoque busca tecnificar el proceso para garantizar las condiciones óptimas que favorecen el crecimiento de las bacterias ácido-lácticas y ácido-acéticas responsables de una fermentación exitosa.

Otro enfoque, presentado por Navarrete en su investigación “Diseño de un prototipo de fermentador para granos de cacao”, se centra en el diseño de un prototipo capaz de gestionar las dos fases cruciales de la fermentación: la anaeróbica y la aeróbica. Este diseño contempla una caja con un sistema de rotación para asegurar la homogeneidad de la masa de cacao, un control estricto de la temperatura y un mecanismo para el drenaje de los líquidos generados. Además, este estudio aplicó un diseño experimental de Taguchi para validar la influencia de los factores controlados sobre el nivel de pH del grano, un indicador clave de la calidad de la fermentación. (Navarrete, 2021).

Ambas líneas de investigación, aunque proponen diseños mecánicos diferentes, coinciden en que la solución a las deficiencias del método tradicional radica en la automatización y el control preciso de las variables del proceso. El objetivo común es estandarizar la fermentación para superar las inconsistencias del método artesanal, asegurar una calidad superior y constante en el grano de cacao y, con ello, mejorar la rentabilidad de su producción.

Sin embargo, la adopción de estos sistemas automatizados aún enfrenta varios retos, especialmente en zonas rurales. El alto costo de los equipos, la necesidad de una fuente de energía constante y la falta de formación técnica entre los productores son algunos de los principales obstáculos. A pesar de ello, se reconoce que la automatización tiene un alto potencial para mejorar la calidad del cacao, aumentar la productividad y promover prácticas sostenibles.

1.4 VARIABLES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO

El proceso de fermentación está determinado por una serie de factores interdependientes que influyen en su desarrollo y resultado. Estos factores se pueden clasificar en tres categorías principales. En primer lugar, la microbiota natural intrínseca de la región juega un papel determinante. En segundo lugar, las características fisicoquímicas del sustrato (pulpa) son cruciales, incluyendo variables como el pH, el contenido de agua y la composición química específica. Finalmente, los métodos y las condiciones operacionales aplicadas, como la temperatura, el tiempo de proceso y la frecuencia de volteo, inciden directamente en la cinética fermentativa. (Morales C., 2020)

Los granos de cacao y la baba se deben llevar a fermentar antes de 24 horas de haberse cosechado. Posterior, al ejecutar la apertura de las mazorcas, no se debe utilizar objetos cortopunzantes, en su lugar debe realizarse con martillos y mazo de madera, con el debido cuidado de no dañar las semillas, ni dejar restos de cascaras sobre ellas. (Andres & Galvis, 2022)

En cuanto al tiempo de fermentación, en promedio posee una duración entre cinco a siete días, con un máximo de siete días, sin embargo, existen especies de cacao, que necesitan menos días para su fermentación como es el caso de Cacao Criollo de cotiledón blanco, que requiere solo tres días, en cambio el Cacao forastero de cotiledón morado o púrpura necesita ocho días. (Teneda Llerena, 2016)

El proceso de volteo tiene el efecto inmediato de enfriamiento, liberación de CO₂ y aumento de la aireación y por consiguiente de la actividad de las bacterias acéticas, por lo que el primer volteo debe ejecutar a las 48 horas de iniciada la fermentación, luego cada 24 horas (Teneda Llerena, 2016). Sin embargo, otros estudios ejecutan los volteos cada 24 horas. Ambas formas son óptimas, ya que en su estudio determinó que en ambas frecuencias de volteo la velocidad para alcanzar la máxima temperatura es mayor, en comparación a si los volteos se hicieran en secuencias de 24-48-24-24. (Seijas, 2012) (Paulina Córdova Bohórquez et al., 2019)

Por otro lado, los parámetros físicos y químicos, influyen en gran medida durante el proceso de la fermentación del cacao, uno de los más importantes y más mencionados en la literatura del tema es la temperatura, durante el inicio los valores se ubican en valores bajos, mostrando un incremento alrededor de las 48 horas, debido a que las bacterias acéticas transforman el alcohol en ácido acético, la cual es una reacción mucho más exotérmica. El rango de temperatura, referido por la literatura, fluctúa entre 26 y 45°C, con máximos de hasta 60°C. (Loayza Lozano, 2014)

La fermentación alcohólica produce gran cantidad de CO₂, otro factor incidente en el proceso, que es la que provoca en el sistema fermentativo de la fruta un cambio importante de características físicas. Este CO₂ pesa más que el aire, y puede llegar a crear bolsas que desplazan el oxígeno de los recipientes donde se produce la fermentación. (Bravo & Mingo, 2011)

Otro parámetro de importancia es el pH, dado que actúa como un indicador crítico de la actividad metabólica microbiana y de la progresión del proceso. Una investigación con el análisis mediante 10 tratamientos diferentes del proceso de fermentación, obtuvo un rango promedio de valores del potencial de hidrogeno de 3.91 a 4.51, una tendencia de forma ascendente. Mientras que otro estudio, en la valoración de tres métodos diferentes, sugiere un comportamiento donde de 6.5 disminuye a valores de 4.8, valores que coinciden con la literatura de otros autores. (Fabián Vera-Chang et al., 2023) (Bravo & Mingo, 2011)

Además, de acuerdo al tipo de método de fermentación En la fermentación de cacao, el tipo de madera utilizado para construir los fermentadores juega un papel fundamental en la calidad final. Por lo que, se recomienda el uso de maderas como Guayacán Blanco, Laurel, Pino, Nogal y Cedro, preferentemente aquellas que poseen resistencia a la humedad y no desprenden sustancias extrañas que interfieran en la calidad del grano. (Bravo & Mingo, 2011)

Donde el uso de cajas de madera de cedro destaca por su capacidad de conservar el calor generado por la actividad microbiana, y con ello, la formación de precursores de aroma y sabor. Su principal ventaja radica en su excelente capacidad de aislamiento térmico, lo que permite conservar el calor generado durante la fermentación, favoreciendo el desarrollo homogéneo de los microorganismos responsables de transformar los precursores de aroma y sabor en el grano de cacao. Además, el cedro es una madera robusta y resistente a la humedad, lo que prolonga la vida útil de las cajas y reduce el riesgo de deterioro por hongos o insectos. (Graziani de Fariñas et al., 2003)

Esto se debe a que el uso de materiales como el metal o el aluminio puede resultar perjudicial, ya que durante la noche estos materiales se enfrían, generando un gradiente de temperatura elevado que afecta negativamente la fermentación del cacao. (Rios-Jara & Lévano-Rodríguez, 2022)

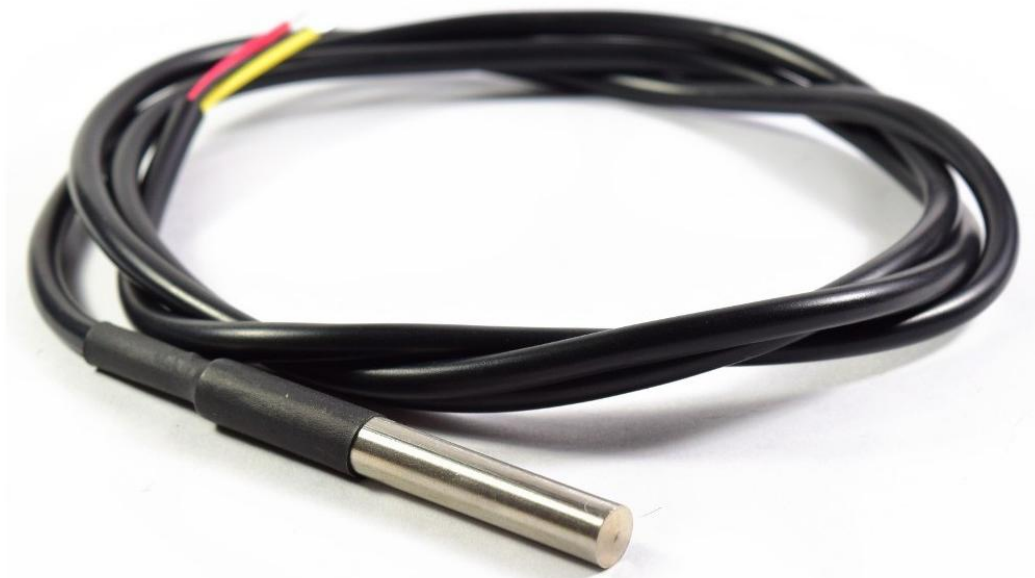
1.5 MONITOREO DE VARIABLES FISICOQUIMICAS

La aplicación de las Tecnologías IoT (Internet de las Cosas) en la fermentación representa una transición fundamental de métodos empíricos a un control de proceso basado en datos. Esta tecnología se implementa mediante el despliegue de sensores inalámbricos que miden continuamente parámetros críticos, transmitiendo esta información a una plataforma central en tiempo real. Este monitoreo constante permite detectar con precisión momentos clave.

1.5.1 SENSORES DE TEMPERATURA

El DS18B20 es un sensor digital que opera con un voltaje de 3.0V a 5.5V, con un bajo consumo de corriente, entre 1mA a 1.5mA durante la medición. Ofrece una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en un rango de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$, con un rango de medición total de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$. Su interfaz de comunicación es 1-Wire. (ANALOG DEVICES, 2019)

FIGURA 6
Sensor DS18B20



Nota. Sensor modelo DS18B20 para medir temperatura compatible con ARDUINO y ESP32 con un costo promedio aproximado de \$6.00. Fuente: (*Sensor de Temperatura Digital DS18B20*, n.d.)

Por otro lado, las sondas de termopar tipo K, como el modelo TL1813, son sensores pasivos. Requieren un módulo amplificador y convertidor como el MAX6675 para su interfaz con microcontroladores. El MAX6675 opera con un voltaje de 3.0V a 5.5V y tiene un consumo de corriente máximo de 1.5mA. El sistema combinado (sonda + MAX6675) proporciona una precisión típica de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en un rango de medición muy extenso, desde 0°C hasta $+1024^{\circ}\text{C}$. (*K-Type Thermocouple 10cm Metal Head - 1832°F | TL1813 | PerfectPrime*, n.d.)

FIGURA 7
Sensor TL1813



Nota. Sensor modelo TL1813, para ser usado con microcontroladores necesita la incorporación de un amplificador y convertidor MAX6675, con un precio promedio aproximado de \$39.00. Fuente: *(K-Type Thermocouple 10cm Metal Head - 1832°F | TL1813| PerfectPrime, n.d.)*

Finalmente, el FS400-SHT30 es un sensor más complejo que mide tanto temperatura como humedad. Opera en un rango de voltaje de 2.15V a 5.5V con un consumo de corriente promedio en el rango de los microamperios de menor a 10 mA. Ofrece una precisión en temperatura de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ dentro de su rango de medición de -20°C a $+100^{\circ}\text{C}$, con una interfaz de comunicación I2C. Mientras que, su rango de medición de humedad es entre 0% a 100%. *(SONDA Sensor de Temperatura y Humedad FS400 SHT30 150cm – Safetyprice Electronics, n.d.)*

FIGURA 8
Sensor FS400-SHT30



Nota.

Sensor FS400-SHT30 que incorpora las mediciones de temperatura y humedad en un mismo dispositivo, con un valor promedio aproximado de \$20.00. Fuente: (Amazon, n.d.)

1.5.2 SENSORES DE PH

El circuito Atlas Scientific EZO-pH se posiciona en la alta gama, operando con un voltaje de 3.3V a 5.0V y un consumo de corriente bajo, típicamente de 17.7mA en modo de lectura continua. Ofrece una alta precisión de ± 0.002 , con interfaz UART y I2C. Con un rango de medición entre 0.001 a 14.000. (Atlas Scientific, 2024)

FIGURA 9

Sensor Atlas Scientific EZO-pH.



Nota. Sensor para medición de pH, modelo Sensor Atlas Scientific EZO-pH, el cual se ubica dentro de la categoría de gama alta con un valor promedio aproximado de \$50.00. Fuente: (*EZO-PH Atlas Scientific | Development Boards, Kits, Programmers | DigiKey, n.d.*)

En una categoría similar, el kit DFRobot Gravity: Industrial pH Meter opera a un rango entre 3.3 V a 5.5V y consume menos de 10mA. Proporciona una precisión de ± 0.1 a 25°C. Este módulo se distingue por su interfaz de salida analógica, la cual es sencilla de implementar con convertidores analógico-digitales (ADC). Diseñado para tener un funcionamiento 24/7 a lo largo de 6 meses. (*Gravity: Industrial Analog PH Sensor (Arduino, Raspberry Pi) - DFRobot, n.d.*)

FIGURA 10

Sensor DFRobot Gravity: Industrial pH Meter.



Nota. Sensor para la medición de pH, modelo DFRobot Gravity: Industrial pH Meter, posicionado entre la gama alta para la detección de este parámetro, con un costo promedio aproximado de \$127.00. Fuente: (Amazon.Com: Medidor de PH Analógico Pro V2 Sensor de PH Profesional, n.d.)

Finalmente, el módulo PH-4502C representa la opción más económica, diseñada para aplicaciones educativas o de bajo costo. Opera a 5V, con un consumo de corriente en el rango de 10mA. Su precisión especificada como ± 0.02 pH después de una calibración cuidadosa. Al igual que el kit de DFRobot, utiliza una salida analógica para comunicar el valor de pH medido. (PH-4502C Sensor de PH Líquido Con Electrodo E201C-BNC, n.d.)

FIGURA 11
Sensor PH-4502C.



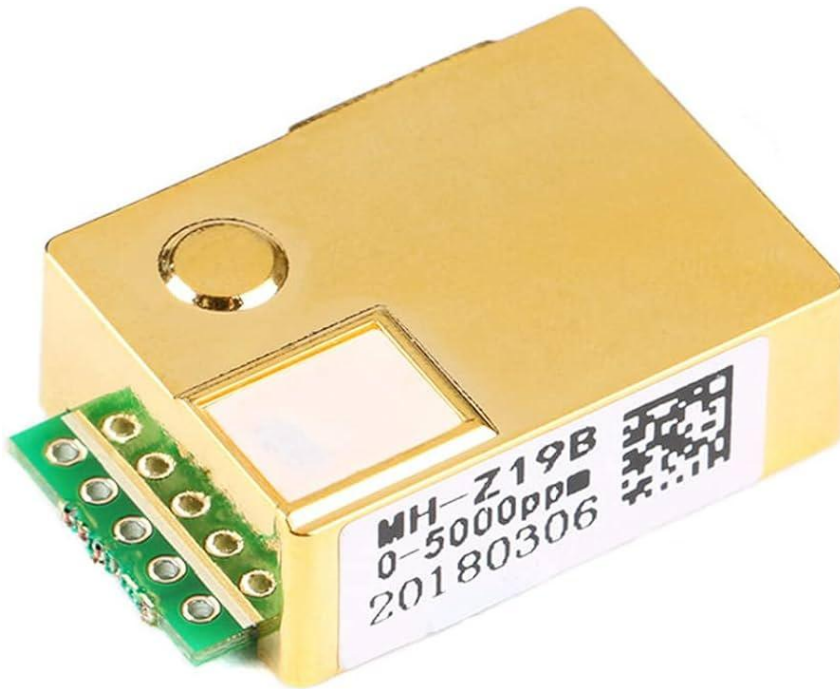
Nota. Sensor para la medición de pH, modelo PH-4502C, el cual representa la opción más económica en el mercado, con un costo aproximado de \$25.00. Fuente: (*PH-4502C Sensor de PH Liquido Con Electrodo E201C-BNC*, n.d.)

1.5.3 SENSORES DE CO₂

Los sensores de dióxido de carbono basados en la tecnología NDIR (Infrarrojo no dispersivo), como el MH-Z19B, el SCD30 y el SCD41, representan el estándar para mediciones de alta precisión.

El módulo MH-Z19B opera con un voltaje de entre 4.5-5.5V y tiene un consumo de corriente promedio inferior a 60mA, con picos de hasta 150mA durante el ciclo de medición. Ofrece una precisión de $\pm (50\text{ppm} + 3\% \text{ de la lectura})$ en un rango de medición estándar de 0 a 5,000 ppm. Su interfaz de comunicación principal es UART. (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co, 2016)

FIGURA 12
Sensor MH-Z19B.



Nota. Sensor para la medición de CO₂, modelo *MH-Z19B*, con un costo aproximado de \$37.00.
Fuente: (*Amazon.Com: MH Z19B Del Módulo Del Sensor Del CO2*, n.d.)

El SCD30 funciona con un voltaje de 3.3V a 5.5V y tiene un consumo promedio de corriente de 19mA. Este sensor no solo mide CO₂ con una precisión de $\pm (30\text{ppm} + 3\%$ de la lectura) en un rango de 400 a 10,000 ppm, sino que también integra sensores de temperatura y humedad de alta precisión. Su única interfaz de comunicación es I2C. (Sensirion, 2020)

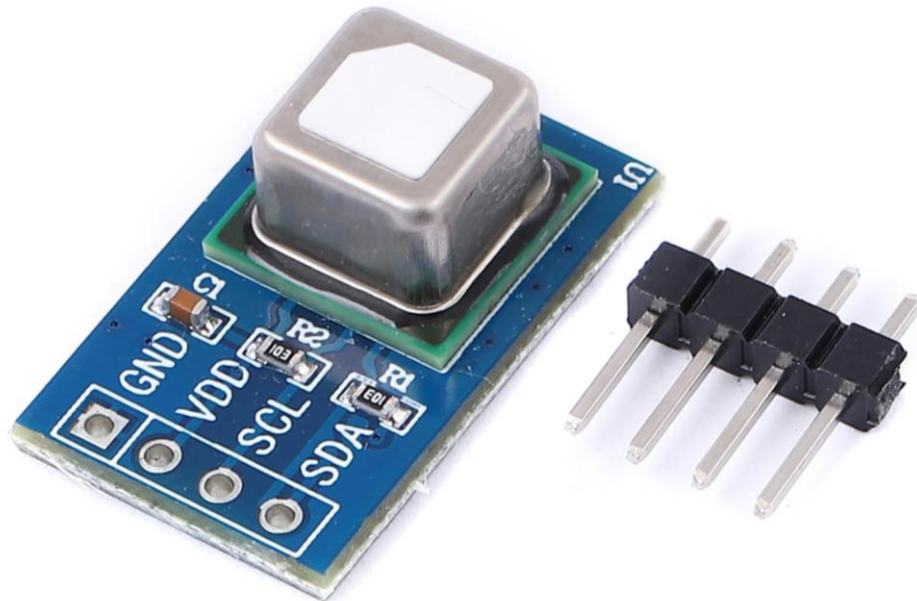
FIGURA 13
Sensor SCD30.



Nota. Sensor para la medición de CO₂, modelo *SCD30*, que integra la medición de temperatura y humedad, con un costo promedio aproximado de \$33.00. Fuente: (*SCD30 Sensirion / Mouser*, n.d.)

El SCD41 opera en un rango de voltaje más bajo, de 2.4V a 5.5V, y destaca por su consumo de corriente promedio de solo 0.5mA. Utiliza un principio de medición fotoacústico. Su precisión es de $\pm(40\text{ppm} + 5\% \text{ de la lectura})$ en un rango de 400 a 5,000 ppm y también se comunica exclusivamente a través de la interfaz I2C. (Sensirion, 2021)

FIGURA 14
Sensor SCD41

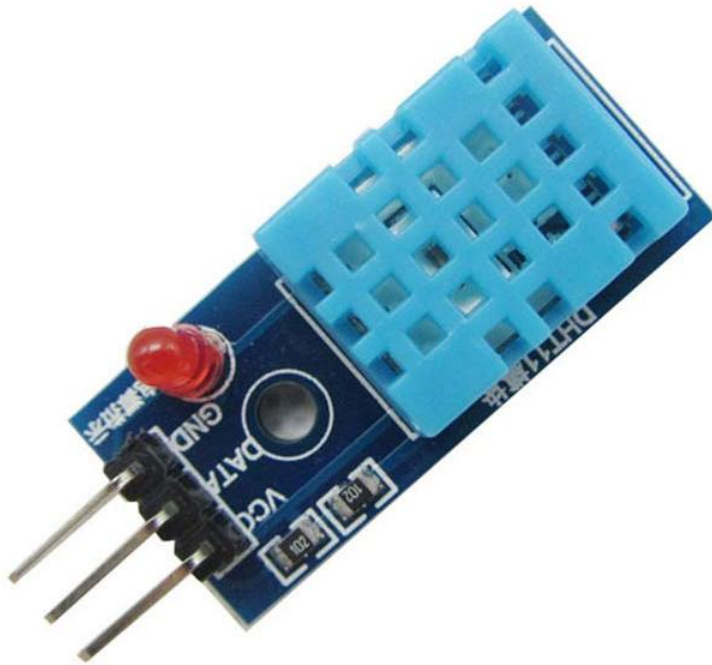


Nota. Sensor para la medición de CO₂, modelo SCD41 que integra la medición de temperatura y humedad, en un diseño más compacto dentro de la familia SCD4x, con un costo promedio aproximado de \$28.00. Fuente: (*Amazon.Com: Teyleten Robot Módulo de Sensor de Gas SCD41*, n.d.)

1.5.4 SENSORES DE HUMEDAD

El DHT11 funciona con un voltaje de 3.0 a 5.5 V y presenta un consumo entre 0.5-2.5 mA en operación activa; mide humedad relativa en un rango de 20% a 90% con una precisión de $\pm 5\%$, y temperatura de 0 °C a 50 °C con una exactitud de ± 2 °C. Posee protocolo digital de un solo hilo. (OSEPP, n.d.)

FIGURA 15
Sensor DHT1



Nota. Sensor para la medición de humedad, modelo DHT11 que integra la medición de temperatura a un bajo costo, con un precio promedio de \$9.00. Fuente: (*Amazon.Com: DHT11 Digital Temperatura y Humedad Sensor*, n.d.)

Mientras el DHT22 opera a un voltaje entre 3.3-6.0V, con un consumo es más eficiente, alrededor de 1 mA en estado de reposo, y puede medir humedad relativa desde 0% hasta 100% con una precisión de $\pm 2\%$ a $\pm 5\%$, adicionalmente registra temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una exactitud de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. También tiene integrado protocolo digital de un solo hilo. (*Aosong Electronics Co., n.d.*)

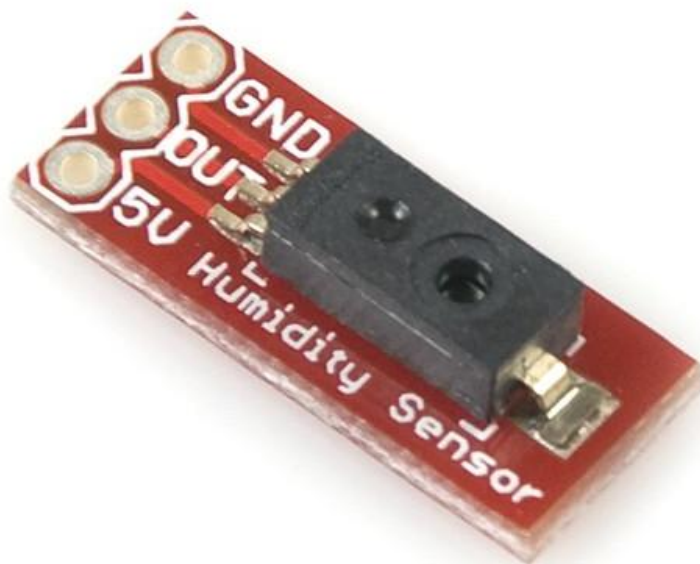
FIGURA 16
Sensor DHT22



Nota. Sensor DHT22 para la medición de humedad y temperatura, con un consumo más eficiente que el modelo DHT11, con un valor promedio aproximado de \$8.00. Fuente: (*Amazon.Com: SHILLEHTEK DHT22* , n.d.)

Por último, el HIH-4030 se distingue por ser un sensor analógico de humedad con un voltaje de operación de 4 a 5.8 V y un consumo sumamente bajo, en torno a 200 μ A, lo que lo hace adecuado para sistemas de bajo consumo energético. Su precisión se sitúa alrededor de $\pm 3.5\%$ en el rango completo de 0% a 100% de humedad. Requiere de un convertidor analógico-digital para su integración en microcontroladores. (Honeywell, 2008)

FIGURA 17
Sensor HIH-4030



Nota. Sensor HIH-4030 para la medición de temperatura, el cual posee un consumo de corriente bastante bajo y un rango de medición amplio, con un valor promedio aproximado de \$35.00.
Fuente: (*Humidity Sensor - HIH-4030 Breakout - Ingenieria C&C, n.d.*)

1.6 ALMACENAMIENTO EN LA NUBE

Las variables que inciden en el proceso de fermentación del cacao, como temperatura, humedad, pH y tiempo de exposición, presentan comportamientos característicos según la etapa en que se encuentren, y su evolución determina directamente la calidad del proceso y, en consecuencia, del producto final. La implementación de tecnologías IoT permite la adquisición continua de estos parámetros en tiempo real. No obstante, para que esta información sea útil en la toma de decisiones técnicas y en la mejora del proceso, es esencial contar con un sistema de almacenamiento que conserve el historial de datos registrados. Con el objetivo de tener un histórico que permite la visualización, el análisis retrospectivo y la identificación de patrones críticos, contribuyendo así a la optimización del proceso y al aseguramiento de la calidad.

El estudio "Performance Evaluation of Open Source IoT Platforms" presenta una evaluación de rendimiento sistemática de las plataformas de código abierto ThingsBoard y SiteWhere, que son

componentes centrales en la arquitectura del Internet de las Cosas (IoT). El análisis se enfoca en medir la escalabilidad y la estabilidad de estas plataformas cuando se someten a una carga pesada de datos de sensores. La escalabilidad se evalúa a través del rendimiento (mensajes por segundo) y el tiempo de respuesta, mientras que la estabilidad se mide por el uso de recursos (CPU y memoria) y la robustez (tasa de mensajes perdidos).

La investigación destaca que tanto ThingsBoard como SiteWhere ofrecen flexibilidad en sus opciones de base de datos, lo que es una consideración fundamental al diseñar una solución de almacenamiento en la nube. ThingsBoard es compatible con bases de datos como HSQLDB, PostgreSQL y, notablemente, Cassandra, que fue la utilizada en el experimento. Cassandra es una base de datos NoSQL reconocida por su alta disponibilidad y escalabilidad lineal, ideal para grandes volúmenes de datos. Por otro lado, SiteWhere se integra con MongoDB, HBase e InfluxDB. El uso de MongoDB en las pruebas apunta a una preferencia por un modelo de datos flexible basado en documentos, que facilita el almacenamiento de datos semiestructurados provenientes de diversos sensores. La elección entre estas bases de datos (relacionales como PostgreSQL frente a NoSQL como Cassandra o MongoDB) es una decisión arquitectónica clave que afecta directamente cómo se almacenan, consultan y escalan los datos de IoT en la nube.

En las pruebas con el protocolo REST, ThingsBoard mostró un rendimiento superior en comparación con SiteWhere. Sin embargo, al usar el protocolo MQTT, optimizado para IoT, SiteWhere logró un rendimiento de ingesta de mensajes (throughput) considerablemente mayor, aunque a costa de una alta tasa de error o pérdida de mensajes. ThingsBoard, en cambio, demostró ser más fiable y estable con MQTT, sin registrar errores. (Ismail et al., 2018)

Por otro lado, el artículo "Internet of Things Platforms for Academic Research and Development: A Critical Review" ofrece un análisis exhaustivo de más de 20 plataformas de IoT, con un enfoque particular en diez soluciones de código abierto consideradas más adecuadas para la investigación y el desarrollo académico. La relevancia de este estudio para la selección de una estrategia de almacenamiento en la nube radica en su metodología de evaluación, que utiliza un criterio clave denominado "integración con servicios externos". Este criterio se define específicamente como el soporte que ofrece la plataforma para la interconexión con servicios externos de almacenamiento y procesamiento, tales como bases de datos y sistemas de gestión de contenido.

Al analizar las plataformas de código abierto, el estudio revela diferencias notables en sus capacidades de integración con bases de datos externas. Plataformas como Kaa 0.X se destacan por ofrecer un amplio soporte para una variedad de bases de datos externas, incluyendo MongoDB, Oracle NoSQL, Kafka y Cassandra, permitiendo que los registros de datos recolectados sean enviados directamente a estas para su posterior procesamiento. En contraste, otras plataformas adoptan un enfoque basado en conectores o flujos de datos; por ejemplo, SiteWhere utiliza "conectores de salida" para reenviar eventos a sistemas como Azure y Apache Solr, mientras que ThingsBoard permite la integración con plataformas de análisis externas mediante flujos de Kafka. Otras, como Eclipse Kapua, proporcionan almacenamiento persistente NoSQL pero sin el mismo nivel de detalle sobre integraciones específicas. Esta diversidad de enfoques subraya que la elección de una plataforma IoT condiciona directamente las arquitecturas de almacenamiento en la nube que se pueden implementar, ya sea a través de conexiones directas a bases de datos o mediante sistemas de mensajería asíncrona. (Saguidon et al., 2024)

No basta con evaluar únicamente la capacidad de guardar datos, sino también la forma en que dichos datos pueden ser gestionados, analizados y visualizados. En este sentido, el estudio “A Systematic Mapping Study about IoT Platforms” ofrece un análisis comparativo de varias plataformas open-source, resaltando la importancia de valorar criterios técnicos y operativos antes de tomar una decisión.

El estudio compara siete plataformas destacadas: ThingsBoard, Kapua, Mainflux, SiteWhere, OpenRemote, FIWARE y Node-RED, examinando catorce características diferentes, las cuales son: Terminología de abstracción y modelo, Conectividad, Despliegue, Comunicación persistente y manejo de mensajes, Seguridad, Gestión de usuarios: Autorización, Procesamiento de datos y acciones, Mecanismos de resiliencia, Tecnologías de escalado, Soporte de alojamiento en la nube, Visualización de datos, Análisis de datos, Modelo de licencia, y por último Rendimiento de escalabilidad y estabilidad. En esta evaluación, ThingsBoard fue la que obtuvo el puntaje total más alto, evidenciando un buen balance entre funcionalidad, estabilidad y facilidad de uso, aunque con

una debilidad señalada en el área de Data Analytics (análisis de datos), pues hasta la fecha de corte del estudio, esa funcionalidad estaba limitada o no era tan avanzada como en otras plataformas.

FIGURA 18

Puntuación de plataformas de almacenamiento en la nube

Platform	Score	Platform	Score
ThingsBoard	30.5	Kapua	23.0
Mainflux	24.75	SiteWhere	21.5
Node-Red	24.5	OpenRemote	20.5
Fiware	24.25		

Nota. Puntaje obtenido por cada una de las plataformas de almacenamiento de la nube en el estudio “A Systematic Mapping Study about IoT Platforms”, donde ThingsBoard destaca como la mejor opción entre los criterios evaluados. Fuente: (Bruno & Felice, 2023)

Lo más relevante de este estudio al comparar opciones de almacenamiento en la nube es que muestra cómo una plataforma como ThingsBoard no solo proporciona almacenamiento, sino infraestructura complementaria: dashboards, gestión de dispositivos, seguridad, escalabilidad, visualización, etc. Es decir, la nube de almacenamiento no es solo el espacio físico para guardar datos, sino también los servicios que rodean ese almacenamiento. La debilidad en Data Analytics sugiere que quizá para análisis avanzados o machine learning, podría ser necesario complementarlo con otros servicios. (Bruno & Felice, 2023)

El análisis también resalta que el nivel de mantenimiento, la comunidad activa y la documentación disponible son factores decisivos para garantizar la sostenibilidad de una plataforma de almacenamiento en la nube.

Por lo que, de acuerdo a los resultados Mainflux y Node-Red, representan una segunda y tercera opción, respectivamente. Mainflux es una plataforma de *middleware* orientada a IoT que ofrece un sistema robusto para la gestión de dispositivos, usuarios y datos. Está diseñada para soportar arquitecturas distribuidas y escalables, con capacidades de seguridad, autenticación y autorización mediante protocolos estándar. Una de sus funciones principales es actuar como un *hub* de mensajería, permitiendo la comunicación a través de protocolos como MQTT, HTTP, WebSocket y CoAP.

Node-RED, en cambio, se centra en la orquestación y procesamiento de flujos de datos mediante una interfaz visual de programación por bloques. Su principal función es permitir la integración sencilla de distintos servicios, APIs y dispositivos IoT, sin necesidad de desarrollar código complejo.

FIGURA 19

Características evaluadas a las opciones de almacenamiento en la nube

#	Feature	Score
1	Abstraction and Model terminology	2
2	Connectivity	3
3	Deployment	3
4	Persistent communication and Message handling	3
5	Security	3
6	User management—Authorization	3
7	Data and Action processing	3
8	Resilience mechanisms	2
9	Scaling technologies	3
10	Cloud hosting support	3
11	Data visualization	3
12	Data analytics	1
13	License model	3
14	Scalability and Stability performance	3

Nota. Características evaluadas a cada una de las plataformas de almacenamiento de la nube en el estudio “A Systematic Mapping Study about IoT Platforms”, con una puntuación entre 1-3, donde 1 indica que no cumple los requisitos, 2 indica que se cumple de forma parcial y 3 indica que la característica se cumple en la totalidad. Fuente: (Bruno & Felice, 2023)

CAPITULO 2: DISEÑO DEL PROTOTIPO

Se diseñó un prototipo de fermentación de cacao con el método de tambor rotatorio, el cual se compone de dos partes:

1. Sistema de volteo.
2. Sistema de monitoreo de variables de interés.

Para el funcionamiento y conectividad de los componentes, se optó por el uso de la ESP WROOM 32, debido a su costo económico, además para aplicaciones IoT permite la conectividad de una forma sencilla. Aunque Raspberry Pi, permite también el acceso a Wi-Fi, el ESP32 cuenta con más periféricos "listos para usar", como sensores de efecto Hall, sensores táctiles capacitivos y convertidores digital-analógico (DAC). Además, representa un mejor acceso y uso, gracias al soporte de Arduino IDE y MicroPython, la curva de aprendizaje del ESP32 es menos pronunciada, mientras que el ecosistema de STM32 (STM32CubeMX, HAL) es más profesional y complejo.

2.1 SISTEMA DE VOLTEO

2.1.1 TOMBOLA DE FERMENTACIÓN

Para el diseño del prototipo, se optó por utilizar madera de cedro debido a su disponibilidad local y facilidad de mantenimiento, lo que facilita su adopción y reemplazo. Ya que el cedro destaca por su capacidad de conservar el calor generado por la actividad microbiana, y con ello, la formación de precursores de aroma y sabor. Su principal ventaja radica en su excelente capacidad de aislamiento térmico, lo que permite conservar el calor generado durante la fermentación,

El prototipo presenta un diámetro de 0.25 metros y una longitud de 0.35 metros, con brazos en los extremos que incorporan rodamientos para sostener un eje de hierro de ½ pulgada de diámetro, minimizando así la fricción durante el giro.

Cada renglón de madera que compone la tómbola tiene un ancho de 4 cm y un grosor de 2 cm, con una separación aproximada de 0.25 cm entre ellos, permitiendo el drenaje de líquidos y el flujo de aire.

FIGURA 20*Tómbola para fermentación de cacao*

Nota. Vista frontal de tómbola de fermentación de madera de cedro, con brazos en los costados para sostener el eje que permite la rotación de esta. Fuente: Elaboración propia

FIGURA 21*Tómbola para fermentación de cacao*

Nota. Vista lateral de tómbola de fermentación, cada uno de sus brazos incorpora rodamientos para reducir la fricción al momento de los giros. Fuente: Elaboración propia

2.1.2 MECANISMO DE VOLTEO

El volteo automático durante la fermentación del cacao se lleva a cabo mediante un motor de cricos con n° de pieza 91498535 para Jeep Renegade, a pesar que el fabricante no proporciona las especificaciones de la pieza, estudios determinan que el rango se encuentra entre los 10 lb-pie a 20 lb-pie, por lo que se asume un valor genérico de 15 lb-pie (20.34 Nm).

FIGURA 22

Motor utilizado para el volteo de la tómbola



Nota: Motor de limpiaparabrisas para vehículo marca Jeep modelo Renegade, el cual se encarga de rotar la tómbola durante el periodo de fermentación, a bajas revoluciones para obtener un proceso homogéneo. Fuente: (INJELETRICA Motor Limpador Parabrisa Jeep Renegade 2018/2020 - 91498535, n.d.)

Este motor está acoplado a un sistema compuesto por un piñón de 14 dientes, una catarina de 46 dientes, una cadena y chumaceras, lo que permite que el torque en el eje sea aproximadamente 3.29 veces mayor que el torque que ofrece el motor, es decir una salida de 66.92 Nm, además la

velocidad angular es 0.30 veces la velocidad del motor. Este sistema acciona una tómbola de madera, especialmente adaptada para contener y rotar uniformemente el total del grano durante el proceso fermentativo.

FIGURA 23

Sistema mecánico para el volteo del cacao



Nota. Sistema mecánico que permite aumentar el torque que brinda el motor, como también tener revoluciones más bajas a la salida. Fuente: Elaboración propia

Se realizó una caracterización experimental de la velocidad de rotación del motor (RPM) bajo distintos niveles de ajuste de velocidad, utilizando una carga constante de 45 lb aplicada sobre la tómbola. Durante esta prueba, también se registró el consumo de corriente asociado a cada

condición de operación, con el objetivo de evaluar el comportamiento eléctrico del sistema bajo carga. Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 1* y *Tabla 2*.

Tabla 1

Consumo de corriente y RPM del motor en sentido de giro antihorario.

Velocidad Nominal	Corriente [A]	RPM
20%	-	-
30%	1.63	1.49
40%	1.81	2.75
50%	1.82	3.77
60%	1.91	4.67
70%	2.2	5.55
80%	2.31	6.59
90%	2.24	7.03
100%	2.24	7.09

Nota: Datos obtenidos de forma experimental mediante pruebas en laboratorio.

Tabla 2

Consumo de corriente y RPM del motor en sentido de giro horario

Velocidad Nominal	Corriente [A]	RPM
20%	-	-
30%	1.22	1.56
40%	1.39	2.99
50%	1.37	4.44
60%	1.43	5.80
70%	1.49	7.16
80%	1.53	8.28
90%	1.59	9.72
100%	1.61	10.81

Nota: Datos obtenidos de forma experimental mediante pruebas en laboratorio.

De acuerdo a las dimensiones de la tómbola esta posee el siguiente volumen:

$$V = \pi * r^2 * L \quad [1]$$

$$V = 0.01718 \text{ m}^3$$

Según la literatura se sugiere que la tómbola sea llenada a un 70% de su capacidad, para permitir que los granos tengan espacio libre durante el volteo, por lo que el volumen máximo al que se ve sometida es:

$$V_{\text{cacao}} = 0.70 * V$$

$$V_{\text{cacao}} = 0.01203 \text{ m}^3$$

Además, basado en estudios la densidad del cacao en grano es aproximadamente 900 kg/m^3

$$m = V * \rho \quad [2]$$

$$m = 10.83 \text{ kg}$$

Para un tambor giratorio con material granular, el torque máximo ocurre cuando el material está en la posición más desfavorable (elevándose antes de caer). La fórmula aproximada para torque en tambor giratorio con material es:

$$\tau = m * g * r * \mu \quad [3]$$

Donde

m = masa

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

r = radio de la tómbola

μ = coeficiente de fricción entre material y tambor (aproximadamente 0.5)

$$\tau = 6.64 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, el torque necesario para mover la tómbola es aproximadamente 6.64 Nm . El sistema entrega 66.92 Nm , lo cual es suficiente (10 veces mayor), asegurando un funcionamiento sin problemas incluso con carga máxima y fricción adicional. Lo que permite incorporar el sistema de volteo en tómbolas de mayor capacidad.

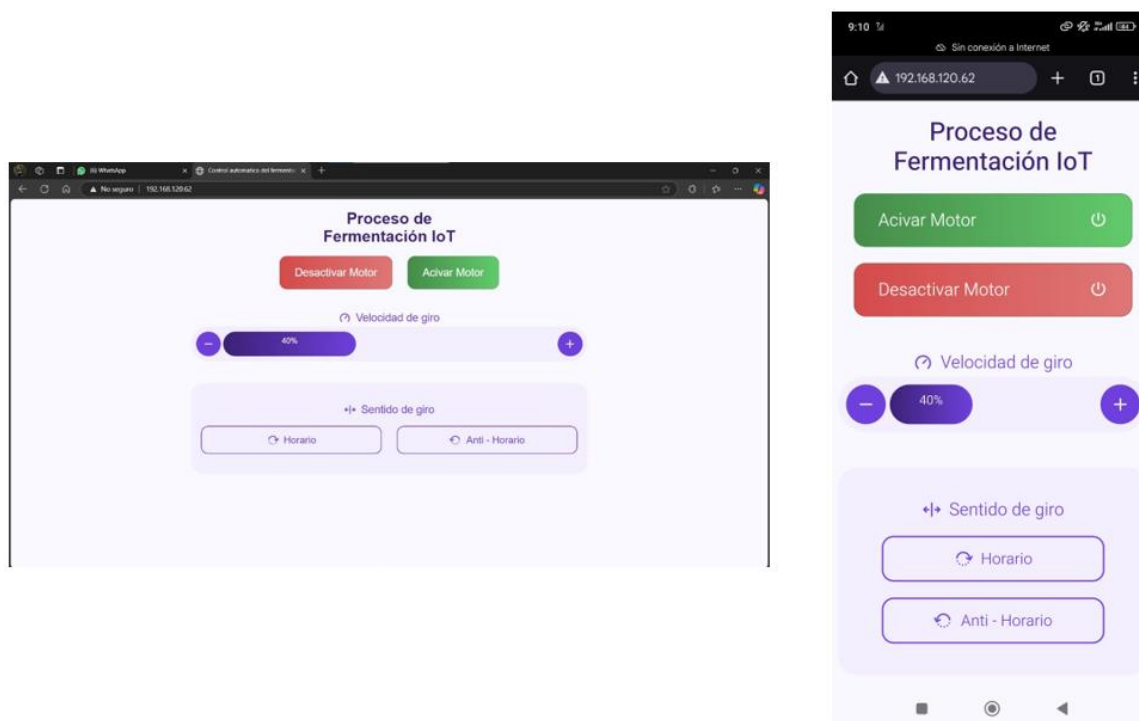
2.1.3 CONTROL DE VOLTEOS

La lógica de control implementa también una rutina de giro automático durante un periodo específico, gestionando esto mediante el uso de contadores de tiempo, sin bloquear la ejecución del programa. Es decir que, el sistema opera en dos modos complementarios:

- En el modo automático, la ESP32 activa el motor de forma periódica, permitiendo que este realice giros temporizados sin necesidad de intervención humana, los cuales han sido programados cada 24 horas.
- En el modo manual, el usuario puede controlar el motor desde una interfaz web local, alojada por el mismo microcontrolador. Desde esta página es posible modificar la dirección de giro, ajustar la velocidad y activar o detener el motor en tiempo real mediante cualquier dispositivo conectado a la misma red WiFi.

FIGURA 24

Interfaz para el control del motor



Nota. Control del sistema de volteo a demanda por el usuario, a la izquierda se muestra la interfaz para PC y a la derecha la interfaz para Smartphone. Fuente: Elaboración propia.

2.1.4 CIRCUITO DE CONTROL DE VOLTEO

El control del motor se implementa a través del módulo VNH2SP30, el cual es controlado por la placa ESP32 WROOM-32. El motor cuenta con tres señales de control: dos pines digitales (IN1 y IN2) que determinan la dirección de giro, y una señal PWM (PWM) que regula la velocidad de rotación.

En primer lugar, la dirección del motor se establece comparando el valor de la variable con las constantes definidas para el sentido horario y antihorario. Cuando se selecciona el giro horario, el pin IN1 se activa en nivel alto y IN2 en nivel bajo, permitiendo el avance del motor en esa dirección. En cambio, al seleccionar el giro antihorario, los estados lógicos se invierten.

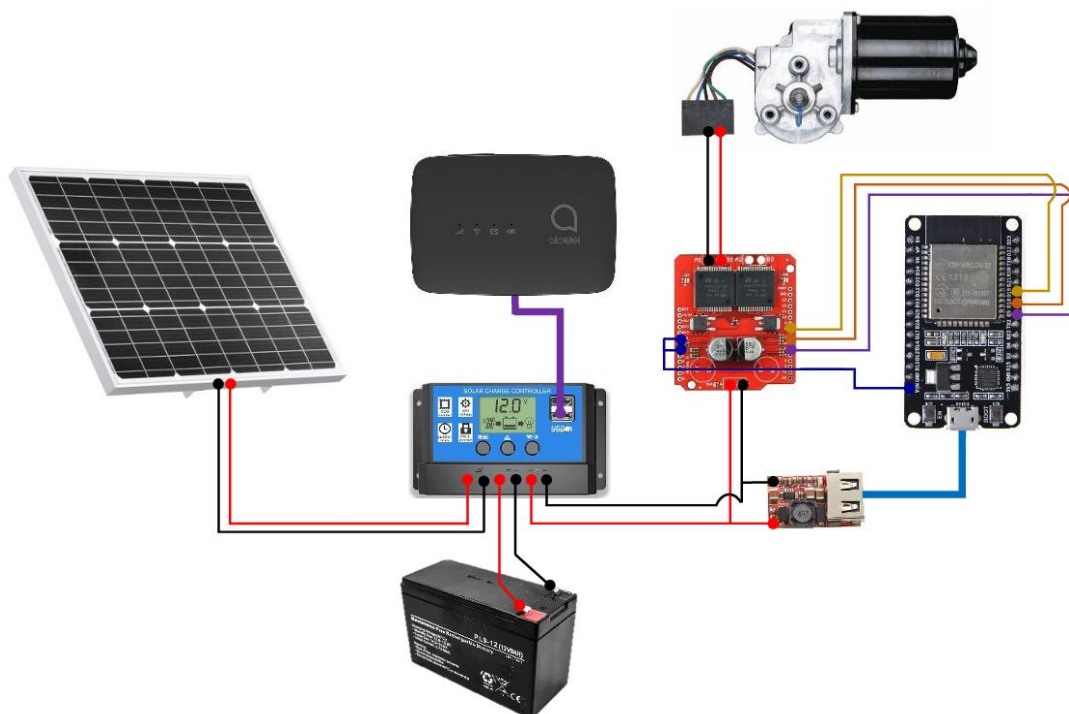
La velocidad se ajusta mediante modulación por ancho de pulso (PWM) generada en el pin PWM. El ciclo de trabajo de la señal se calcula en función de una variable, la cual puede variar entre un límite mínimo (20 %) y máximo (100 %).

El código implementa un modo automático basado en temporización: cada 24 horas (86400000 ms) y 48 horas (172800000 ms), simulando un proceso de volteo controlado de forma periódica.

Además, el microcontrolador ESP32 WROOM-32, al inicializarse, establece la conexión con la red inalámbrica mediante las credenciales configuradas, por medio de un modem Alcatel mw45an. Una vez que el proceso de autenticación con el punto de acceso Wi-Fi se completa correctamente, el dispositivo recibe de forma automática una dirección IP local dentro del rango de la red a la cual se encuentra conectado. Importante destacar que el dispositivo inteligente con el cual se controle de forma manual los giros, debe estar conectado a la misma red que la ESP WROOM 32.

FIGURA 25

Circuito que controla el volteo durante la fermentación



Nota. Conexión de los componentes electrónicos que controlan el volteo de la tómbola durante la fermentación. Fuente: Elaboración propia

2.2 SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES

2.2.1 CIRCUITO DE MONITOREO DE VARIABLES

El monitoreo de las variables físico-químicas está basado en el microcontrolador ESP32-WROOM-32, el cual cumple funciones clave dentro del sistema de monitoreo IoT. Este dispositivo coordina la lectura de sensores, el control de actuadores, la gestión de la conectividad WiFi, así como la transmisión de datos hacia la nube.

De acuerdo a las opciones detalladas en la sección anterior, considerando los rangos de medición, los costos económicos y la compatibilidad con la ESP 32, para la temperatura se optó por el FS400-SHT30, ya que también mide temperatura, controlando dos variables desde un mismo dispositivo permitiendo el uso de menos componentes. Para la medición del pH, se eligió el PH-4502C debido

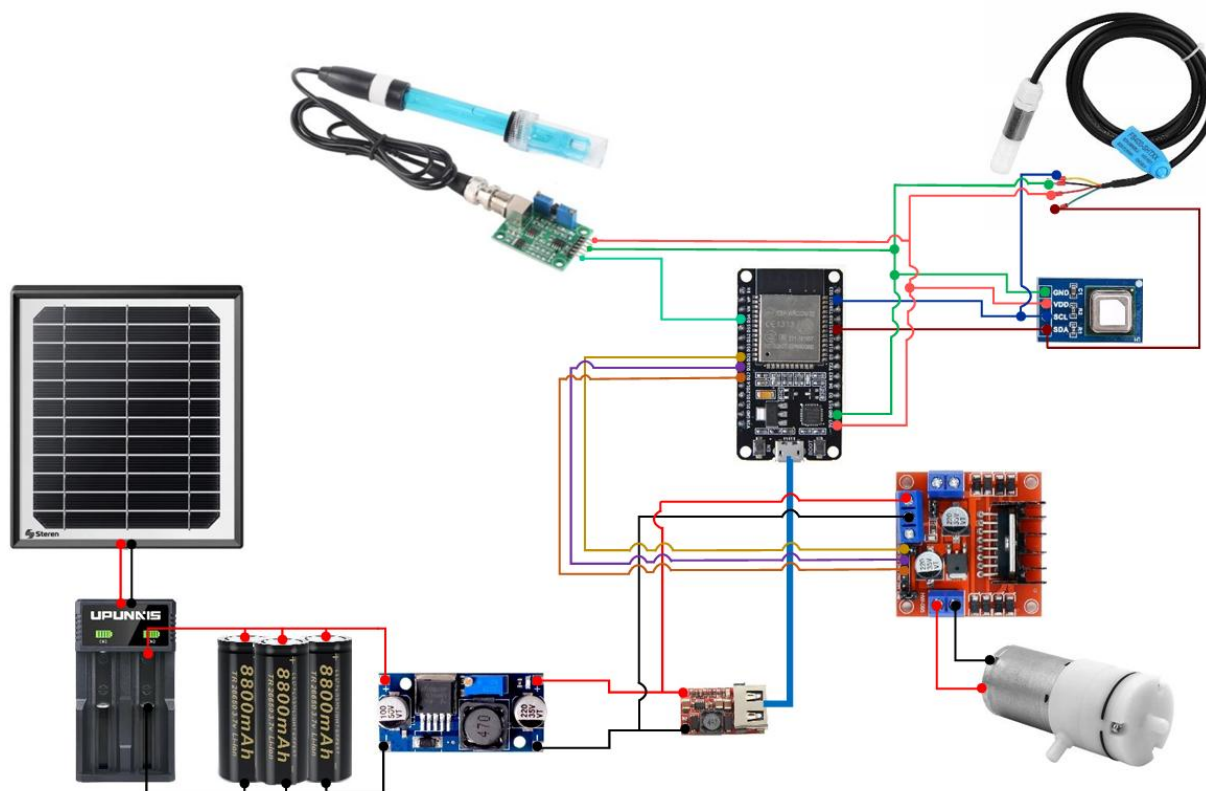
a que el resto de componentes son para aplicaciones más profesionales lo que genera que su precio se triplique, finalmente para el CO₂, se optó por el SCD41 debido a sus características (además mide temperatura y humedad).

El sensor digital FS400-SHT30, es conectado mediante el bus I2C, al igual que el SCD41. Para la medición del pH de la mezcla, se utiliza un sensor analógico conectado al pin GPIO 34 de la ESP32. La activación de una pequeña bomba de aire está controlada por la ESP32 mediante un módulo L298N, utilizando los pines GPIO 25, 26 y 27 para habilitación y control de dirección.

Durante cada ciclo de medición, programado para repetirse cada 15 minutos, se recogen los datos de temperatura, humedad, pH y CO₂. Previo a la lectura del sensor de CO₂, se activa automáticamente una bomba de aire, permitiendo que el gas circule hasta la cámara de medición. Esta bomba se activa 20 segundos antes del ciclo de lectura para garantizar condiciones estables. Una vez recolectados, los datos son procesados por la ESP32 y transmitidos a la nube utilizando el protocolo MQTT, a través de una conexión WiFi, mediante el modem Alcatel mw45an. En caso de que la conexión MQTT falle, se implementa una estrategia de respaldo mediante el envío de los datos por HTTP POST al servidor ThingsBoard.

FIGURA 26

Circuito de monitoreo de las variables de durante la fermentación.

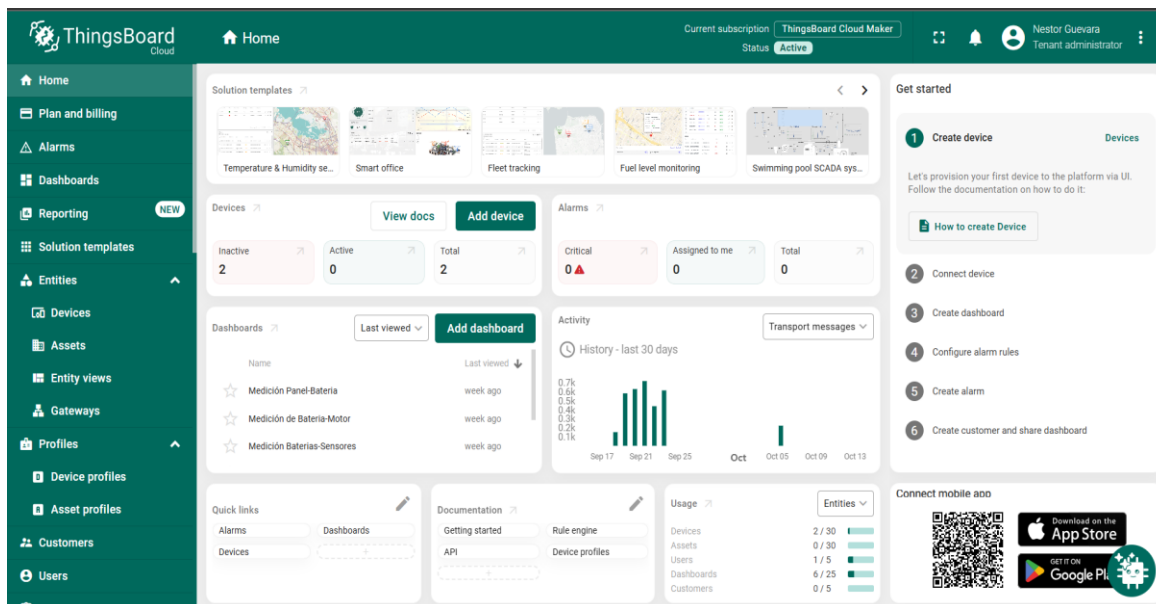


Nota. Conexión de los sensores y todos los componentes electrónicos, encargados de realizar las mediciones durante el proceso de fermentación y enviar los datos hacia el servidor de la nube.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez los datos son registrados y enviados al servidor, estos pueden ser monitoreados por el usuario desde cualquier Smartphone o PC.

FIGURA 27

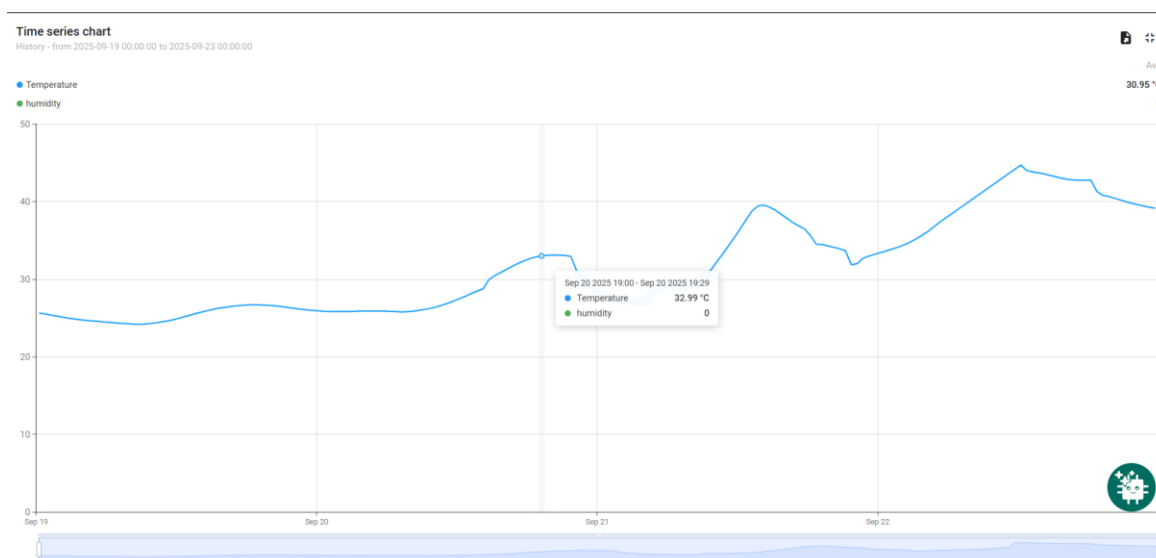
Pantalla de inicio en ThingsBoard.



Nota. Pantalla principal del servidor de la nube. Fuente: (ThingsBoard — Open-Source IoT (Internet of Things) Platform, n.d.)

FIGURA 28

Monitoreo de variables.



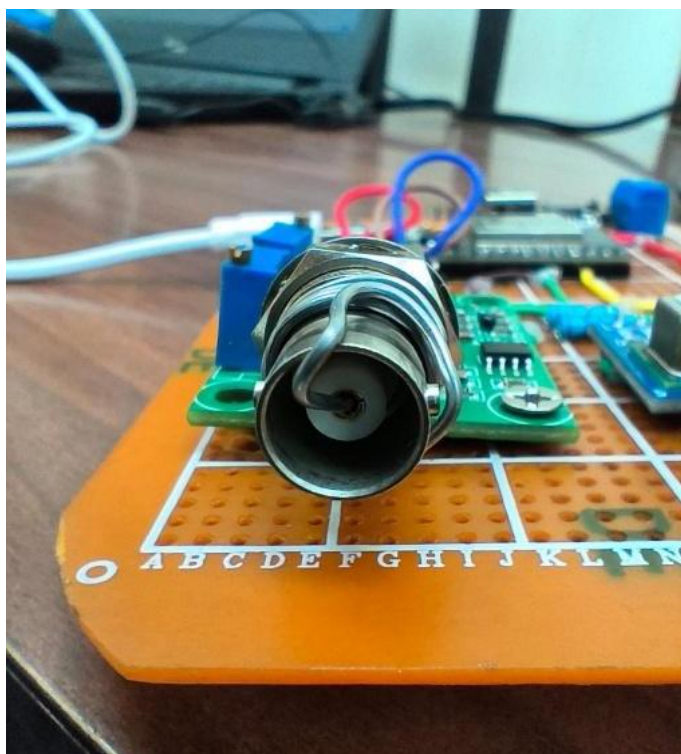
Nota. Visualización de valores medidos en tiempo real. Fuente: (ThingsBoard — Open-Source IoT (Internet of Things) Platform, n.d.)

2.2.2 CALIBRACIÓN DE SENSORES

Para la calibración del sensor de pH, antes de conectar el módulo al ESP32 se ajustó el límite de potenciómetro 2. Para esto fue necesario realizar un puente entre las terminales BNC.

FIGURA 29

Puente entre las terminales BNC del módulo del sensor de PH.



Nota. Puente entre las terminales BNC del PH-4502C, con el potenciómetro ajustado al límite.
Fuente: Elaboración propia.

Luego, se alimentó el módulo con 3.3V y tierra GND, posterior, con la ayuda de un multímetro midiendo el voltaje entre la terminal Po (+) y GND (-), se ajustó el voltaje más bajo que debe estar entre 2.5 V y 3.0 V con ayuda del potenciómetro 2.

Posterior, se procedió a calibrar utilizando soluciones buffer de pH conocidas. Antes de usar, se removió el electrodo de la solución de almacenamiento, se enjuago y se secó con un paño suave y limpio luego se sumergió el electrodo en la solución buffer de pH 4.01 y con la ayuda de un multímetro se tomó nota del voltaje en las terminales Po (+) y GND, se repitió este proceso con las soluciones buffer de 7.00 y 10.01.

FIGURA 30

Valores de voltaje a distintos niveles de pH.



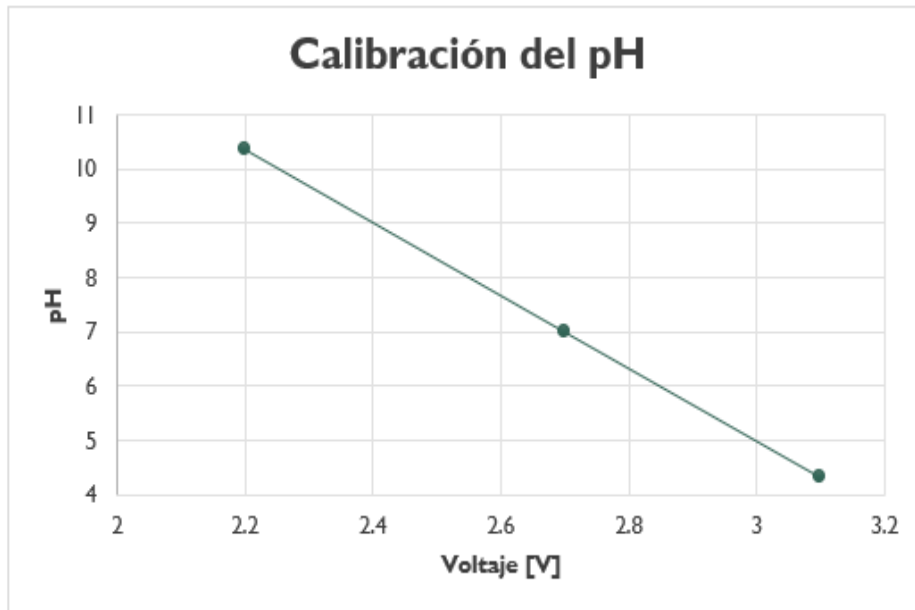
Nota. Medición de voltaje las terminales Po (+) y GND del PH-4502C a distintos valores de pH utilizando soluciones buffer. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Valores de pH asociados a su medición de voltaje

Voltaje (X)	3.1	2.7	2.2
pH(Y)	4.01	7.00	10.01

Nota. Datos tomados de forma experimental.

FIGURA 31*Gráfica de Voltaje vs pH*

Nota. Valores de voltaje vs pH determinados de forma experimental. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que, su curva característica es:

$$y = -6.67x + 25.01 \quad [4]$$

FIGURA 32*Programación de la calibración del sensor de pH.*

```
// Calibración PH para cacao
struct PHCalibration {
  const float ph4 = 3.03; // Voltaje a pH 4.01
  const float ph7 = 2.60; // Voltaje a pH 7.00
  const float ph10 = 2.15; // Voltaje a pH 10.01
} phCalibration;

float readPH() {
  int rawValue = analogRead(PH_PIN);
  float voltage = rawValue / 4095.0 * 3.3;

  float slope = (10.01 - 4.01) / (phCalibration.ph10 - phCalibration.ph4);
  float intercept = 4.01 - (slope * phCalibration.ph4);

  return slope * voltage + intercept;
}
```

Nota. Implementación de curva de voltaje y pH en el código fuente. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la calibración del sensor de CO₂, se realizó la recalibración forzada (FRC) siguiendo una serie de pasos. Para la comunicación con el sensor, se utilizó la librería oficial de sensirion SensirionI2Cscd4x por lo que se instaló y luego se inicializó el sensor por medio del protocolo I2C. Se operó el SCD41 en el modo que se utilizaría posteriormente para el funcionamiento normal del sensor, `periodic_measurement` (medición periódica) durante 3 minutos en un entorno con una concentración de CO₂ homogénea y constante.

Se emitió el comando de `stop_periodic_measurement`. Se espera 500 ms a que se complete el comando de parada. Posteriormente, se emitió el comando `perform_forced_recalsibration`, y se observó la corrección FRC (es decir, la magnitud de la corrección) después de esperar 400 ms a que se completara el comando.

FIGURA 33

Programación de la calibración forzada del SCD41.

```
// 2. Realizar recalibración forzada
uint16_t correccionFrc;
error = scd4x.performForcedRecalibration(co2Referencia, correccionFrc);

delay(400); // Esperar 400 ms como indica la documentación

if (error == 0 && correccionFrc != 0xFFFF) {
  Serial.print("Calibración forzada completada. Corrección aplicada: ");
  Serial.print(correccionFrc);
  Serial.println(" ppm");
} else {
  Serial.print("Error en calibración forzada. Código: ");
  Serial.print(error);
  Serial.print(", Corrección: ");
  Serial.println(correccionFrc, HEX);
}
```

Nota. Ejecución del comando `perform_forced_recalsibration` utilizando una concentración de CO₂ de referencia (400 ppm). Fuente: Elaboración propia.

Para estar seguros de los datos obtenidos, se realizó una comparación de datos del sensor SCD41 con el equipo de medición de CO₂ de la facultad de Agronomía de la Universidad de El Salvador.

FIGURA 34

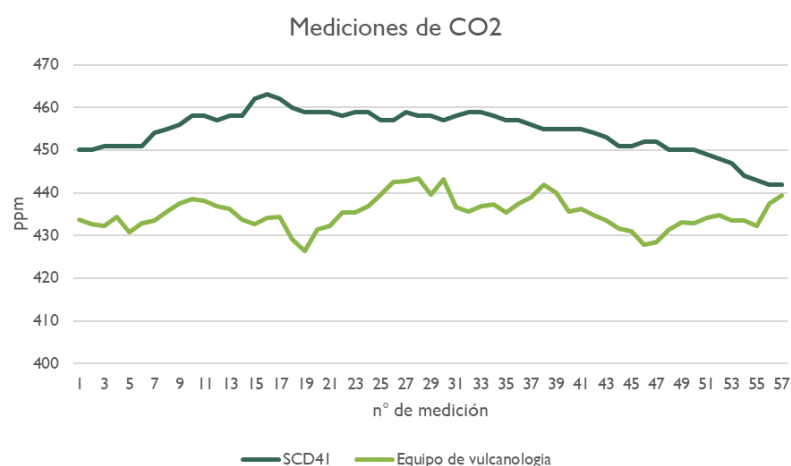
Calibración por comparación del sensor de CO₂



Nota. Comparación de mediciones del equipo de medición del laboratorio de vulcanología de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, contra las mediciones del SCD41. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 35

Comparación de mediciones de CO₂



Nota. Comparación entre las mediciones de CO₂ durante la calibración. Fuente: Elaboración propia

Para el caso particular del FS400-SHT30, no se realiza una calibración nivel de código como el caso anterior, sin embargo, si se aplicó una calibración por comparación, mediante el uso de un multímetro Klein Tools MM420, el cual posee rangos de medición de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, el realiza la medición con un termopar tipo K, con una resolución de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el rango de $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, además de una exactitud de $\pm (1.2\% + 3^{\circ}\text{C})$.

Además, estos mismos datos fueron contrastados contra los registrados por otro termómetro comercial.

2.3 PROGRAMACIÓN DE LOS MICROCONTROLADORES

2.3.1 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE VOLTEO

Inicialmente se importaron las librerías necesarias para el funcionamiento del sistema, en el caso de Wifi.h para la conexión wifi de la esp32, WifiClient.h para conexiones de red, WebServer.h para la creación de servidores locales, ESPmDNS.h habilita el acceso por nombre de dominio local y PubSubClient.h implementa el protocolo MQTT para comunicación con la nube de Thingboard.

FIGURA 36

Librerías para el control del motor

```
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WebServer.h>
#include <ESPmDNS.h>
#include <PubSubClient.h> // <-- MQTT para ThingsBoard
```

Nota. Inclusión de librerías para el control del motor en ambos modos de operación. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó el protocolo MQTT para el envío de datos a la nube, usando el puerto estándar MQTT (1883). Además, el ACCESS_TOKEN funcionó como el identificador único del dispositivo en

Thingboard. La conexión MQTT con Thingboard define el servidor cloud, el token de acceso único creó un cliente wifi y un cliente MQTT que utilizaría esa conexión para el envío de datos.

FIGURA 37

Configuración de credenciales.

```
// ThingsBoard MQTT
const char* THINGSBOARD_SERVER = "thingsboard.cloud";
const int THINGSBOARD_PORT = 1883;
const char* ACCESS_TOKEN = "8qh8joklwfqo4xnsjay"; // <-- Reemplaza con tu
token
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
```

Nota. Uso del protocolo MQTT para el envío de datos a la nube y configuración de credenciales de la red Wi-Fi como también de ThingsBoard. Fuente: Elaboración propia.

Se configuraron de pines de control: IN1/IN2 controlaron la dirección de giro, mientras que el pin 19 controló la velocidad de giro mediante PWM (modulación por ancho de pulso) usando el driver VN2SP30 el cual es un driver de puente H.

FIGURA 38

Configuración de pines para el control del motor.

```
// Pines del VN2SP30
#define IN1 18
#define IN2 5
#define PWM 19
```

Nota. Asignación de pines para la ESP32 y el driver VN2SP30, para controlar la dirección y velocidad de giro. Fuente: Elaboración propia.

Para el control automático del motor se implementaron temporizadores los cuales, una vez inicializado el sistema, éste realizó el primer giro a las 48 horas y luego los siguientes giros los realizó cada 24 horas obteniendo así un giro por cada día.

FIGURA 39*Temporizador de giros*

```
// Control automático
unsigned long previousMillis = 0;
const unsigned long initialDelay = 172800000; // 48 horas en milisegundos
const unsigned long normalInterval = 86400000; // 24 horas en milisegundos
const long motorRunTime = 60000; // Tiempo total de giro (60 segundos)
bool autoRunning = false;
unsigned long motorStartMillis = 0;
const long motorDuration = 60000;
bool firstCycleCompleted = false; // Bandera para primer ciclo
```

Nota. Uso de temporizadores para el control de giro de acuerdo a los periodos y ciclos adecuados para el proceso de fermentación. Fuente: Elaboración Propia.

Por último, la función de inicialización que se ejecuta una vez al iniciar el esp32. Configura la comunicación serial, establece los pines del motor como salidas, inicializa el hardware PWM, conecta a wifi, inicia los servidores web y configura el cliente MQTT.

FIGURA 40*Función de inicialización*

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(IN1, OUTPUT);
  pinMode(IN2, OUTPUT);
  ledcSetup(0, 5000, 8);
  ledcAttachPin(PWM, 0);

  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Conectando a WiFi");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nWiFi conectado");
  Serial.print("IP ESP32: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  if (MDNS.begin("robojaxESP32")) {
    Serial.println("MDNS iniciado");
  }
}
```

```

}

// MQTT
client.setServer(THINGSBOARD_SERVER, THINGSBOARD_PORT);

```

Nota. Función de inicialización para la configuración de la conectividad y la configuración de pines utilizados. Fuente: Elaboración Propia.

2.3.2 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES

El sistema está diseñado para capturar, procesar y transmitir variables críticas que influyen en la calidad del proceso fermentativo, permitiendo un control preciso y remoto de las condiciones ambientales.

El código se inició con la importación de las librerías esenciales que proporcionaron las funcionalidades base del sistema. WiFi.h permitió la conectividad a redes inalámbricas, HTTPClient.h facilitó el envío de datos mediante protocolo HTTP, Wire.h maneja la comunicación I2C con los sensores, PubSubClient.h implementó el cliente MQTT para comunicación eficiente con la nube, ArduinoJson.h procesa datos en formato JSON para intercambio de información, y WebServer.h crea un servidor web local para acceso directo al dispositivo.

FIGURA 41

Configuración de librerías del sistema de sensores.

```

#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <Wire.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include <WebServer.h>

```

Nota. Importación de librerías para el sistema de monitoreo de variables. Fuente: Elaboración propia.

La configuración de red definió las credenciales de acceso a la red WiFi con su respectiva contraseña. Para la integración con la plataforma cloud, se configura ThingsBoard como el servidor destino, utilizando el token de dispositivo para autenticación. El sistema generó

dinámicamente la URL completa para envío HTTP de telemetría, combinando el host, puerto y token en una cadena única. Paralelamente, se configuró el broker MQTT utilizando el mismo host de Thingsboard pero en el puerto 1883, estándar para MQTT, con un intervalo de reconexión de 5 segundos que garantiza recuperación rápida ante caídas de conexión.

FIGURA 42

Configuración de conexión.

```
// *** CONFIGURACIÓN ***
const char* WIFI_SSID = "CacaoIOT";
const char* WIFI_PASSWORD = "fermentador2025";

// ThingsBoard
const char* TB_HOST = "thingsboard.cloud";
const char* TB_DEVICE_TOKEN = "qxMLyDI90kEs6A4ZaBAY";
const String TB_URL = "https://" + String(TB_HOST) + ":8080/api/v1/" +
String(TB_DEVICE_TOKEN) + "/telemetry";

// MQTT
const char* MQTT_BROKER = TB_HOST;
const int MQTT_PORT = 1883;
const char* MQTT_TOPIC = "v1/devices/me/telemetry";
const unsigned long MQTT_RECONNECT_INTERVAL = 5000; // 5 segundos para
reconexión
```

Nota. Configuración de las credenciales y conectividad del sistema con el servidor en la nube.

Fuente: Elaboración propia.

PH_PIN y BATTERY_PIN utilizan ADC1 (canal 6 y 5) con resolución de 12 bits. Los pines 25,26,27 son pines asignados a la bomba configurados para controlar el driver L298N el cual tiene la función de controlar la bomba.

Se utilizó el protocolo I2C comunicación a 100kHz estándar para lectura simultánea de múltiples sensores como el SCD41 y el SHT30 el cual es un sensor de temperatura y humedad.

La asignación de pines del ESP32 se realizó estratégicamente para optimizar el funcionamiento del sistema. El PH_PIN 34 y BATTERY_PIN 33 utilizo el ADC1 del ESP32, específicamente los canales 6 y 5 respectivamente, evitando conflictos con operaciones WiFi. Para el control del motor de la bomba, se emplearon tres pines: PUMP_ENABLE_PIN 25 (control PWM de velocidad),

PUMP_IN1_PIN 26 y PUMP_IN2_PIN 27 (control de dirección), configurados para trabajar con el driver L298N.

La comunicación I2C se estableció mediante los pines I2C_SDA_PIN 21 y I2C_SCL_PIN 22, siguiendo el estándar de conexión I2C del ESP32. Se definieron las direcciones I2C de los sensores: 0x44 para el SHT30 (temperatura y humedad) y 0x62 para el SCD41 (CO2, temperatura y humedad), permitiendo la coexistencia de múltiples dispositivos en el mismo bus.

FIGURA 43

Asignación de pines en el sistema de monitoreo de variables.

```
// Pines
const int PH_PIN = 34;           // Sensor PH (ADC1_CH6)
const int BATTERY_PIN = 33;     // Medición de voltaje de batería (ADC1_CH5)
const int PUMP_ENABLE_PIN = 25; // L298N ENB
const int PUMP_IN1_PIN = 26;    // L298N IN3
const int PUMP_IN2_PIN = 27;    // L298N IN4
const int LED_PIN = 2;          // LED integrado

// I2C (SHT30 y SCD41)
const int I2C_SCL_PIN = 22;
const int I2C_SDA_PIN = 21;
const uint8_t I2C_ADDRESS_SHT = 0x44;
const uint8_t I2C_ADDRESS_SCD = 0x62;
```

Nota. Asignación de pines en la ESP-WROOM32 que controla el sistema de monitoreo de variables. Fuente: Elaboración propia.

Los sensores fueron programados para que realizaran una medición cada 15 minutos, el cual fue un balance óptimo entre resolución temporal y consumo para los sensores.

Los intervalos de tiempo se definen en milisegundos con valores estratégicos: MEASUREMENT_INTERVAL = 900000 (15 minutos) para mediciones completas, BATTERY_MEASUREMENT_INTERVAL = 300000 (5 minutos) para monitoreo de energía, PUMP_PRE_ACTIVATION = 20000 (20 segundos) para activación previa de bomba, PUMP_ACTIVATION_DURATION = 5000 (5 segundos) para tiempo de operación de bomba, y SENSOR_STABILIZATION_TIME = 60000 (1 minuto) para estabilización inicial de sensores.

FIGURA 44

Temporizador de mediciones de sensores.

```
// Intervalos de tiempo (en milisegundos)
const unsigned long MEASUREMENT_INTERVAL = 900000; // 15 minutos
const unsigned long BATTERY_MEASUREMENT_INTERVAL = 300000; // 5 minutos
(nuevo)
const unsigned long PUMP_PRE_ACTIVATION = 20000; // 20 segundos antes
const unsigned long PUMP_ACTIVATION_DURATION = 5000; // 5 segundos activa
const unsigned long SENSOR_STABILIZATION_TIME = 60000; // 1 minuto para
estabilización
```

Nota. Uso de temporizadores para las mediciones de los sensores durante el proceso de fermentación. Fuente: Elaboración Propia.

2.4 ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE FERMENTACIÓN

El sistema está diseñado para operar exclusivamente con fuentes DC, garantizando portabilidad y funcionamiento en zonas urbanas y rurales sin dependencia de la red eléctrica. La autonomía energética se asegura mediante paneles solares.

2.4.1 DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SOLARES

El sistema de volteo presenta un consumo máximo de corriente de 2.24 A bajo condiciones de carga activa, pero considerando que el driver VNH2SP30 posee una capacidad nominal de hasta 13 A, se adoptó como límite operativo el 80 % de dicha capacidad, equivalente a 10.4 A. A diario este valor lo consume únicamente durante un minuto, el resto del día podemos asumir que se consume la corriente máxima por pin de la ESP WROOM 32 de acuerdo a su *Datasheet*, el cual corresponde a 40 mA y la que demanda el modem con un valor típico de 1.20A, permitiendo una operación sostenida durante el prolongado proceso de fermentación.

Por su parte, el sistema de sensores registra un consumo de 0.2 A alimentado a 6 V, para el caso de la bomba de succión, además el sistema de sensores, se asume que el consumo máximo por pin de 40 mA de acuerdo a la *Datasheet* de la ESP WROOM 32. Ambos sistemas poseen una operación mínima de cinco días y una máxima de siete días, donde la demanda energética es la siguiente:

$$E = V * I * t \quad [5]$$

Energía consumida por el sistema de volteo a diario:

$$E_{volteo} = (12.00 V * 10.40 A * 0.0167 h) + (3.30 V * 0.16 A * 24 h) + (4.20 V * 1.20 A * 24 h)$$

$$E_{volteo} = 0.135 kWh$$

Energía consumida por el sistema de sensores a diario:

$$E_{sensores} = (3.30 V * 0.32 A * 24 h) + (6.00 V * 0.20 A * 0.6667 h)$$

$$E_{sensores} = 0.026 kWh$$

La determinación del panel, se realizó mediante la aplicación de la fórmula:

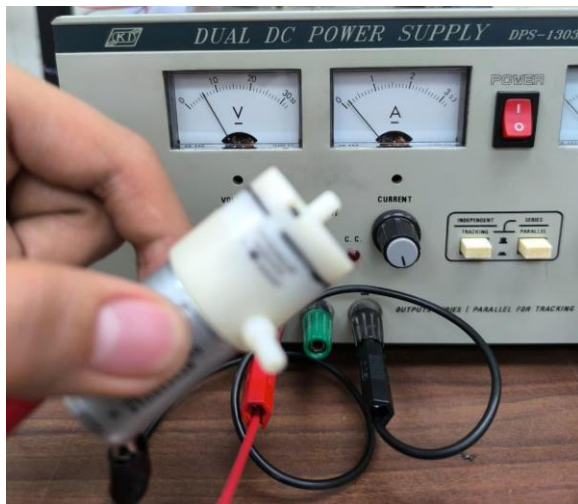
$$P_{FV} = \frac{E}{HPS * PR} \quad [6]$$

Donde:

- P_{FV} es la potencia del panel solar.
- E es el consumo energético del sistema conectado.
- HPS son las horas solar pico.
- PR es el factor global de funcionamiento igual a 0.9

FIGURA 45

Consumo de corriente de la bomba de succión.



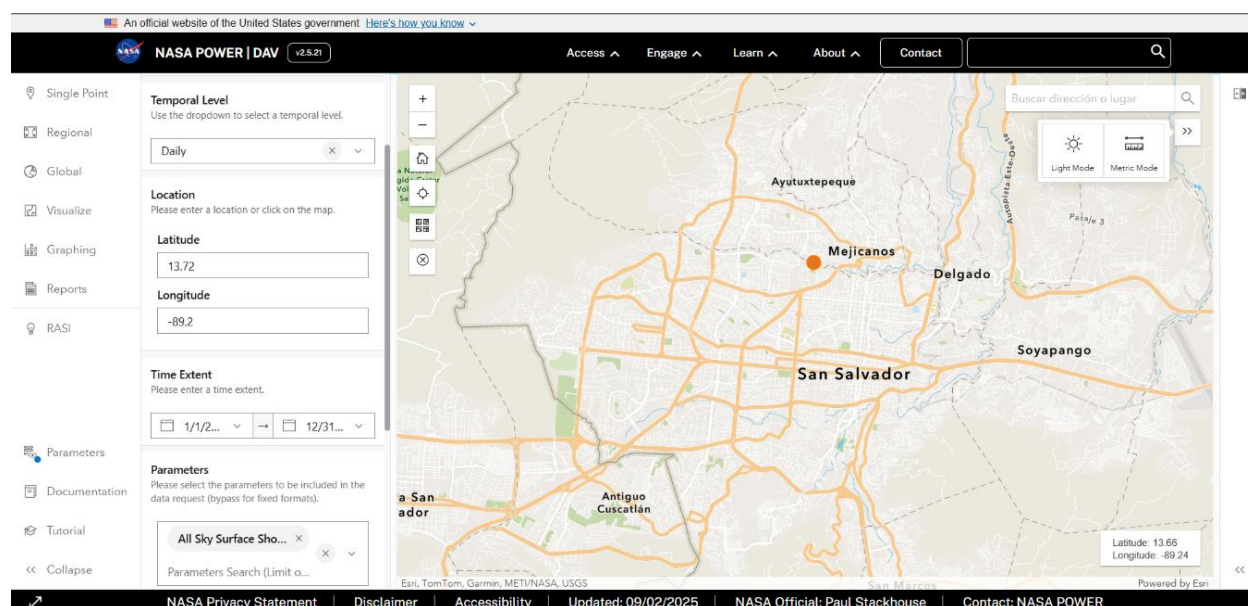
Nota. Medición de corriente de la bomba de succión de forma experimental. Fuente: Elaboración propia.

Las horas solar pico, se determinaron mediante la obtención del valor de irradiación del sitio web de *Nasa Power*, obteniendo estos valores para las coordenadas de un punto de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador. Seleccionando como periodo todo el año 2024 para utilizar el valor promedio de un año completo.

Además, entre los parámetros se seleccionó la opción "All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance", que es la energía solar total (conocida como GHI) que realmente llega a una superficie horizontal. Este valor mide la energía del sol teniendo en cuenta las condiciones reales del cielo, especialmente el bloqueo y la dispersión causados por las nubes.

FIGURA 46

Selección de parámetros para la obtención de valores de irradiación en Nasa Power



Nota: Interfaz del sitio web Nasa Power, para la selección de los parámetros necesarios de acuerdo a la zona de interés. Fuente: (*NASA POWER | Data Access Viewer (DAV)*, n.d.)

De acuerdo con la información obtenida del portal NASA POWER, y considerando los filtros aplicados, se identificó que el valor promedio del 2024 es igual a 5.6981 kWh/m²/día. Así del HSP es el siguiente:

$$HSP = \frac{\text{Irradiación}}{1000 \frac{W}{m^2}} \quad [7]$$

Por lo que, la potencia fotovoltaica mínima requerida en el sistema de volteo es:

$$P_{FV} = \frac{0.135 \text{ kWh}}{5.6981 \text{ h} * 0.9} = 26.00 \text{ Wp}$$

Mientras, la potencia fotovoltaica mínima requerida en el sistema de sensores es:

$$P_{FV} = \frac{0.026 \text{ kWh}}{5.6981 \text{ h} * 0.9} = 5.00 \text{ Wp}$$

Por lo que, en el sistema de sensores se instaló un panel de 5.00 W, mientras que el sistema de volteo posee un panel de 25.00 W.

2.4.2 DIMENSIONAMIENTO DE BATERIAS

De acuerdo a los datos calculados para el dimensionamiento de los paneles solares, el consumo diario de cada uno de los sistemas es el siguiente:

- $E_{volteo} = 0.135 \text{ kWh}$
- $E_{sensores} = 0.026 \text{ kWh}$

Por las especificaciones del motor, el sistema de volteo opera a un voltaje nominal de 12 V, mientras que el sistema de sensores al estar en rotación en conjunto con la tómbola, requiere una alimentación de baterías más compacta, por lo que es alimentado a un voltaje nominal de 3.7 V. Para el sistema de sensores se optó por el uso de baterías de UPS, en este caso una de Plomo-Ácido por lo que su DoD es igual a 0.5, por el otro lado para el sistema de sensores se optó por baterías de litio las cuales poseen un DoD de 0.9.

Donde la capacidad de las baterías se determina de la siguiente forma:

$$\text{Capacidad (Ah)} = \frac{\text{Consumo energetico diario (Wh)} * \text{días de autonomia}}{\text{Voltaje nominal (V)} * \text{DoD} * \eta} \quad [8]$$

Debido a que se incorporan paneles solares, se asume un solo día de autonomía y una eficiencia del 95%. Por lo tanto, la capacidad mínima para cada uno de los sistemas es:

- Capacidad (Ah)_{volteo} = 25.00 Ah
- Capacidad (Ah)_{sensores} = 8.67 Ah

Con base a los resultados, el sistema de sensores es diseñado con un arreglo paralelo de tres baterías de 8800 mAh a 3.7 V, esto con el fin de cubrir la capacidad mínima más un valor adicional, ya que la capacidad en mAh que figura en la etiqueta de una batería es su valor nominal, medido bajo condiciones de laboratorio, pero en la vida real, la capacidad efectiva de la batería es casi siempre inferior a este valor teórico.

Por otro lado, la batería del sistema de volteo necesita como mínimo 25.00 Ah en condiciones donde el sistema sea adaptado a cargas que demanden 10.4 A, en el prototipo planteado la máxima demanda ronda los 2.2 A, razón por la cual se implementa al sistema de volteo una batería de 9.0 Ah a 12 V.

2.5 PROTOTIPO DE FERMENTADOR AUTOMATIZADO

Como se describió en las secciones anteriores el prototipo se compone de dos partes, una se encargada del volteo del cacao al interior de una tómbola y otra monitorea las variables de interés.

Su funcionamiento se basa en el encendido de un switch incorporado en una caja de registro de la tómbola, el encendido de otro switch en el sistema mecánico del motor y la activación del modem para la conectividad Wi-Fi.

FIGURA 47

Fermentador de cacao con tecnologías IoT.



Nota: Prototipo de fermentación de cacao con sistema de volteo automático y monitoreo de variables con tecnología IoT. Fuente: Elaboración propia.

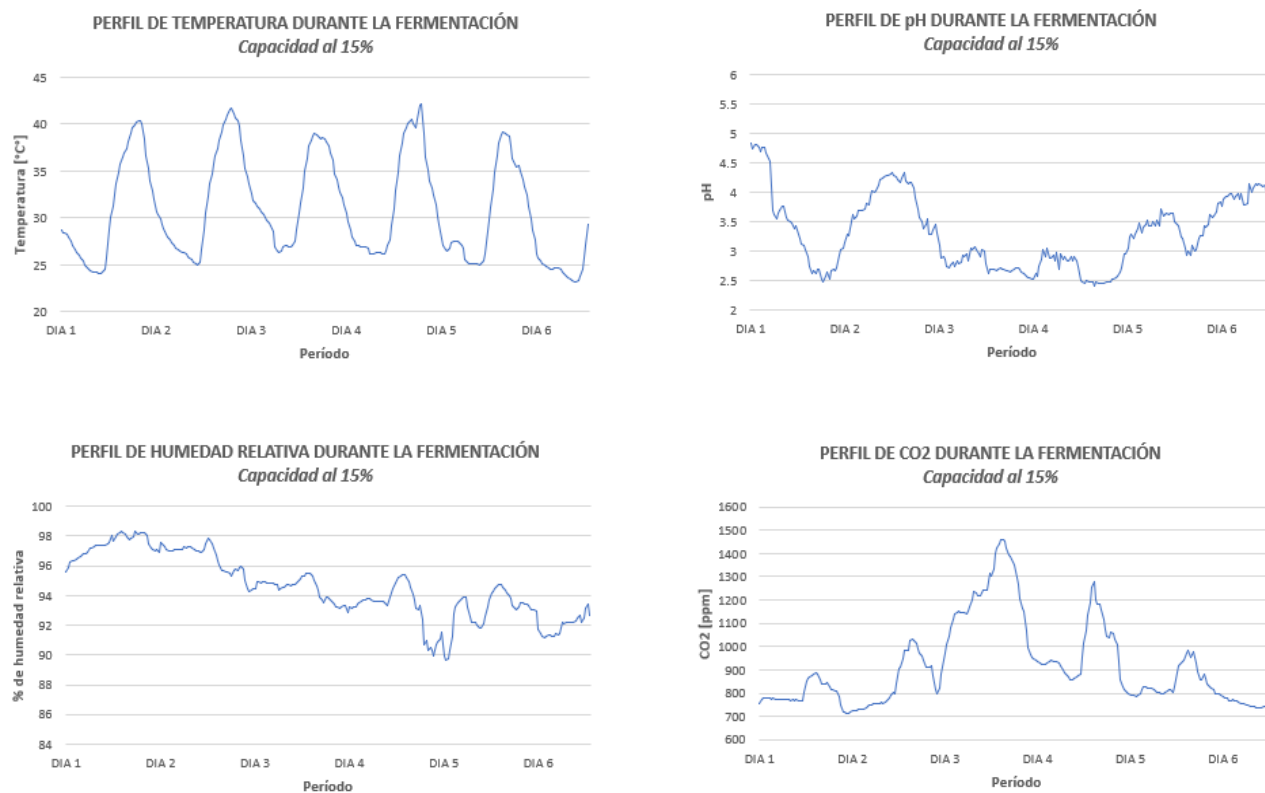
CAPITULO 3: RESULTADOS

3.1 FERMENTACIÓN A DISTINTAS CANTIDADES DE CACAO

Las pruebas de fermentación, fueron ejecutadas para tres distintas cantidades de cacao, para analizar la incidencia de la capacidad de la tómbola y la relación con el resto de parámetros.

FIGURA 48

Datos registrados con la tómbola al 15% de su capacidad.



Nota. Datos registrados por los sensores durante la primera prueba de fermentación, con la tómbola a un 15% de su capacidad total. Fuente: Elaboración propia.

Para una primera prueba de fermentación, se ejecutó con una capacidad del 15% de su total, donde de todas las variables monitoreadas, fue la temperatura la que presento una mayor variabilidad, con un coeficiente de variación del 17.67%. Registrando un valor mínimo de 23.16 °C y un máximo de 42.13 °C. La alta desviación estándar, 5.45, indican las grandes fluctuaciones, lo que

sugiere que el interior de la tómbola se ve afectado considerablemente por los ciclos día/noche y por factores ambientales al momento de la prueba, a pesar de conseguir un valor de 42.13° C ideal para la fase termofílica, las variaciones interrumpen la actividad.

En cuanto a la humedad relativa, presenta un coeficiente de variación de 2.26%, indicando estabilidad en su comportamiento, manteniendo humedad disponible para los microorganismos. Es decir, el proceso está aislado y la evaporación de los picos de temperatura se compensa rápido. Sin embargo, mantiene valores altos, respecto a las curvas típicas.

Por su parte el pH, presenta un coeficiente de variación de 18.68%, lo que indica variaciones significativas entre su mínimo de 2.40 y el máximo de 4.83, a pesar de contar con una desviación estándar de 0.62. Comparado con los valores típicos, mantiene una tendencia decreciente, sin embargo, el rango registrado es más bajo de lo esperado, lo que sugiere que el proceso se mantiene en la fase de descomposición activa/acidificación sin alcanzar una fase de maduración o estabilización constante.

Por último, el comportamiento del CO₂ posee un coeficiente de variación de 19.80%, presentando el primer ascenso en el día 2-3, el cual coincide con la etapa de máxima actividad fermentativa, donde las levaduras transforman azúcares en etanol y CO₂, donde el volteo provoca una libración de CO₂ tal como lo sugiere. Además, se observa, un pico en el día 4-5 que probablemente este asociado por una reactivación de bacterias acéticas oxidando etanol residual. Y el día 6 desciende a los valores iniciales, debido a que la masa entra en fase de reposo y la producción de gases disminuye casi a los niveles iniciales.

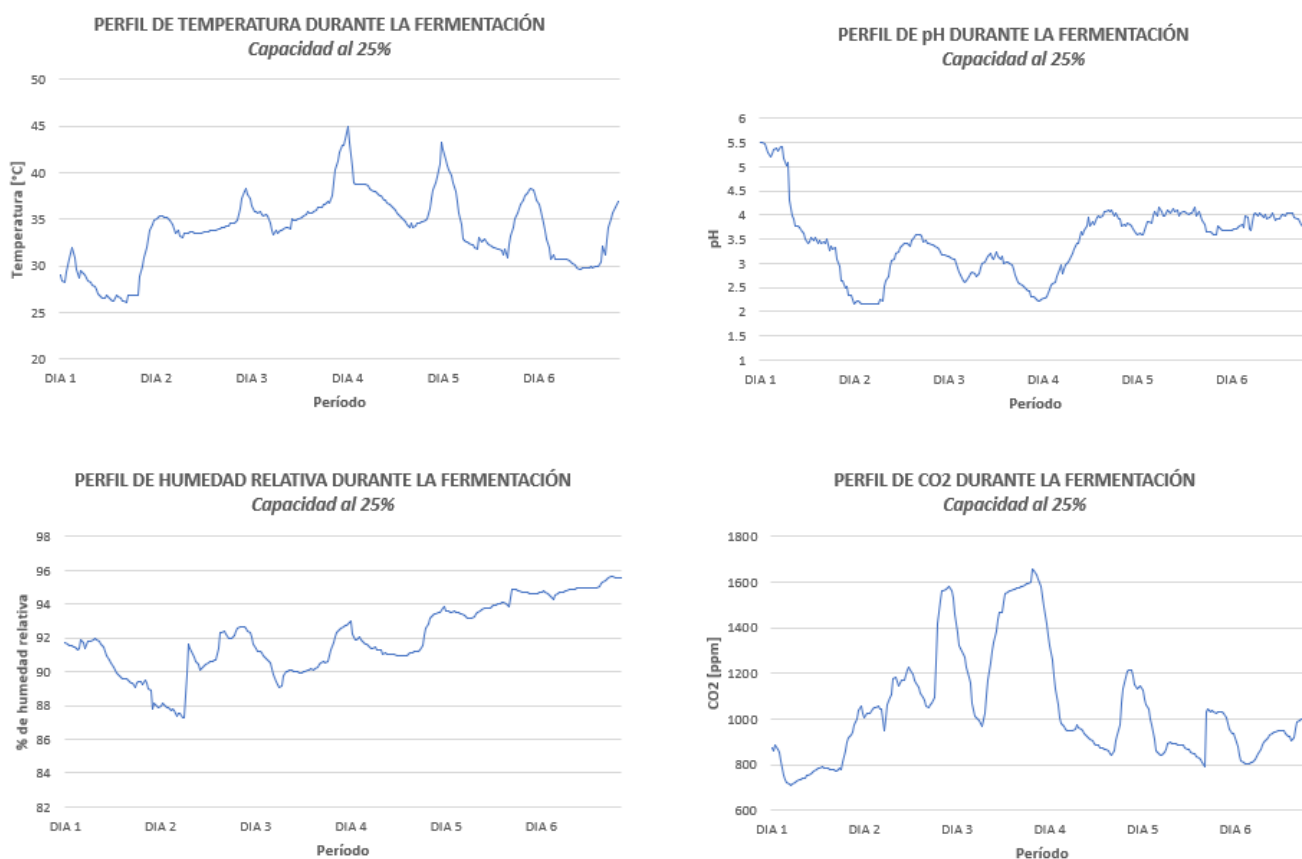
Para la segunda prueba con la tómbola al 25% de su capacidad, el pH presentó un coeficiente de variación de 20.91%. Iniciando con 5.51 es típico de la pulpa fresca, aunque presentó una disminución debido a la fermentación alcohólica, seguida por la fermentación láctica y acética por bacterias, que producen ácidos y bajan el pH, esta disminución fue drástica, cayendo por debajo de los valores esperados. El promedio del pH fue de 3.47, lo que indica que el proceso pasó la mayor parte del tiempo en la fase ácida.

La temperatura presentó un coeficiente de variación de 11.23%, aunque su variabilidad sigue manteniendo un valor alto, esta fue mucho menor que la prueba al 15% de capacidad. Presentó

una tendencia más estable del día 1 al día 4, a partir del día 5 perdió estabilidad, con una tendencia decreciente.

FIGURA 49

Datos registrados con la tómbola al 25% de su capacidad.



Nota. Datos registrados por los sensores durante la primera prueba de fermentación, con la tómbola a un 25% de su capacidad total. Fuente: Elaboración propia.

El pico máximo de 44.93 °C, superando los 40 °C en dos momentos, aunque lo hizo de forma momentánea. Destacando, la segunda prueba que no regresó a los valores iniciales.

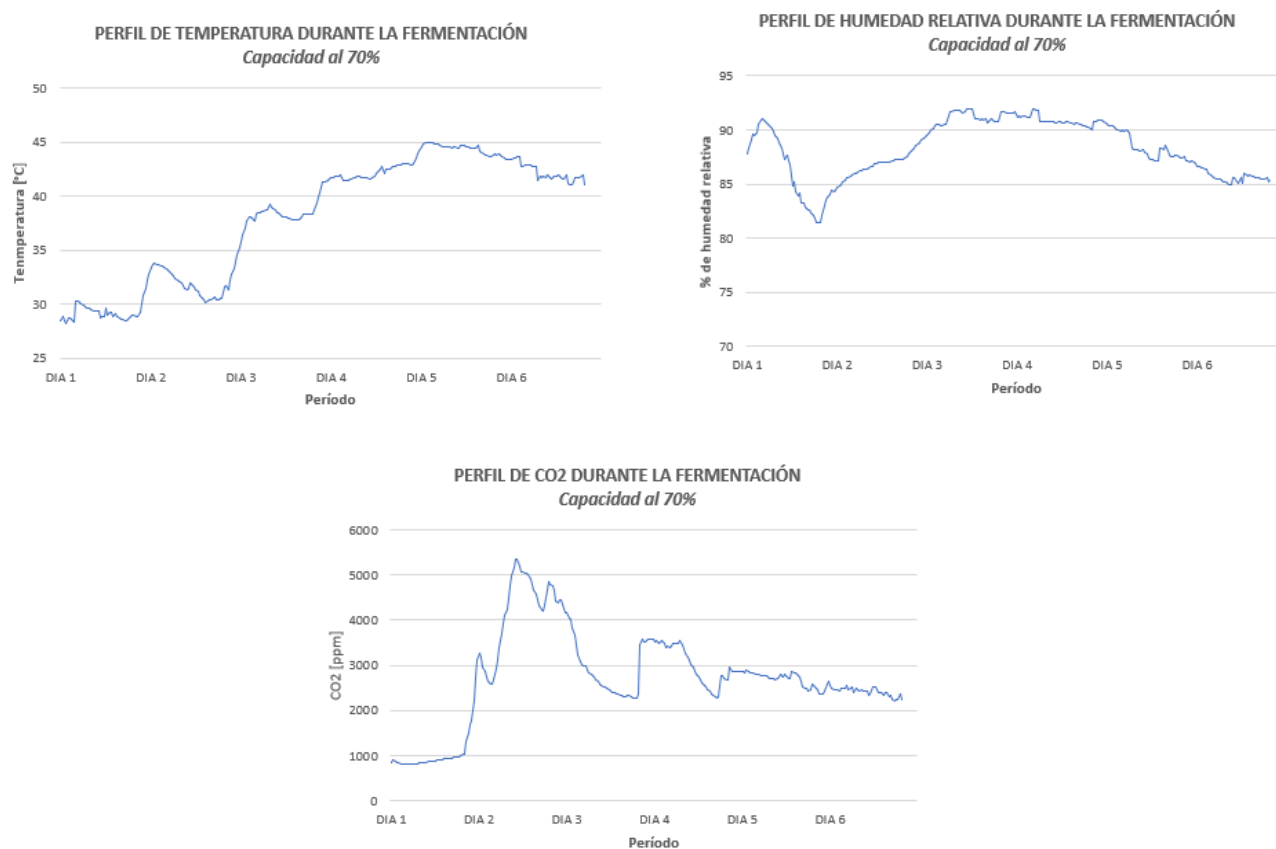
En el caso de la humedad relativa, presentó una tendencia más estable, con un coeficiente de variación de 2.27%, nuevamente el más bajo. La ligera disminución a lo largo del proceso puede atribuirse a una pérdida de agua por evaporación, que es un efecto deseado de la actividad térmica.

Y como ultima variable, el CO₂, presentó una tendencia similar al caso anterior, solo que esta vez alcanzó picos más elevados, con un pico en la de 1658.50 ppm, en el proceso que corresponde a la transformación de azucares en CO₂. Este punto máximo fue alcanzado en el momento donde se registró la máxima temperatura.

De acuerdo a la tendencia presentada en las pruebas al 10% y 25%, empiezan a indicar que a mayor cantidad de cacao en la tómbola se consiguen valores más estables y cercanos al rango optimo, por lo que la tercera prueba se ejecutó al 70% de la capacidad de la tómbola.

FIGURA 50

Datos registrados con la tómbola al 70% de su capacidad.



Nota. Datos registrados por los sensores durante la primera prueba de fermentación, con la tómbola a un 70% de su capacidad total. Fuente: Elaboración propia.

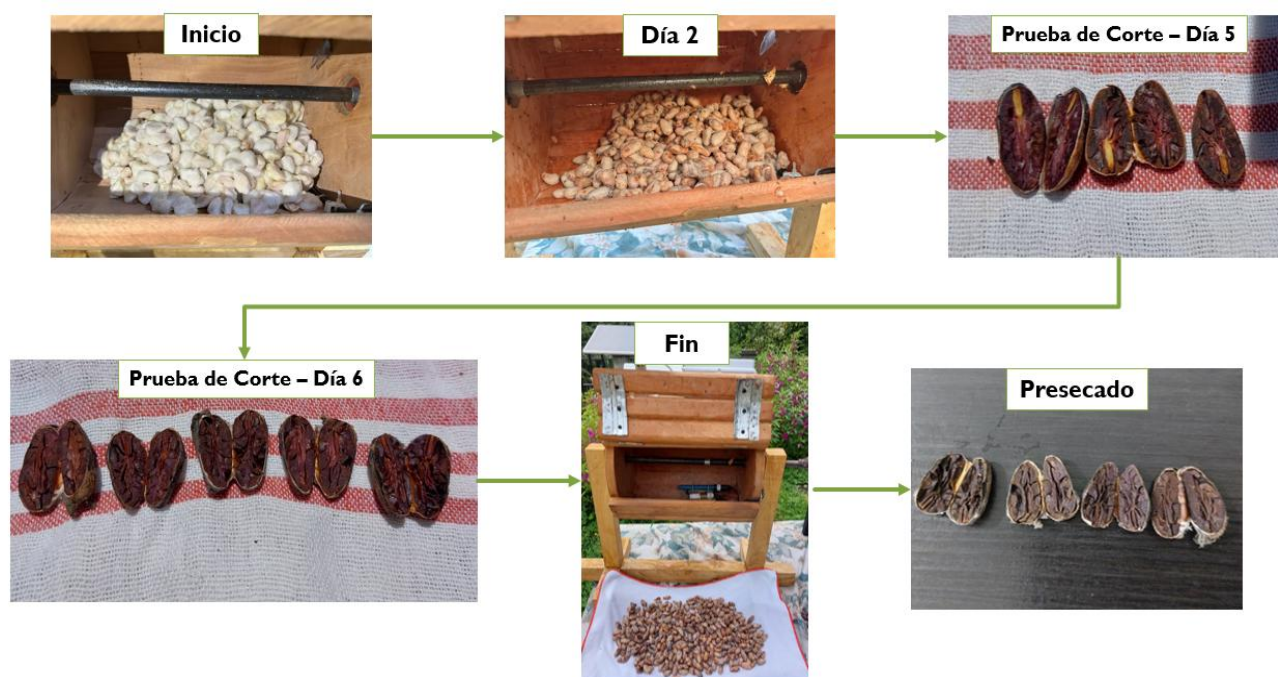
Para los resultados de la prueba al 70%, la gráfica muestra un ascenso constante de la temperatura, comenzando por debajo de los 30 °C y superando los 40 °C a partir del cuarto, registrando un valor promedio de 38.20 °C, alcanzando una mayor temperatura que las pruebas anteriores. Este aumento es característico de la fermentación del cacao, donde la actividad de las levaduras y bacterias genera calor.

Los niveles de CO₂ mantienen una tendencia similar que los casos anteriores, comienza en sus puntos más altos y disminuyen a medida que la temperatura aumenta, aunque en este caso, el valor pico fue más marcado sin registrar ningún otro similar en el proceso. Debido a la fase anaeróbica, donde las levaduras consumen los azúcares de la pulpa y producen etanol y grandes cantidades de CO₂. A medida que esta fase cede paso a la fase aeróbica la producción de CO₂ disminuye. Con un máximo de 1065.23 ppm y un mínimo de 798.50, con un valor promedio de 2713.18 ppm.

Además del monitoreo de cada una de las variables, se registró los cambios físicos, los cuales sirven como un complemento al análisis.

FIGURA 51

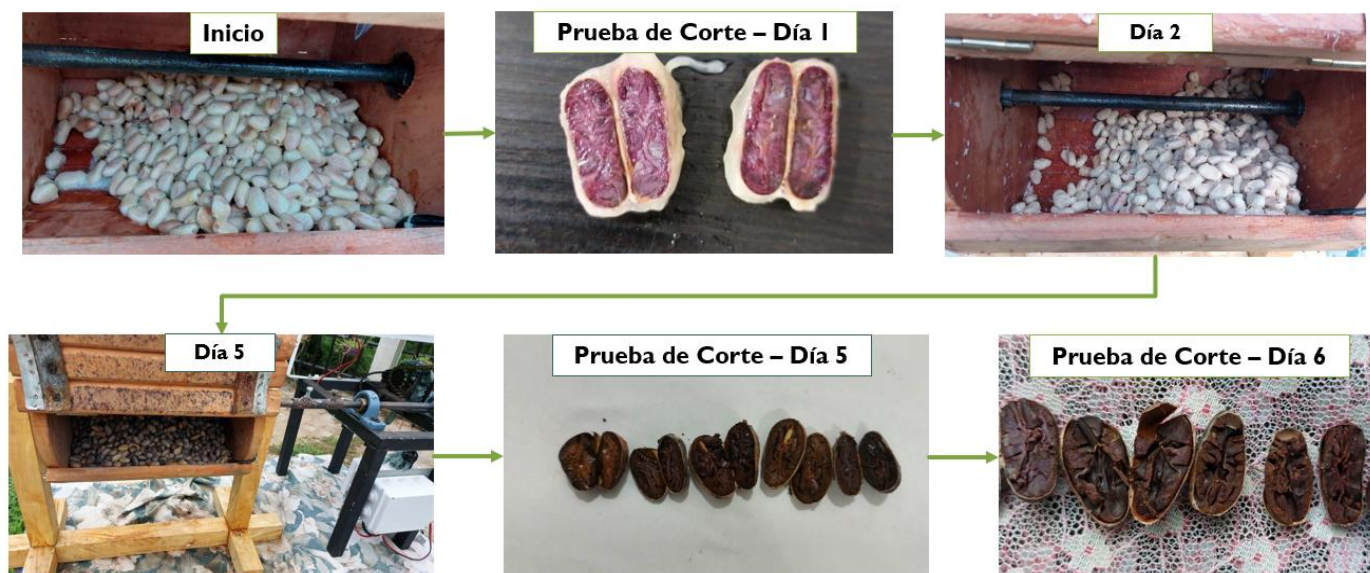
Cambios físicos durante la fermentación al 15% de capacidad de la tómbola.



Nota. Cambios físicos en los granos de cacao a lo largo del proceso de fermentación con la tómbola al 15% de capacidad. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 53

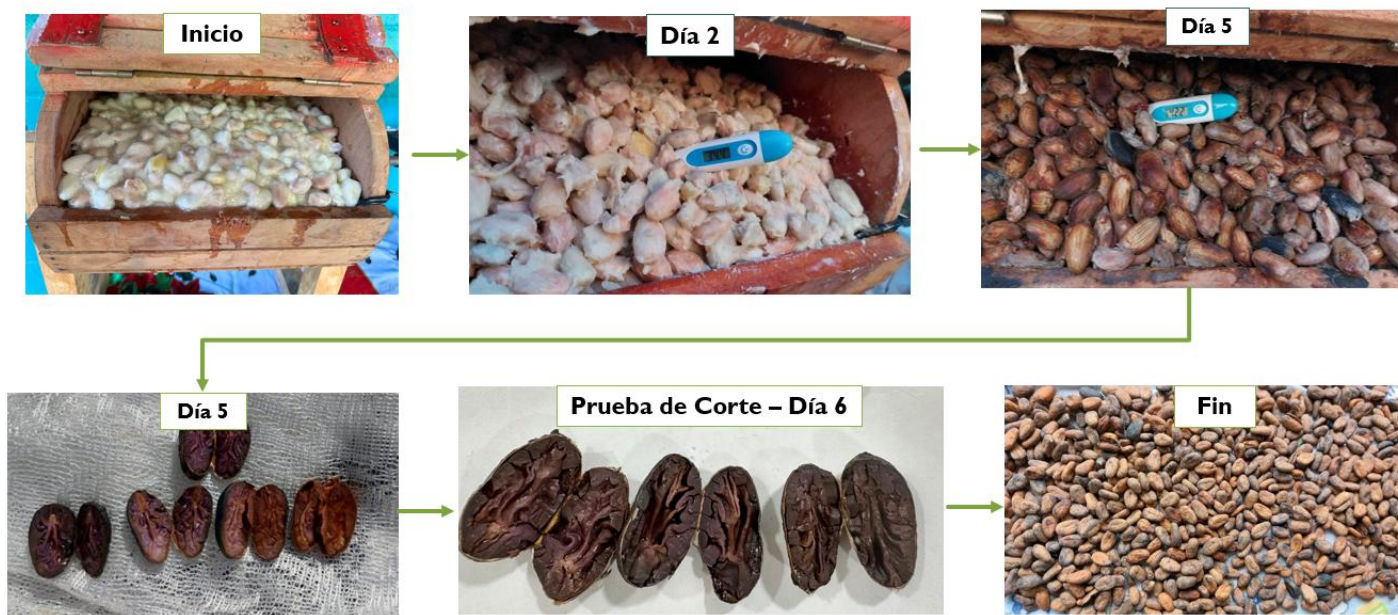
Cambios físicos durante la fermentación al 25% de capacidad de la tómbola.



Nota. Cambios físicos en los granos de cacao a lo largo del proceso de fermentación con la tómbola al 25% de capacidad. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 52

Cambios físicos durante la fermentación al 70% de capacidad de la tómbola.



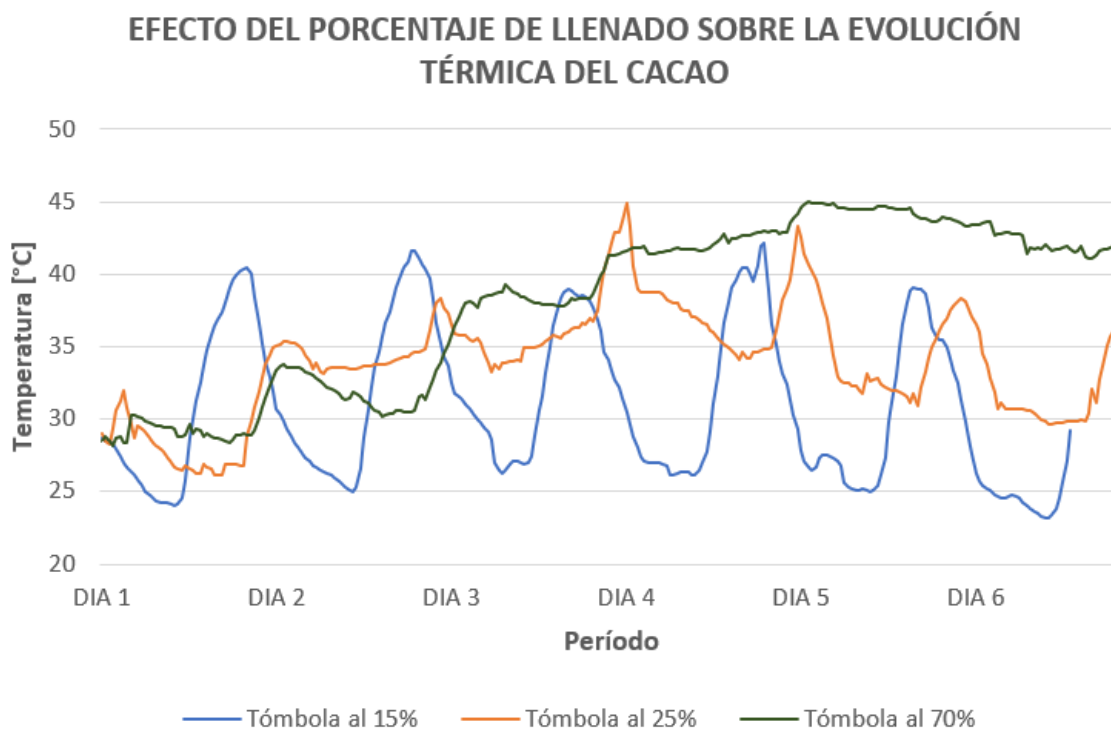
Nota. Cambios físicos en los granos de cacao a lo largo del proceso de fermentación con la tómbola al 70% de capacidad. Fuente: Elaboración propia.

3.2 ANALITICA CORRELACIONAL DE VARIABLES

3.2.1 PORCENTAJE DE LLENADO DE LA TOMBOLA

FIGURA 54

Comportamiento de la temperatura a diferente porcentaje de llenado de la tómbola.



Nota. Perfil de temperatura durante la fermentación del cacao, según el nivel de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

Los datos sugieren una relación directa entre el porcentaje de llenado de la tómbola y la intensidad de la fermentación. A mayor masa de cacao (mayor llenado), mayor es la temperatura alcanzada. Una fermentación con 70% de llenado muestra un perfil de temperatura mucho más robusto y característico de una fermentación de cacao exitosa.

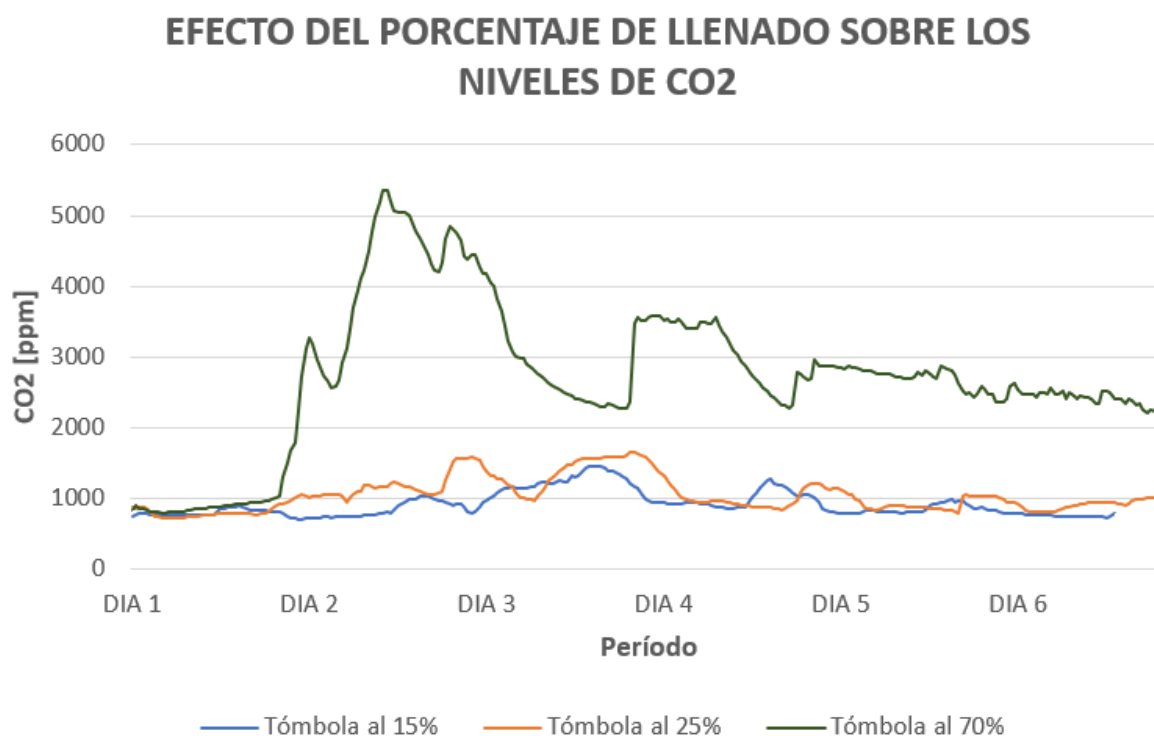
Al determinar los valores promedio de temperatura para cada una de las pruebas se obtiene un coeficiente de Pearson de 0.9634, esto indica que existe una relación correlacional positiva y fuerte, entre el porcentaje de llenado de la tómbola y la temperatura promedio de fermentación.

Por otro lado, al observar la comparativa de los niveles de CO₂, muestra valores que inician y terminan en el mismo valor, con picos entre el día 1 y día 3, como resultado de la fermentación alcohólica, con una muy notable diferencia en cuando se fermenta con una capacidad del 70%.

Al calcular los valores promedios de las tres pruebas registradas se obtiene un coeficiente de Pearson de 0.9941, este valor indica una relación lineal positiva y casi perfecta entre las dos variables, donde a mayor cacao ocurre una mayor liberación de CO₂ durante la fermentación alcohólica. La prueba del 70% generó casi tres veces más CO₂ promedio que la del 15%.

FIGURA 55

Comportamiento del CO₂ a diferente porcentaje de llenado de la tómbola



Nota. Comportamiento del CO₂, según el nivel de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

Si limitamos el análisis el CO₂ al promedio de los tres primeros días, correspondientes a la fermentación alcohólica, el nivel del CO₂ al 70% de la tómbola supera los otros niveles por diferencias encima del 50%.

Con base a los resultados anteriores el 70% presenta niveles más óptimos, al comparar los datos de temperatura y CO₂, para esta cantidad de cacao, los primeros tres días muestran una relación directamente proporcional, mientras que, del tercer día en adelante la relación es inversamente proporcional. Para ambas variables (CO₂ y temperatura) en su periodo completo se obtiene un número de Pearson de 0.1505, lo que sugiere una relación débil, donde el incremento de la temperatura no se asocia de manera significativa con el aumento y/o disminución de la concentración de CO₂

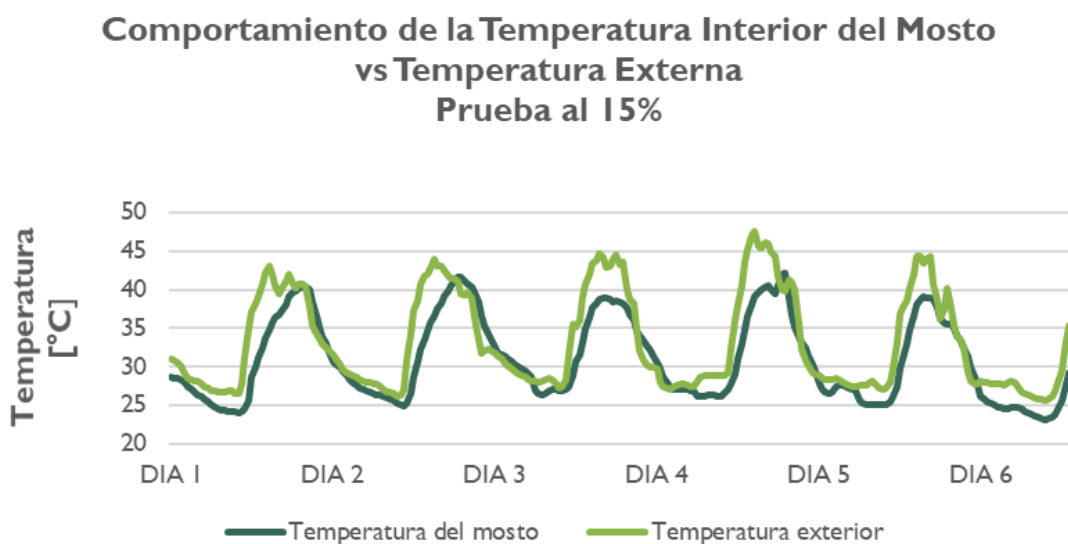
3.2.2 TEMPERATURA INTERNA DE LA MASA DE CACAO Y TEMPERATURA AMBIENTE

El análisis de correlación entre la temperatura interna de la masa de cacao (sensor FS400-SHT30) y la temperatura ambiente externa demostró cómo la fermentación se vuelve térmicamente autónoma a mayor volumen.

Con 15% de llenado, la correlación fue muy fuerte (0.891), ya que la poca masa no generaba calor significativo y la temperatura interna simplemente seguía a la ambiental.

FIGURA 56

Temperatura de la masa de cacao y la temperatura ambiente al 15% de capacidad de la tómbola.

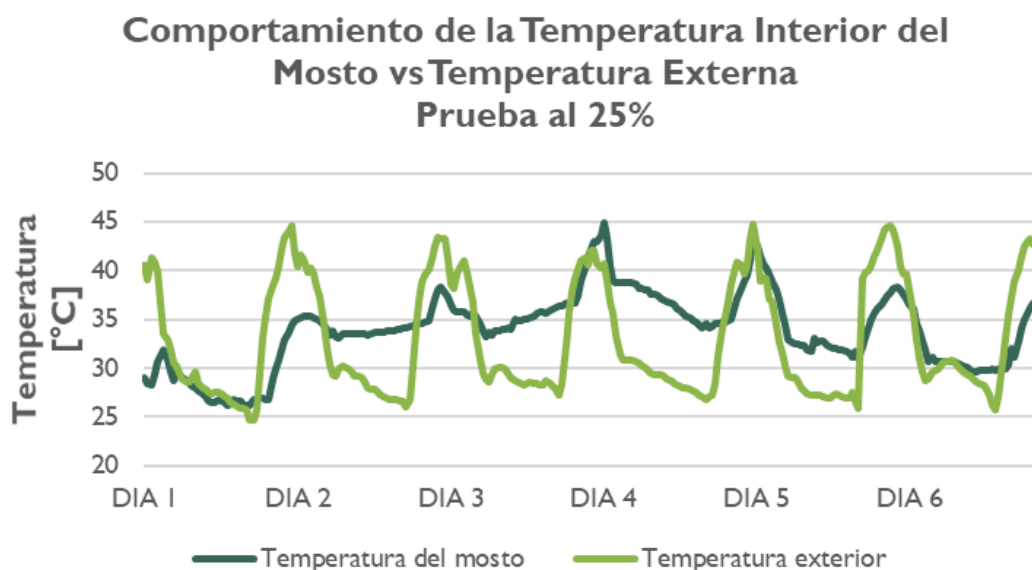


Nota. Comportamiento de la temperatura de la masa de cacao y temperatura ambiente, al 15% de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

Con **25% de llenado**, la correlación fue moderada (0.489), porque el mayor volumen inició una actividad metabólica sustancial, compitiendo con la influencia externa.

FIGURA 57

Temperatura de la masa de cacao y la temperatura ambiente al 25% de capacidad de la tómbola



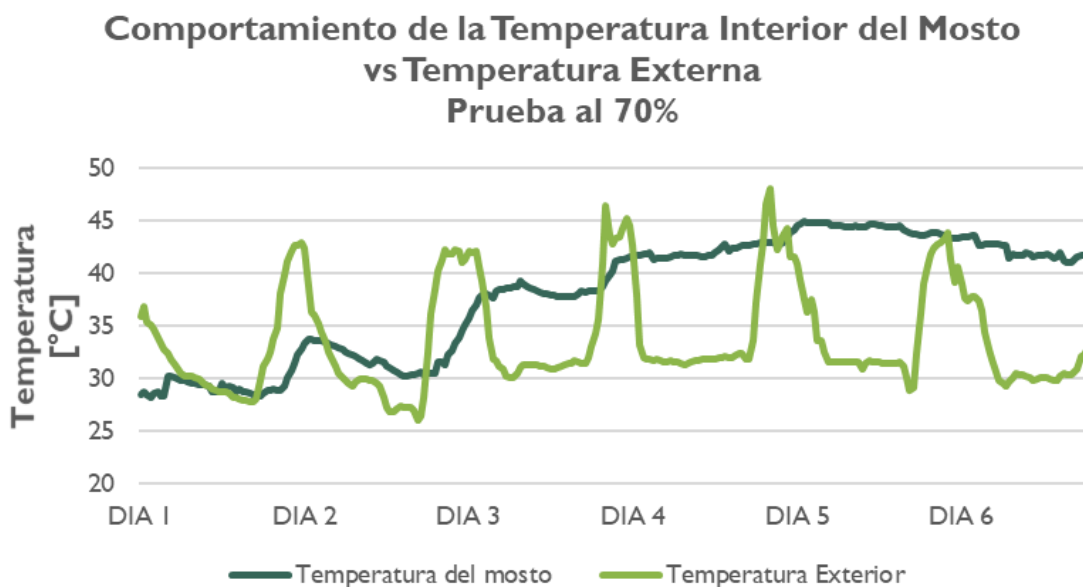
Nota. Comportamiento de la temperatura de la masa de cacao y temperatura ambiente, al 25% de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

Con **70% de llenado**, la correlación fue débil (0.221), ya que el intenso calor metabólico generado dominó por completo el proceso, haciendo irrelevante la temperatura ambiente.

Esta tendencia decreciente en la correlación (0.891 → 0.489 → 0.221) prueba que, a mayor volumen de cacao, la fermentación deja de estar dictada por el ambiente y se convierte en un sistema dominado por su propio calor interno.

FIGURA 58

Temperatura de la masa de cacao y la temperatura ambiente al 70% de capacidad de la tómbola



Nota. Comportamiento de la temperatura de la masa de cacao y temperatura ambiente, al 70% de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 TEMPERATURA Y TIEMPO

El comportamiento de la temperatura, indica que esta aumenta conforme los días vayan avanzando. Al comparar esta variable contra el tiempo, la prueba al 15% presenta variaciones a lo largo del período, lo que resulta en un coeficiente de Pearson de -0.1143 con una muy baja correlación, también, aunque al 25% su coeficiente aumenta a un 0.2736 este sigue presentando una correlación baja. Mientras que, la prueba realizada al 70% presenta un coeficiente de Pearson igual a 0.9023, indicando una correlación alta, es decir, un porcentaje alto de llenado no solo permite lograr valores altos de temperatura, sino que además permite que estos se consigan de una forma progresiva conforme el proceso de fermentación avanza en sus distintas etapas.

3.3 ANALISIS COMPARATIVO DE CORRELACIONES ENTRE DIFERENTES MÉTODOS

3.3.1 ANALISIS DE DATOS A UN LLENADO DE LA TÓMBOLA DEL 15%

FIGURA 59

Matriz de correlación por el método de Pearson para datos al 15% de llenado.

```

Variables seleccionadas para análisis (6):
 1. Temperatura interna
 2. Humedad
 3. pH
 4. CO2
 5. Humedad relativa
 6. Temperatura ambiental

=====
ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - CORRELACIÓN LINEAL (PEARSON)
=====

Matriz de Correlación (Pearson):

```

	Temperatura interna	Humedad	pH	CO2	Humedad relativa	Temperatura ambiental
Temperatura interna	1.000	0.158	-0.482	0.463	-0.372	0.891
Humedad	0.158	1.000	0.125	-0.052	0.607	0.211
pH	-0.482	0.125	1.000	-0.551	0.409	-0.396
CO2	0.463	-0.052	-0.551	1.000	-0.382	0.531
Humedad relativa	-0.372	0.607	0.409	-0.382	1.000	-0.287
Temperatura ambiental	0.891	0.211	-0.396	0.531	-0.287	1.000

Nota. Análisis de correlación de Pearson para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 15% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis confirma un comportamiento fermentativo saludable y típico, evidenciado por las fuertes relaciones entre las variables clave. La temperatura ambiente mostró una influencia determinante en la temperatura dentro de la tómbola, lo que explica la sincronización muy fuerte con la variable de Temperatura ambiental ($r = 0.891$), reflejando una dependencia térmica significativa del entorno. Las correlaciones positivas entre temperatura y CO_2 ($r = 0.463$) y entre Temperatura ambiental y CO_2 ($r = 0.531$) confirman que el aumento de temperatura, influido por las condiciones externas, activa la producción de CO_2 , indicando una intensa actividad microbiana. Simultáneamente, las relaciones negativas entre CO_2 - pH ($r = -0.551$) y entre temperatura interna - pH ($r = -0.482$) demuestran la acidificación característica del medio como resultado del metabolismo microbiano. Este patrón correlacional confirma que el sistema fermentativo opera de manera esperada, donde la actividad metabólica, modulada por la temperatura ambiental, genera CO_2 y reduce el pH de forma coordinada.

FIGURA 60

Matriz de correlación por el método de Spearman para datos al 15% de llenado.

```

=====
Matriz de Correlación (Spearman):
  Temperatura interna  Humedad    pH    CO2  Humedad relativa  Temperatura ambiental
Temperatura interna    1.000    0.203 -0.547  0.570             -0.483             0.892
Humedad                0.203    1.000  0.076 -0.045             0.547             0.230
pH                    -0.547    0.076  1.000 -0.609             0.319            -0.476
CO2                   0.570   -0.045 -0.609  1.000            -0.494             0.571
Humedad relativa      -0.483    0.547  0.319 -0.494             1.000            -0.415
Temperatura ambiental  0.892    0.230 -0.476  0.571             -0.415             1.000

```

Nota. Análisis de correlación de Spearman para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 15% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis Spearman revela relaciones más fuertes y definidas que el método Pearson, confirmando que los patrones en la fermentación siguen tendencias monótonas consistentes, no necesariamente lineales.

Correlaciones Muy Fuertes ($|\rho| > 0.8$)

Temperatura interna vs Temperatura ambiental ($\rho = 0.892$)

Mismo patrón que Pearson: La sincronización térmica se mantiene muy fuerte, las temperaturas evolucionan de manera coordinada durante todo el proceso.

FIGURA 61

Matriz de correlación por el método de Tau de Kendall para datos al 15% de llenado.

```

=====
ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - CORRELACIÓN TAU DE KENDALL
=====
Matriz de Correlación (Kendall):
  Temperatura interna  Humedad    pH    CO2  Humedad relativa  Temperatura ambiental
Temperatura interna    1.000    0.139 -0.393  0.398             -0.345             0.707
Humedad                0.139    1.000  0.033  0.001             0.340             0.153
pH                    -0.393    0.033  1.000 -0.435             0.222            -0.346
CO2                   0.398    0.001 -0.435  1.000            -0.317             0.409
Humedad relativa      -0.345    0.340  0.222 -0.317             1.000            -0.292
Temperatura ambiental  0.707    0.153 -0.346  0.409             -0.292             1.000

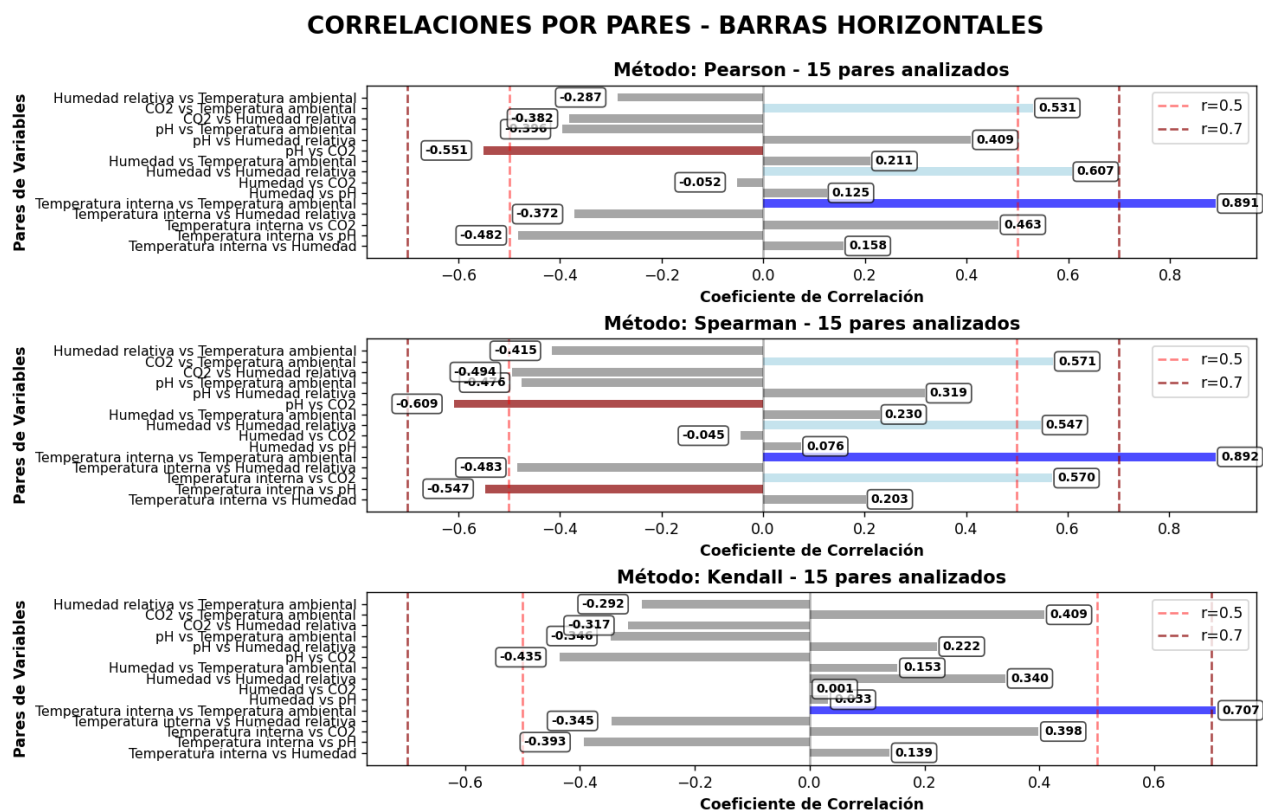
```

Nota. Análisis de correlación de Tau de Kendall para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 15% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis Kendall confirma la fuerte influencia de la temperatura ambiente en el sistema fermentativo, mostrando una correlación muy alta (0.707) entre temperatura interna y Temperatura ambiente. Se mantienen las relaciones bioquímicas clave: temperatura interna con CO₂ (0.398) y la acidificación característica entre CO₂ y pH (-0.435). El patrón general confirma un proceso fermentativo activo y coherente, donde la temperatura ambiente modula la actividad metabólica interna.

FIGURA 62

Correlación por Pares – Barras Horizontales para datos al 15% de llenado.

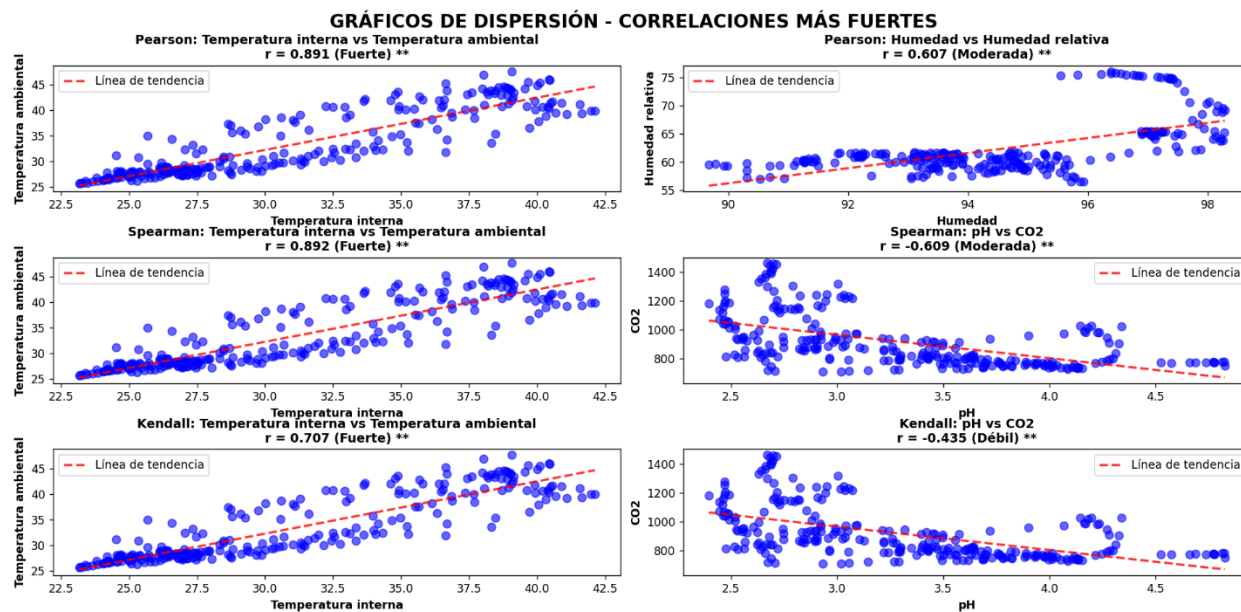


Nota. Correlación por pares de variables de los 3 métodos estadísticos. Fuente: Elaboración propia.

Este análisis comparativo muestra las 15 relaciones más importantes entre variables de fermentación, permitiendo visualizar patrones consistentes a través de los tres métodos estadísticos.

FIGURA 63

Gráficos de dispersión para datos al 15% de llenado.

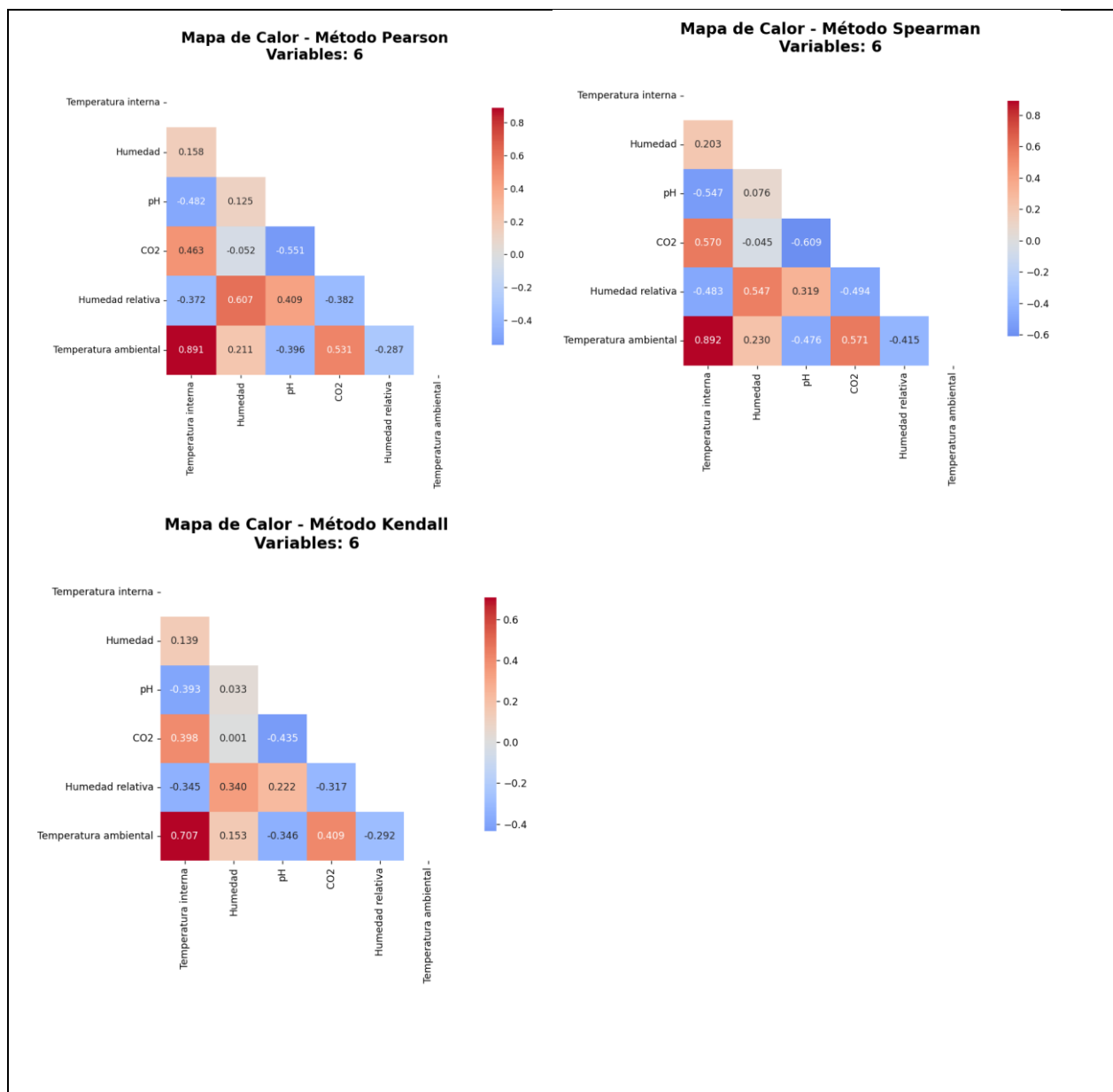


Notas. Gráficos de dispersión de las correlaciones más fuertes obtenidas por cada método. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de correlación confirma que la temperatura ambiente ejerció una influencia significativa en la temperatura dentro de la tómbola, lo cual explica la correlación extremadamente fuerte ($r > 0.89$) observada entre la temperatura exterior (ambiente) y la temperatura interior del sistema de fermentación. Esta fuerte dependencia térmica indica que las condiciones ambientales externas tuvieron un papel determinante en la regulación térmica del proceso, afectando directamente la actividad metabólica, la producción de CO_2 y la acidificación del medio. Este hallazgo resalta la importancia de controlar o monitorear las variaciones de temperatura ambiente para mantener condiciones óptimas y consistentes en procesos fermentativos

FIGURA 64

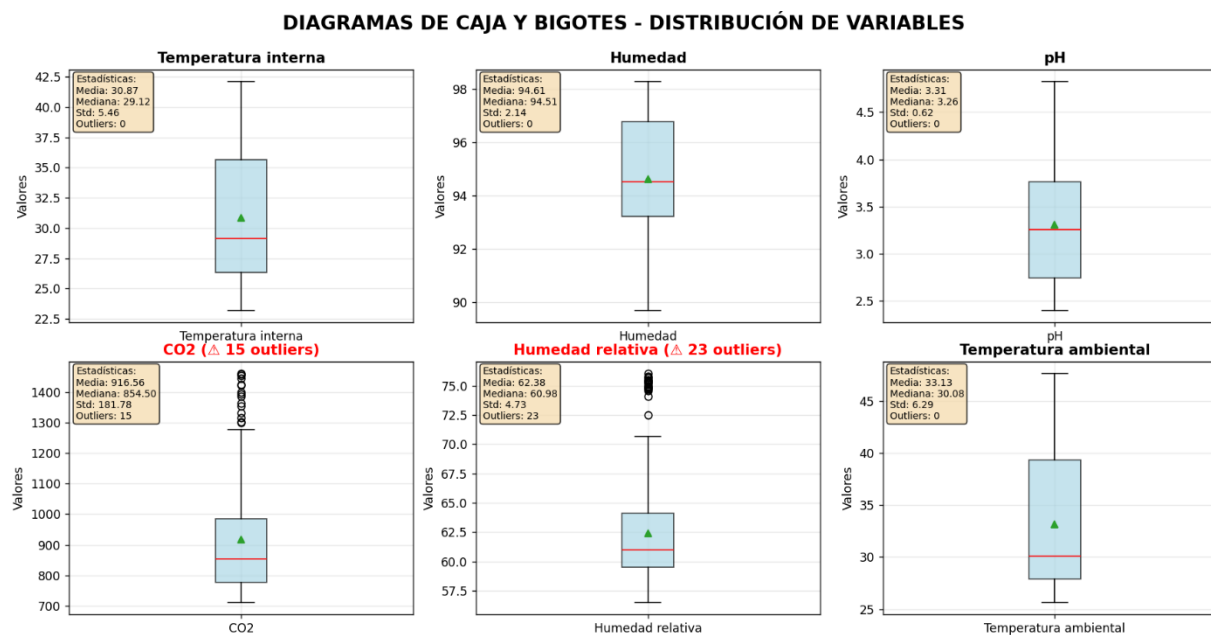
Mapa de calor para los distintos métodos de correlación de datos al 15% de llenado.



Nota. Análisis de Interdependencias mediante Matrices de Correlación: Pearson, Spearman y Kendall. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 65

Diagrama de cajas y bigotes para datos tomados al 15% de llenado.

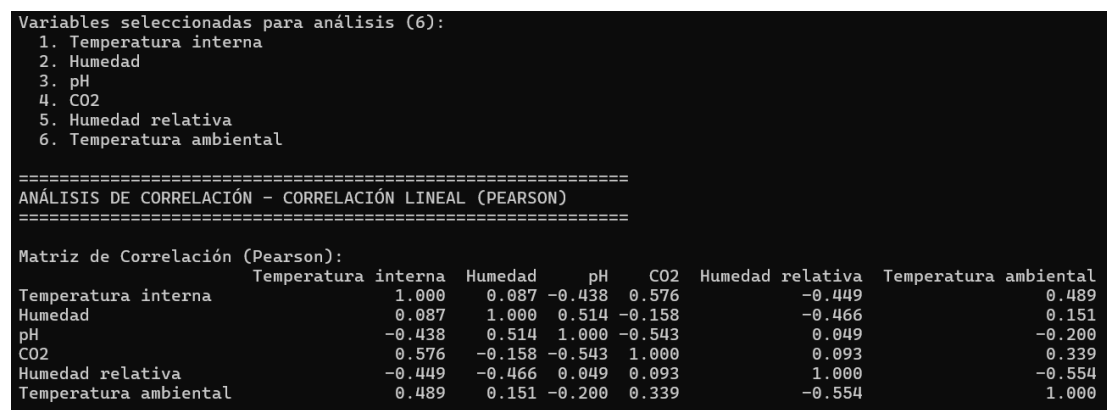


Notas. Diagrama de caja y bigotes para datos tomados del proceso de fermentación al 15% de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 ANALISIS DE DATOS A UN LLENADO DE LA TÓMBOLA DEL 25%

FIGURA 66

Matriz de correlación por el método de Pearson para datos al 25% de llenado.



Nota. Análisis de correlación de Pearson para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 25% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de correlación de Pearson identifica relaciones significativas entre las variables, destacando la asociación positiva moderada-alta entre CO₂ y Temperatura interna (0.576) y la correlación negativa moderada entre CO₂ y pH (-0.543). El pH también muestra una relación positiva con la Humedad (0.514), mientras que las variables interactivas Temperatura ambiental y Humedad relativa presentan una correlación inversa notable (-0.554). Entre las correlaciones moderadas, se observa que la Temperatura interna se relaciona negativamente con el pH (-0.438) y con Humedad relativa (-0.449), pero positivamente con Temperatura ambiental (0.489).

FIGURA 67

Matriz de correlación por el método de Spearman para datos al 25% de llenado.

```

=====
ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - CORRELACIÓN POR RANGOS (SPEARMAN)
=====
Matriz de Correlación (Spearman):

```

	Temperatura interna	Humedad	pH	CO ₂	Humedad relativa	Temperatura ambiental
Temperatura interna	1.000	0.048	-0.439	0.650	-0.367	0.504
Humedad	0.048	1.000	0.600	-0.150	-0.513	0.182
pH	-0.439	0.600	1.000	-0.636	-0.008	-0.278
CO ₂	0.650	-0.150	-0.636	1.000	-0.101	0.395
Humedad relativa	-0.367	-0.513	-0.008	-0.101	1.000	-0.570
Temperatura ambiental	0.504	0.182	-0.278	0.395	-0.570	1.000

Nota. Análisis de correlación de Spearman para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 25% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de Spearman revela correlaciones más intensas que el método de Pearson, destacando la fuerte relación positiva entre CO₂ y Temperatura interna (0.650) y la intensa correlación negativa entre CO₂ y pH (-0.636). El pH y la humedad mantienen una asociación positiva sólida (0.600), mientras que las variables interactivas Temperatura ambiental y Humedad relativa presentan una clara relación inversa (-0.570). Se observan correlaciones moderadas entre Temperatura interna y Temperatura ambiental (0.504) y un vínculo inverso moderado entre Humedad (en el interior de la tómbola) y Humedad relativa (-0.513).

El análisis de correlación Tau de Kendall revela relaciones generalmente más débiles en comparación con los métodos anteriores. La asociación más fuerte se observa entre Temperatura interna y CO₂ con una correlación de (0.459). La temperatura interna muestra una correlación positiva con Temperatura ambiental de (0.349), mientras que humedad y Humedad relativa presentan un vínculo inverso de (-0.366). Este método conservador confirma solo los patrones de relación más consistentes en los datos.

FIGURA 68

Matriz de correlación por el método de Tau de Kendall para datos al 25% de llenado.

```

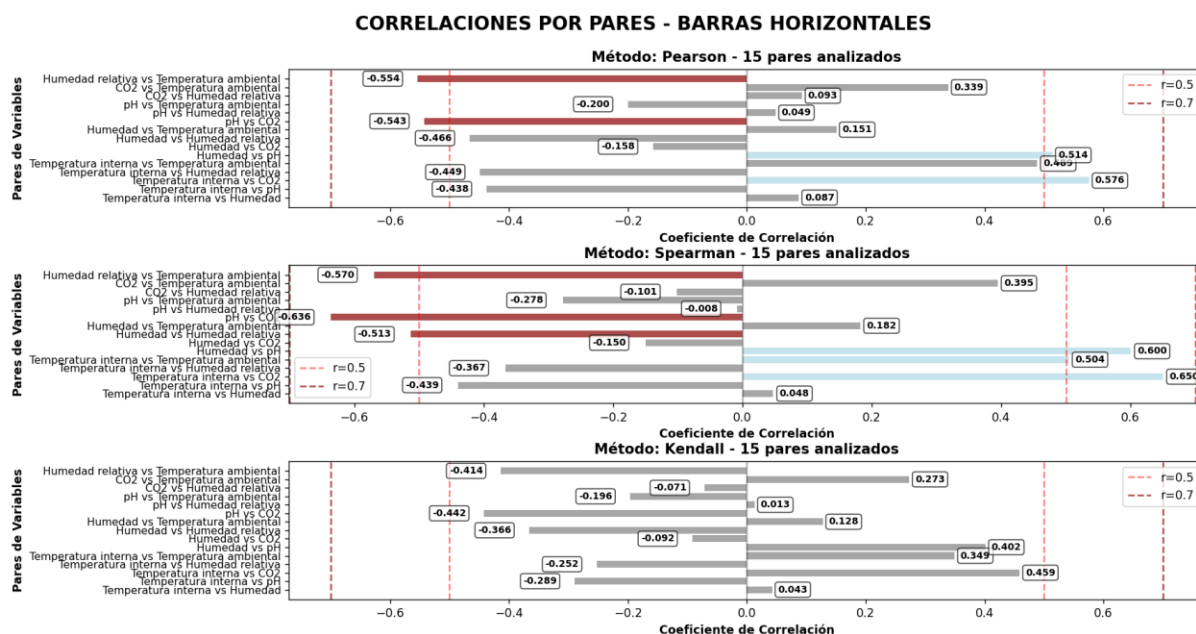
=====
ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - CORRELACIÓN TAU DE KENDALL
=====

Matriz de Correlación (Kendall):
  Temperatura interna  Humedad  pH  CO2  Humedad relativa  Temperatura ambiental
Temperatura interna  1.000  0.043 -0.289  0.459  -0.252  0.349
Humedad              0.043  1.000  0.402 -0.092  -0.366  0.128
pH                   -0.289  0.402  1.000 -0.442  0.013  -0.196
CO2                   0.459  -0.092 -0.442  1.000  -0.071  0.273
Humedad relativa     -0.252  -0.366  0.013 -0.071  1.000  -0.414
Temperatura ambiental 0.349  0.128 -0.196  0.273  -0.414  1.000
    
```

Nota. Análisis de correlación de Tau de Kendall para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 25% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 69

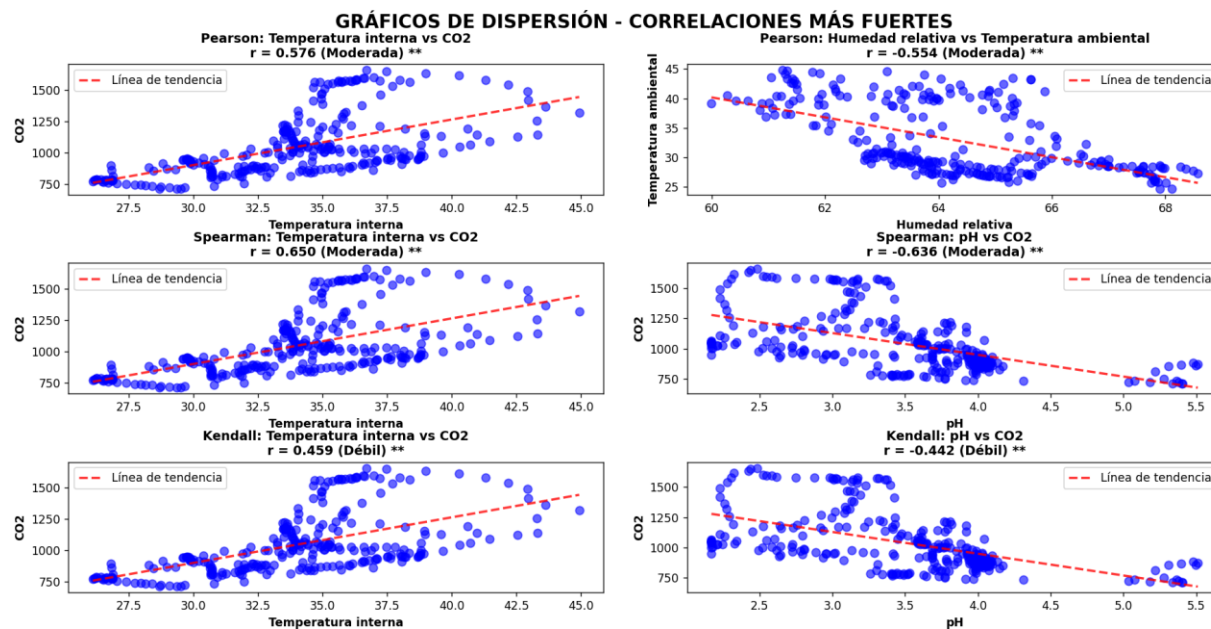
Correlación por Pares – Barras Horizontales para datos al 25% de llenado.



Nota. Correlación por pares de variables de los 3 métodos estadísticos. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 70

Gráficos de dispersión para datos al 25% de llenado.

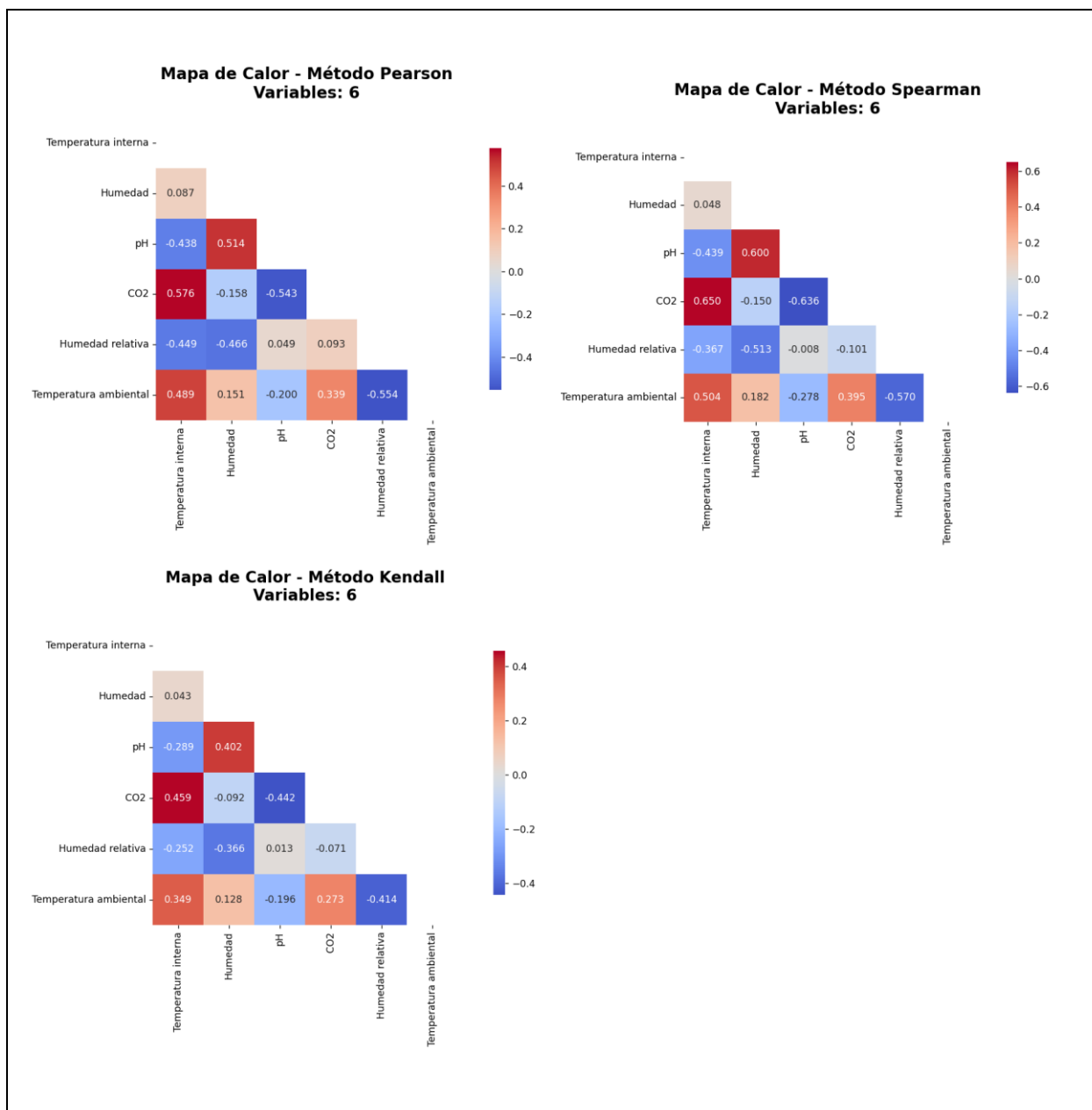


Notas. Gráficos de dispersión de las correlaciones más fuertes obtenidas por cada método. Fuente: Elaboración propia.

Los tres métodos estadísticos confirman consistentemente un patrón fermentativo activo y saludable, donde la temperatura muestra una influencia determinante en el comportamiento del sistema. Se mantiene de forma robusta la relación positiva entre temperatura interna y CO₂, así como la correlación inversa entre CO₂ y pH que evidencia la acidificación característica del proceso. Las variables interactivas Temperatura ambiental y Humedad relativa presentan una relación inversa consistente en todos los métodos. El análisis revela que Spearman detecta correlaciones más intensas, Pearson muestra valores moderados y Kendall ofrece estimaciones más conservadoras. La humedad demuestra una influencia limitada en el proceso global, con excepción de su relación con el pH. La consistencia entre métodos valida la robustez de las interdependencias bioquímicas identificadas. Este perfil correlacional confirma que el sistema fermentativo opera bajo los parámetros esperados de un metabolismo microbiano activo.

FIGURA 71

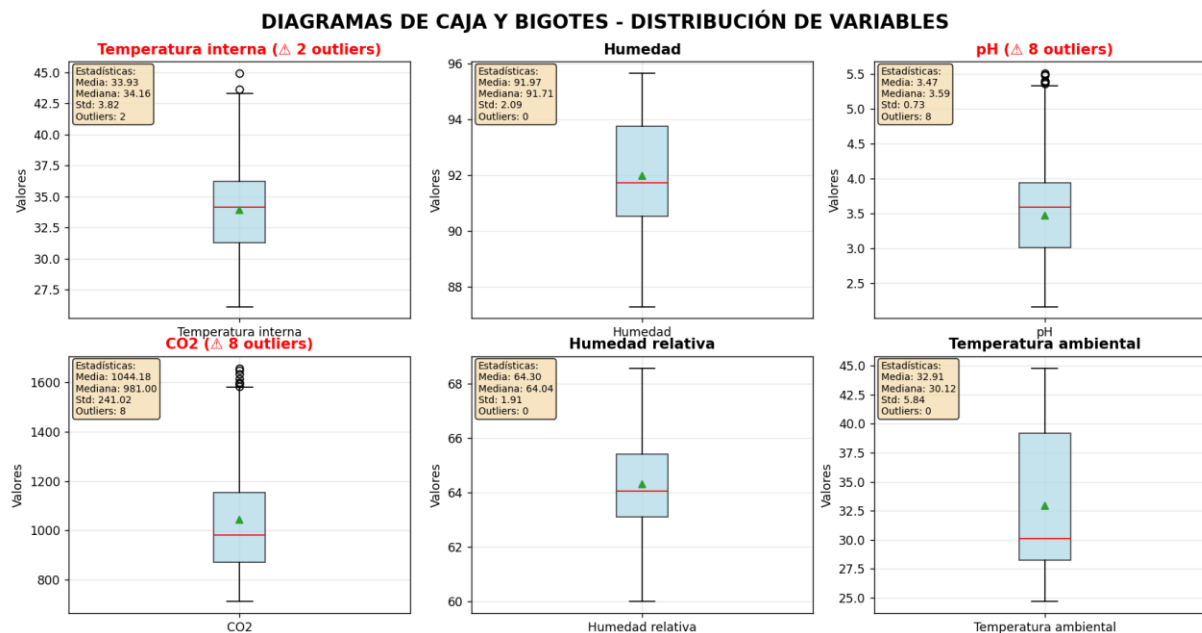
Mapa de calor para los distintos métodos de correlación de datos al 25% de llenado.



Nota. Análisis de Interdependencias mediante Matrices de Correlación: Pearson, Spearman y Kendall. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 72

Diagrama de cajas y bigotes para datos tomados al 25% de llenado.



Notas. Diagrama de caja y bigotes para datos tomados del proceso de fermentación al 25% de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 ANALISIS DE DATOS A UN LLENADO DE LA TÓMBOLA DEL 70%**FIGURA 73**

Matriz de correlación por el método de Pearson para datos al 70% de llenado.



Nota. Análisis de correlación de Pearson para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 70% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de correlación de Pearson con 5 variables muestra un patrón de relaciones distinto al anterior. La correlación más fuerte es negativa entre Temperatura interna y Humedad relativa (-0.571). La Temperatura interna presenta una correlación positiva moderada con humedad (0.348), mientras que el resto de asociaciones son notablemente débiles. El CO2 muestra correlaciones particularmente bajas con todas las variables, siendo la más alta con humedad (0.210). Las variables interactivas Humedad relativa y Temperatura ambiental mantienen una relación inversa moderada (-0.309).

FIGURA 74

Matriz de correlación por el método de Spearman para datos al 70% de llenado.

```

=====
ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - CORRELACIÓN POR RANGOS (SPEARMAN)
=====
Matriz de Correlación (Spearman):
Temperatura interna Humedad CO2 Humedad relativa Temperatura ambiental
Temperatura interna 1.000 0.205 0.166 -0.668 0.305
Humedad 0.205 1.000 0.237 -0.070 0.261
CO2 0.166 0.237 1.000 -0.086 0.122
Humedad relativa -0.668 -0.070 -0.086 1.000 -0.352
Temperatura ambiental 0.305 0.261 0.122 -0.352 1.000

```

Nota. Análisis de correlación de Spearman para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 70% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de correlación de Spearman revela una estructura de relaciones similar pero más definida. Destaca especialmente la fuerte correlación negativa entre Temperatura interna y Humedad relativa (-0.668), la más intensa detectada en todos los análisis. Temperatura interna también muestra correlaciones positivas moderadas con Temperatura ambiental (0.305) y humedad (0.205). Por su parte, la humedad mantiene asociaciones positivas débiles con CO2 (0.237) y Temperatura ambiental (0.261). Las variables interactivas Humedad relativa y Temperatura ambiental presentan una relación inversa moderada (-0.352). Notablemente, CO2 muestra correlaciones particularmente bajas con todas las variables, siendo la más significativa con humedad (0.237). El método Spearman confirma el patrón de relaciones débiles generalizadas, pero intensifica la fuerte conexión inversa entre temperatura interna y la variable interactiva humedad relativa.

FIGURA 75

Matriz de correlación por el método de Tau de Kendall para datos al 70% de llenado

```

=====
ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - CORRELACIÓN TAU DE KENDALL
=====

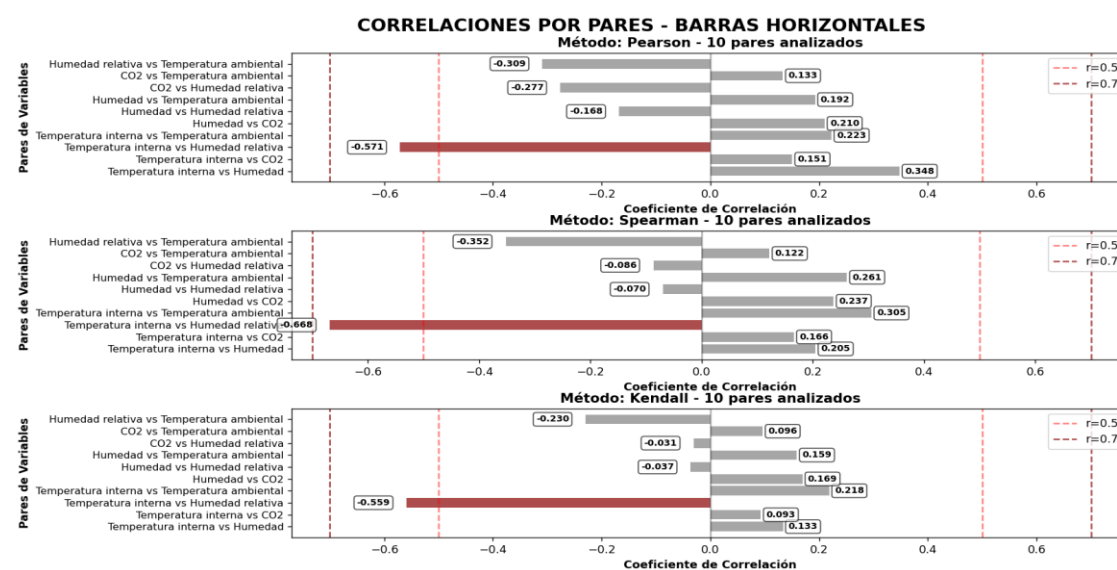
Matriz de Correlación (Kendall):
  Temperatura interna  Humedad  CO2  Humedad relativa  Temperatura ambiental
Temperatura interna    1.000  0.133  0.093  -0.559  0.218
Humedad                0.133  1.000  0.169  -0.037  0.159
CO2                    0.093  0.169  1.000  -0.031  0.096
Humedad relativa      -0.559 -0.037 -0.031  1.000  -0.230
Temperatura ambiental  0.218  0.159  0.096  -0.230  1.000
  
```

Nota. Análisis de correlación de Tau de Kendall para todas las variables involucradas en el proceso de fermentación, con los datos correspondientes al 70% de llenado. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de correlación Tau de Kendall confirma el patrón observado en métodos anteriores, mostrando relaciones generalmente más conservadoras. La correlación más fuerte se mantiene entre Temperatura interna y Humedad relativa con un valor de (-0.559), consistente con la relación inversa identificada previamente. Temperatura interna también presenta asociaciones positivas débiles con Temperatura ambiental (0.218) y humedad (0.133). Por otro lado, la humedad muestra correlaciones bajas con todas las variables, siendo la más notable con CO2 (0.169).

FIGURA 76

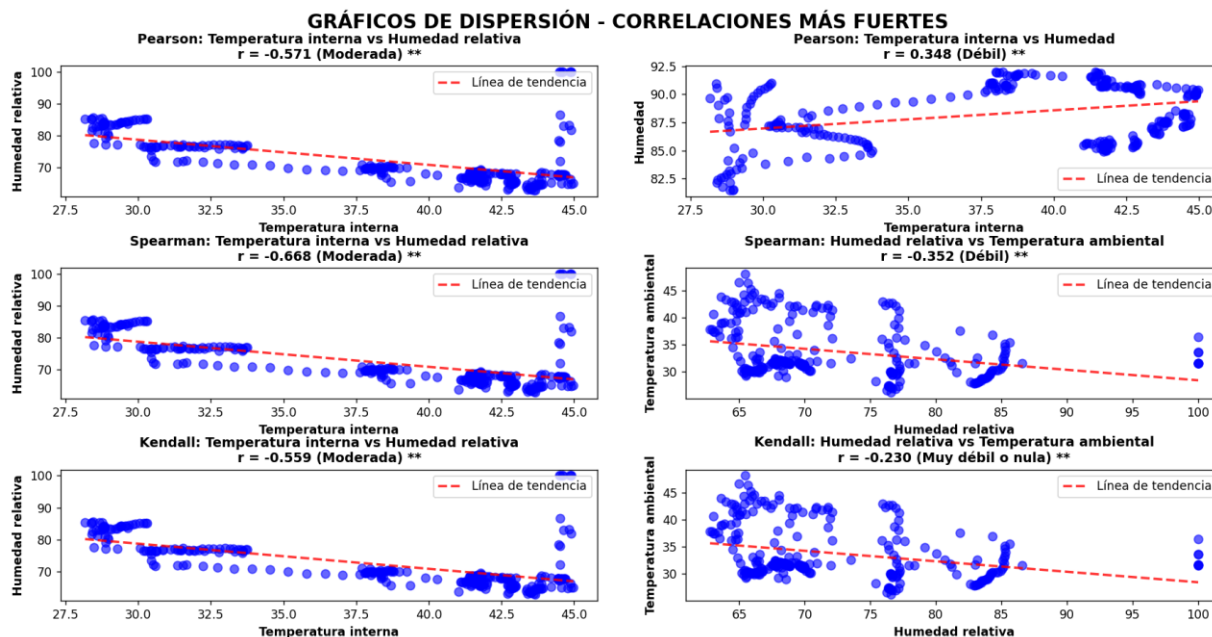
Correlación por Pares – Barras Horizontales para datos al 70% de llenado.



Nota. Correlación por pares de variables de los 3 métodos estadísticos. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 77

Gráficos de dispersión para datos al 70% de llenado.



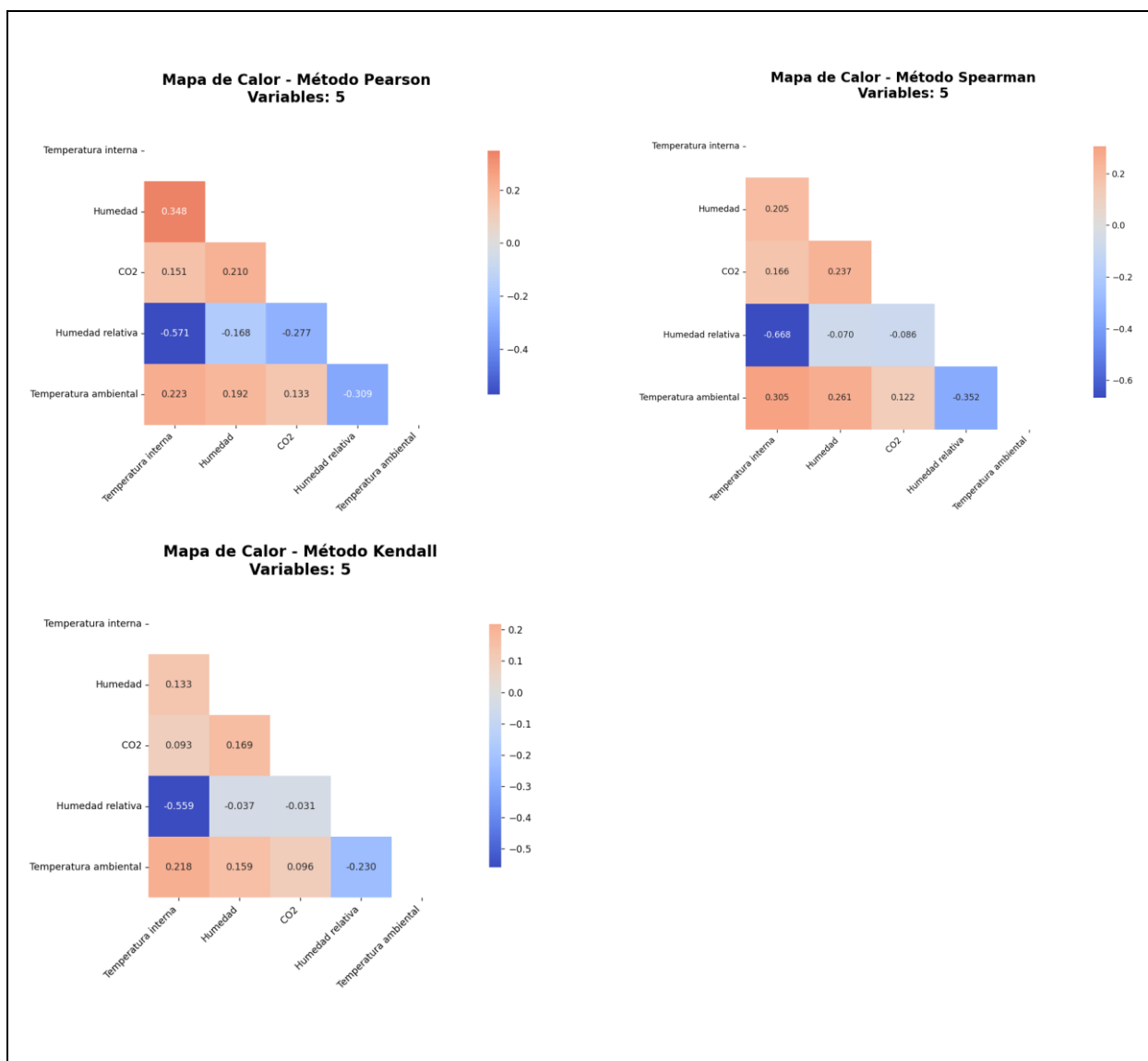
Notas. Gráficos de dispersión de las correlaciones más fuertes obtenidas por cada método. Fuente: Elaboración propia.

El análisis correlacional con 5 variables revela una estructura de relaciones más simple pero consistentemente validada por los tres métodos estadísticos. La temperatura interna muestra la correlación más fuerte con la variable interactiva Humedad relativa, alcanzando valores negativos significativos que oscilan entre (-0.559) y (-0.668) según el método utilizado. Las asociaciones restantes son predominantemente débiles, con la humedad (en el interior) y el CO₂ mostrando influencias limitadas en el sistema. Las variables interactivas Temperatura ambiental y Humedad relativa mantienen una relación inversa consistente en todos los métodos, aunque con intensidad variable. El método de Spearman detecta las correlaciones más intensas, especialmente en la relación temperatura interna-Humedad relativa, mientras Kendall presenta los valores más conservadores. El CO₂ demuestra correlaciones particularmente bajas con todas las variables, indicando su relativo aislamiento en este conjunto reducido. El patrón general confirma que la temperatura sigue siendo la variable más influyente, mientras que las relaciones bioquímicas

complejas observadas en análisis anteriores se atenúan significativamente. La consistencia entre métodos valida la robustez de estas relaciones fundamentales en el sistema fermentativo.

FIGURA 78

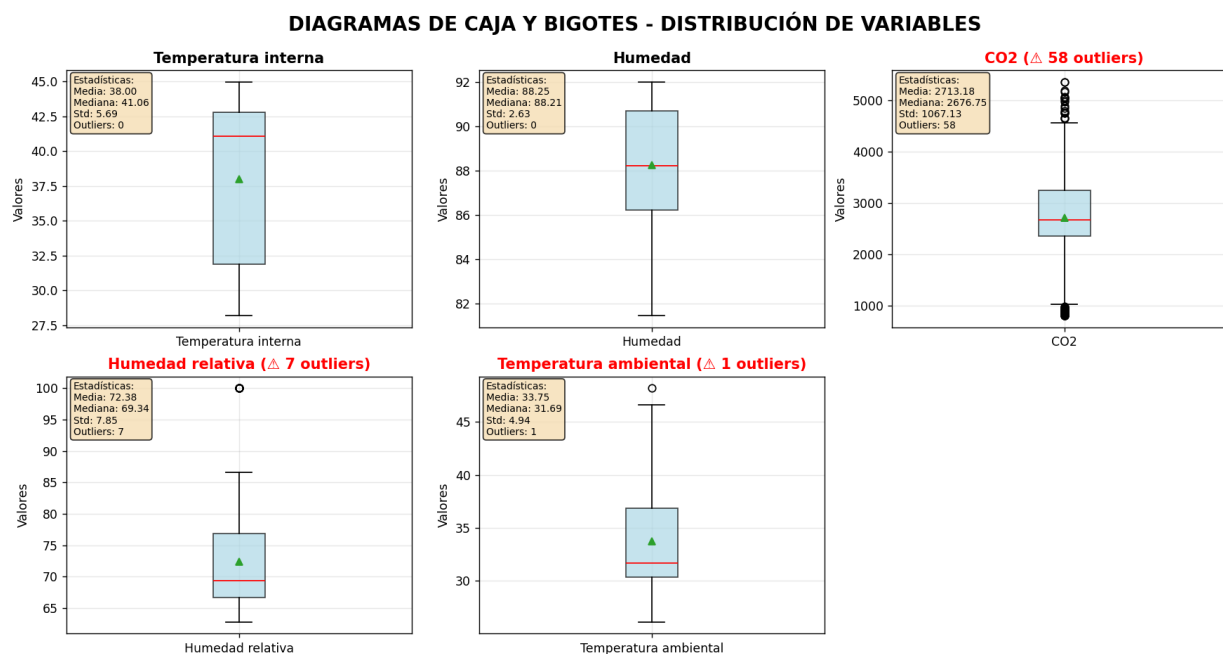
Mapa de calor para los distintos métodos de correlación de datos al 70% de llenado.



Nota. Análisis de Interdependencias mediante Matrices de Correlación: Pearson, Spearman y Kendall. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 79

Diagrama de cajas y bigotes para datos tomados al 70% de llenado.



Notas. Diagrama de caja y bigotes para datos tomados del proceso de fermentación al 70% de llenado de la tómbola. Fuente: Elaboración propia.

3.4 EVALUACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL PROTOTIPO IMPLEMENTADO

La primera prueba del desempeño energético del motor fue ejecutada, midiendo la entrada de la carga.

FIGURA 80

Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de volteo.



Nota. Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de volteo, en la primera medición del 24 de junio al 1 de julio de 2025. Fuente: Elaboración propia.

El análisis del sistema eléctrico muestra un patrón cíclico diario con voltajes entre 12.54 V y 15.57 V (media: 13.32 V), presentando máxima generación entre 08:00-10:00 horas (>15 V) y mínimos nocturnos (~12.6 V) que demuestran el correcto funcionamiento del almacenamiento energético.

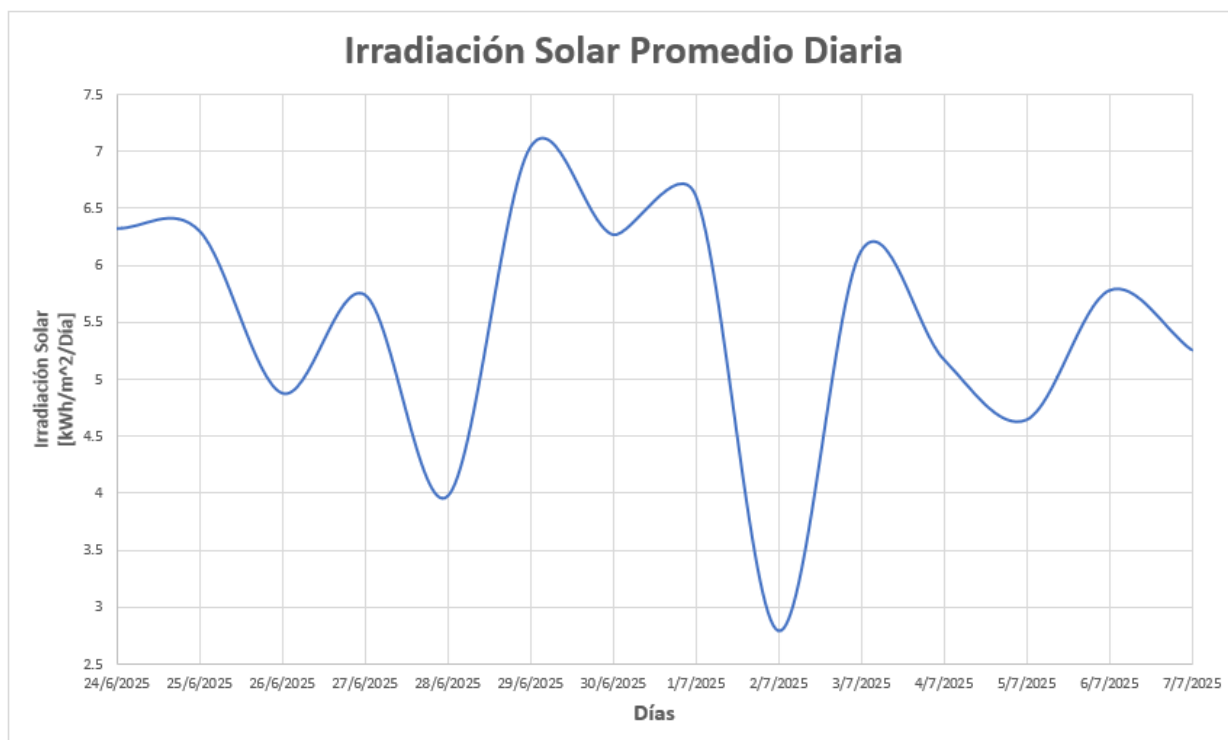
La correlación con datos de irradiancia solar de la plataforma NASA POWER confirmó que las disminuciones de voltaje registradas entre el 27-29 de junio se atribuyeron directamente a la reducción de radiación solar por condiciones climáticas adversas, evidenciando la dependencia directa entre la generación eléctrica y la irradiancia disponible.

Se utilizaron los valores de irradiancia solar registrados entre el 21 de junio y el 3 de julio de 2025, correspondientes a la ubicación del prototipo (13.7222° latitud, -89.199° longitud). Los resultados, evidencian una relación directa entre la irradiancia solar y el voltaje del sistema de respaldo, con desfases temporales atribuibles a la dinámica de carga y descarga. La irradianción solar presentó valores comprendidos entre 3.97 y 7.04 kWh/m², con un promedio de aproximadamente 6.08 kWh/m², mientras que los valores de voltaje se mantuvieron entre sus niveles más bajos en los días 27 y 28 de junio, coincidiendo con los valores bajos de irradianción.

Sin embargo, el 29 de junio, a pesar de registrarse el mayor nivel de irradianción del periodo, 7.04 kWh/m², el voltaje de la batería se mantuvo entre los tres más bajos. Este comportamiento se debe a que los días anteriores presentaron irradianción deficiente, generando déficit energético que no pudo compensarse en una sola jornada, evidenciando así el carácter acumulativo del estado de carga de las baterías y la influencia de la demanda conectada al sistema.

FIGURA 81

Irradiación solar promedio diaria durante la primera medición del comportamiento de tensión

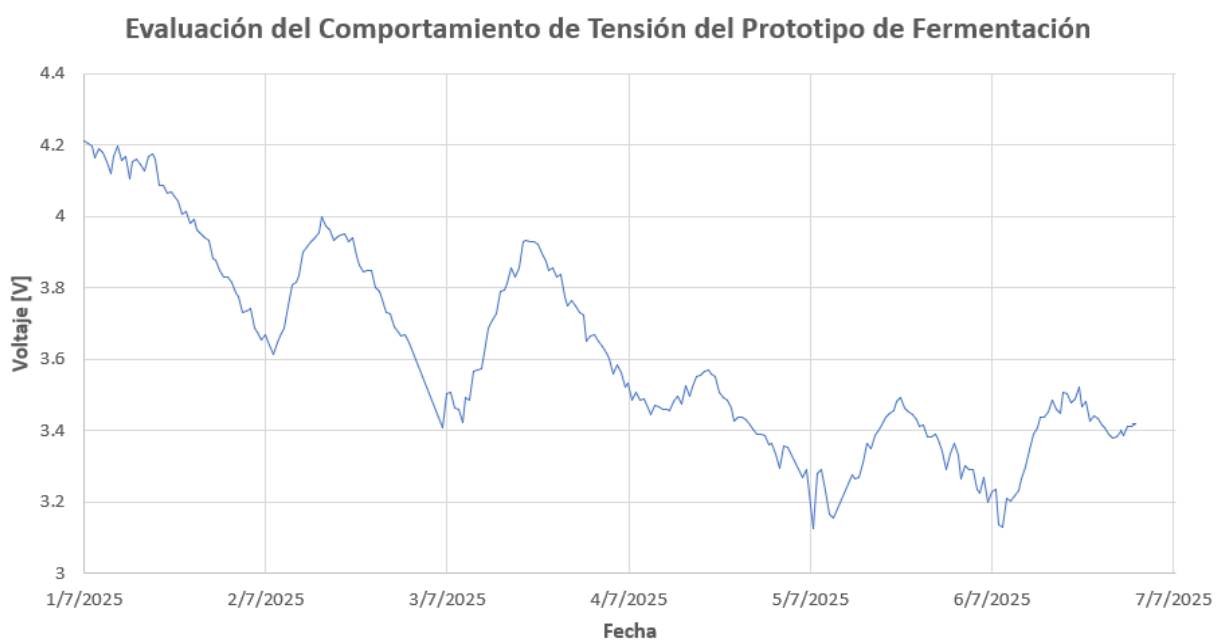


Nota. Irradiación solar durante la primera medición en el período comprendido entre el 24 de junio y el 7 de julio. Fuente: (NASA POWER | Data Access Viewer (DAV), n.d.)

La ubicación del panel solar limitó su exposición directa al sol a solo 6.5 horas diarias. Esta restricción, impuesta por el diseño de la infraestructura, impidió que el sistema estableciera un ciclo de carga constante. Como consecuencia, el sistema operó principalmente con las baterías, lo que provocó una tendencia negativa y una disminución progresiva del voltaje, en lugar de mantener la estabilidad esperada.

FIGURA 82

Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de sensores.



Nota. Medición del comportamiento de tensión en el sistema de sensores durante la primera prueba, en el período del 1 de julio al 7 de julio. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de sensores registró una tendencia descendente en el voltaje con un promedio de 3.73 V y variabilidad moderada (desviación estándar: 0.29 V). El valor máximo de 4.21 V del 1 de julio reflejó la carga inicial del 100%, manteniéndose sobre 4 V por 10 horas, mientras que el mínimo de 3.11 V del 5 de julio evidenció la insuficiente recarga solar diaria. Esta incapacidad para mantener niveles constantes, similar a lo observado en junio con el motor, determinó el cambio de ubicación geográfica del sistema para optimizar su rendimiento.

Durante el periodo de la Segunda Prueba del Sistema de Volteo, el prototipo fue ubicado en otra posición geográfica, con coordenadas geográficas de 13.53333° de latitud y -88.91667° de longitud.

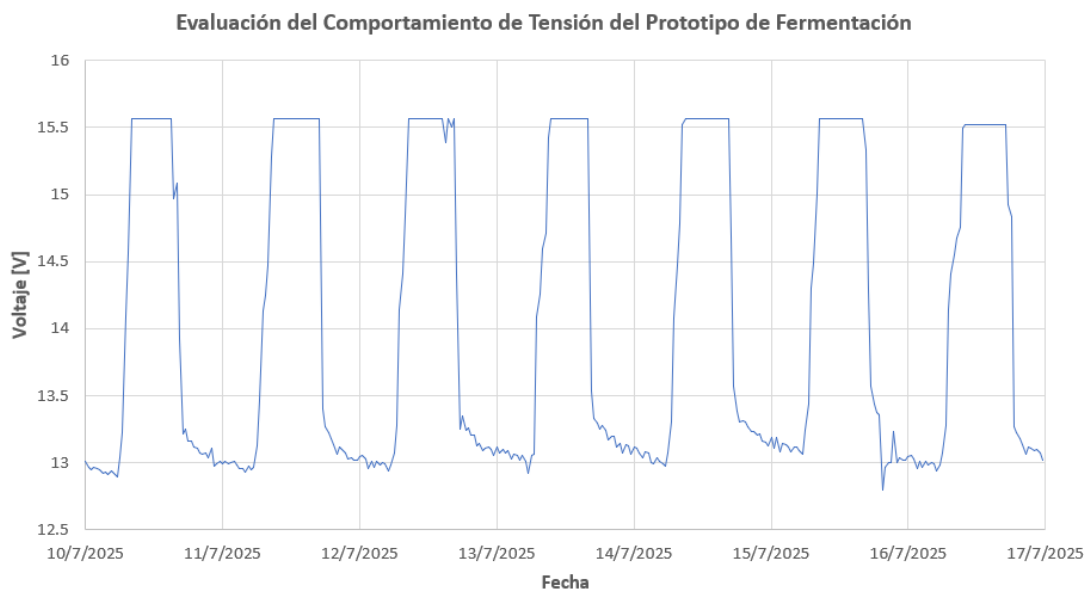
La segunda medición del sistema de volteo, en el periodo comprendido entre el 10 y el 16 de julio de 2025, los registros de voltaje de mostraron un comportamiento cíclico diario. Los valores oscilaron entre un mínimo de 12.80 V el 15 de julio a las 19:45 h y un máximo de 15.57 V, alcanzado de forma recurrente en las horas centrales del día.

En horas de la madrugada, los voltajes permanecieron en un rango de 12.9–13.1 V, evidenciando la fase de descarga natural. Mientras que, por las mañanas se registró un ascenso progresivo del voltaje, alcanzando rápidamente valores de 14.0–15.5 V a partir de las 07:15 h, lo que corresponde al inicio de la carga inducida por la irradiación solar. Posteriormente, en horas de la tarde-noche, tras la disminución de la irradiación, se observó un descenso progresivo hasta valores cercanos a 13.0 V. Para caracterizar la estabilidad del sistema durante la fase de descarga nocturna, se calculó la desviación estándar muestral sobre los registros comprendidos entre las 23:45 y 05:45 h. El valor obtenido fue de 0.88 V, lo que indica una baja variabilidad en el voltaje de batería en ausencia de generación solar.

La segunda prueba partió de un valor de irradiación de $6.28 \text{ kWh/m}^2/\text{Día}$, registrando un máximo de $7.29 \text{ kWh/m}^2/\text{Día}$, con una tendencia ascendente a lo largo del período de prueba, debido a que no se registraron lluvias. Se evidenció una tendencia ascendente sostenida, atribuible a la ausencia de precipitaciones. Como resultado, los valores promedio de irradiación registrados en esta etapa fueron superiores a los de la primera prueba. Adicionalmente, el cambio de ubicación del sistema permitió ampliar el periodo de exposición solar diaria de 6.5 a aproximadamente 10.5 horas.

FIGURA 83

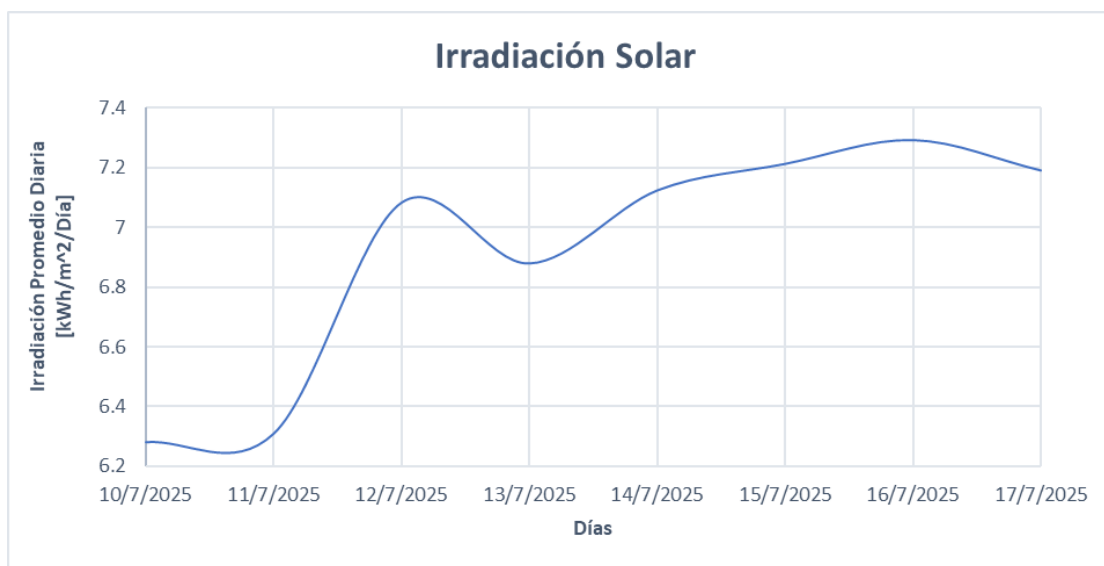
Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de volteo.



Nota. Medición del comportamiento de tensión en el sistema de volteo durante la segunda prueba del 10 de julio al 17 de julio. Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 84

Irradiación solar promedio diaria durante la segunda medición del comportamiento de tensión.

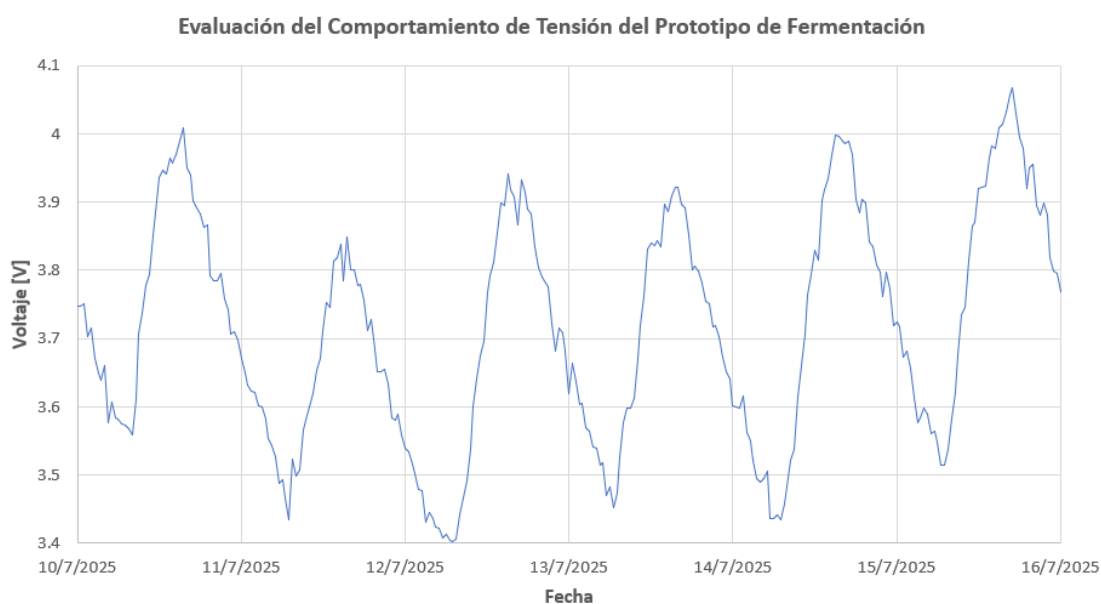


Nota. Irradiación solar durante la primera medición en el período comprendido entre el 24 de junio y el 7 de julio. Fuente: (NASA POWER | Data Access Viewer (DAV), n.d.)

Por otra parte, el consumo del sistema de sensores, mostró una notable mejora, con periodos de carga-descarga de forma cíclica. Durante el periodo comprendido entre el 10 y el 16 de julio de 2025, el voltaje promedio fue de 3.71 V, con un mínimo de 3.40 V y un máximo de 4.06 V, alcanzado el 15 de julio a las 17:15 h. La desviación estándar global fue de 0.17 V, lo que indica una dispersión moderada y una operación estable. A nivel diario, se observó una ligera tendencia ascendente en el voltaje promedio, desde 3.64 V el 11 de julio hasta 3.87 V el 15 de julio, acompañada de un incremento gradual en la variabilidad. Las horas de menor voltaje se concentraron entre las 04:15 y 07:15 h, mientras que los valores máximos entre las 15:15 y 17:45 h, con un tiempo promedio de carga de aproximadamente 15.5 horas. En comparación con la primera prueba de sensores, esta segunda prueba presenta un ciclo de carga y descarga de cada día, mientras que, la primera prueba únicamente mostraba una tendencia de descarga. Manteniendo cada día un periodo de carga entre las 7:00 hasta las 17:00.

FIGURA 85

Medición del comportamiento de tensión en la entrada de la carga del sistema de sensores.



Nota. Medición del comportamiento de tensión en el sistema de sensores durante la segunda prueba, en el período del 10 de julio al 17 de julio. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIONES

- El prototipo desarrollado demuestra una capacidad operativa adecuada para entornos remotos, gracias a su sistema de alimentación eléctrica basado en paneles solares y baterías. El sistema de volteo evidenció autonomía durante todo el proceso de fermentación, incluso bajo condiciones de irradiación solar inferiores a 6 kWh/m²/día y con un mínimo de 6.5 horas de exposición solar diaria. Sin embargo, el subsistema de sensores presentó una mayor sensibilidad ante la disminución de estos parámetros, afectando su estabilidad operativa. Por tanto, la autonomía energética del sistema de fermentación de cacao depende directamente del funcionamiento continuo del sistema de sensores, siendo indispensable mantener una irradiación mínima de 6 kWh/m²/día y una exposición solar superior a 6.5 horas diarias para garantizar niveles de tensión estables y operación nocturna sin interrupciones.
- La evaluación del comportamiento de las variables de interés, mostro una correlación fuertemente positiva (0.9634) entre el volumen de carga y la variación de la temperatura interna del mosto. El mejor desempeño se logró con cargas mayores al 70% del volumen interno de la tómbola. Así mismo, en las pruebas realizadas, las variaciones de temperatura ambiente, no reflejaron un alto impacto en el proceso de fermentación, fue más significativo la influencia del volumen de carga. Los datos recopilados mostraron una correlación baja (0.221) entre la temperatura ambiental y la temperatura interna del mosto. Además, el volumen de carga del 70% facilita una rápida acumulación de dióxido de carbono (CO₂) durante los tres primeros días de fermentación, lo que contribuye al desarrollo óptimo del proceso.
- El sistema de monitoreo implementado a nivel de prototipo, que integra los sensores FS400-SHT30, PH-4502C y SCD41, ha demostrado ser una solución económica y funcionalmente eficiente. Sin embargo, para la medición de temperatura, se recomienda el sensor RTD tipo Pt100/Pt1000, respaldado por la norma IEC 60751, que garantiza alta precisión y resistencia mecánica, especialmente si se utiliza con una sonda de acero inoxidable AISI 316L.

En el monitoreo de pH, el sensor DFRobot Gravity: Industrial pH Meter Kit se presenta como la opción más adecuada, gracias a su sistema de referencia Ag/AgCl y tapón de PTFE, que le confieren resistencia química y mecánica. Su vida útil supera los seis meses, lo que lo hace apto para operaciones prolongadas.

Para la medición de CO₂, se sugiere el uso de sensores basados en tecnología NDIR (infrarrojo no dispersivo), reconocidos por su alta estabilidad a largo plazo y una vida útil estimada entre 5 y 15 años, lo que garantiza mediciones confiables en procesos industriales exigentes.

- La evaluación del desempeño del sistema se realizó mediante un proceso de calibración cruzada, validando la precisión de los sensores en condiciones reales. El sensor PH-4502C fue calibrado con soluciones buffer certificadas, logrando una desviación máxima de 1.0 unidad de pH respecto a los valores de referencia tras ajustes lineales. La exactitud del sensor SCD41 se confirmó mediante comparación con equipos especializados de la Facultad de Agronomía de la Universidad de El Salvador, evidenciando consistencia en entornos reales. Por su parte, el sensor FS400-SHT30 mostró variaciones mínimas frente al patrón comercial Klein Tools MM420, consideradas dentro de los límites de tolerancia para la etapa actual del sistema. La aplicación de calibración cruzada y validación con patrones institucionales respalda la fiabilidad y exactitud del sistema, confirmando su aptitud para el monitoreo preciso de variables críticas en el entorno de estudio.
- La selección de la plataforma ThingsBoard para el sistema de monitoreo IoT representa una solución eficiente, escalable y rentable. Su baja curva de aprendizaje facilita una implementación ágil, mientras que su arquitectura robusta permite gestionar hasta 30 microcontroladores con capacidad de monitoreo en tiempo real y almacenamiento histórico confiable. Además, ofrece hasta 25 dashboards personalizables, con una interfaz visual intuitiva que optimiza la supervisión de dispositivos activos e inactivos. El costo mensual de \$10 valida su viabilidad económica, además es una opción altamente eficiente y accesible, siendo ideal para desplegar sistemas IoT robustos y escalables.

RECOMENDACIONES

- Considerando que el prototipo ha sido diseñado para operar a la intemperie, se identifica la necesidad de reforzar su resistencia ambiental. A pesar de la protección existente de los componentes electrónicos, se identifica un riesgo en la fiabilidad operativa. Se recomienda la incorporación de anillos deslizantes conjuntamente con un eje hueco. Esta configuración permitirá el traslado seguro y continuo del cableado de señal y potencia hacia el exterior de la tómbola. Lo que permite la construcción e implementación de una estructura protectora para resguardar la tómbola.
- El método de tambor rotatorio evidencia una mayor uniformidad en el proceso de fermentación en comparación con los métodos tradicionales. La incorporación de paletas o aspas que giran juntamente con el eje del tambor podría incrementar significativamente el porcentaje de uniformidad en la fermentación, optimizando así la calidad y homogeneidad del producto final.
- La dependencia exclusiva de la energía solar y el almacenamiento en baterías compromete la disponibilidad del sistema en escenarios de baja irradiación solar sostenida. Por tanto, se recomienda la adición de una fuente de alimentación alternativa mediante la integración de un convertor AC-DC. Esta modificación habilitaría la conexión directa al suministro eléctrico comercial de 120 VAC, brindando al sistema de la robustez necesaria para operar bajo cualquier condición climática.
- Para la medición del CO₂ se recomienda diseñar e implementar un sistema de filtrado de doble etapa para proteger el sensor SCD41. Primero una membrana de PTFE como barrera externa, esta es hidrofóbica y bloquea el polvo y la humedad, pero permite el paso del CO₂. Y una segunda parte con una capa interna de carbón activado para que adsorba los Compuestos Orgánicos Volátiles y otros gases químicos que pueden dañar la óptica del sensor.

BIBLIOGRAFIA

- Afoakwa, E. O. (2016). *Chocolate Science and Technology: Second Edition. Chocolate Science and Technology: Second Edition*, 1–524. <https://doi.org/10.1002/9781118913758>
- Amazon. (n.d.). *Amazon.com: FS400-SHT30*. Retrieved November 14, 2025, from <https://www.amazon.com/FS400-SHT30-Temperature-Dustproof-Stainless-FS400-SHT3X/dp/B081B61HRP>
- Amazon.com: DHT11 Digital Temperatura y Humedad Sensor*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://www.amazon.com/-/es/Digital-Temperatura-Humedad-Sensor-M%C3%B3dulo/dp/B07MZRT6N6>
- Amazon.com: Medidor de pH analógico Pro V2 Sensor de pH profesional*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://www.amazon.com/Analog-Professional-Compatible-Arduino-Raspberry/dp/B08DRFDSLX>
- Amazon.com: MH Z19B del módulo del sensor del CO2*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://www.amazon.com/MH-Z19-MH-Z19B-Sensor-Dioxide-0-5000ppm/dp/B09L572ZSD>
- Amazon.com: SHILLEHTEK DHT22*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from https://www.amazon.com/SHILLEHTEK-DHT22-temperatura-microcontroladores-electr%C3%B3nica/dp/B0CN5PN225/ref=sr_1_1_sspa?dib=eyJ2IjoiMSJ9.frQrcRplSgotzoQSAV0kfasYVIYctMkN2Wsx7gXBprJ3frPIX-eNN6febndsCGqAFkuwGXlyMv8-mbRywezhyrjWGwRPju4w7D_Wla67aXkHO6G5_dpSz9HqN5MpJbAXpn83CXFDe3nZb8v60QTfEGvsSoWxHOht4dq2zYCX7IEUGG_5GoPDNZ4d6zV6RikWW2dgUN_UEQh1_7ozd-vnXRM34d94huV_vtwikw2Fo4.kYqMWBisYexc_m6M_zRkYNh_aRK-avORnkDeN8YXEc0&dib_tag=se&keywords=dht22+sensor&qid=1762908999&sr=8-1-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGY&psc=1
- Amazon.com: Teyleten Robot Módulo de sensor de gas SCD41*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://www.amazon.com/-/es/Teyleten-Temperatura-humedad-di%C3%B3xido-carbono/dp/B0C622SS34>
- ANALOG DEVICES. (2019). *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- Andres, S., & Galvis, R. (2022). *Desarrollo de un prototipo de fermentador cilíndrico con control de temperatura, humedad y agitación durante el proceso de fermentación del cacao*. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/8358>
- Aosong Electronics Co. (n.d.). *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)*. Retrieved November 14, 2025, from <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>
- Atlas Scientific. (2024). *EZO-pHTM Embedded pH Circuit*. https://files.atlas-scientific.com/pH_EZO_Datasheet.pdf

- Bravo, N., & Mingo, F. (2011). *Valoración de tres métodos de fermentación y secado para mejorar la calidad y rentabilidad del cacao fino de aroma (Theobroma cacao L.) en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cóndor, provincia de Zamora Chinchipe*. <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/4951>
- Briones Arias, M. P., Suárez Hernández, D. A., & ESPOL.FIMCP. (2023). *Diseño de un proceso de fermentación controlado de cacao Nacional Fino de Aroma (Theobroma cacao L.)*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/60781>
- Bruno, A., & Felice, P. Di. (2023). A Systematic Mapping Study about IoT Platforms. *Engineering Proceedings 2023, Vol. 56, Page 226, 56(1), 226*. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15388>
- CAJONES FERMENTADORES. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://www.fedecacao.com.co/convocatorias-fedecacao/cajones-fermentadores>
- Carmen, Y., & Erazo, G. (2019). *Diseño de un fermentador y secador solar piloto, para dos variedades de cacao (Theobroma cacao L), en el cantón El empalme provincia Guayas*. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3361>
- CAUSAS DE UNA MALA FERMENTACIÓN EN EL CACAO - Poscosecha Cacao. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://poscosechacacao.com/2021/02/causas-de-una-mala-fermentacion-en-el-cacao/>
- CORDOVA, R. (2019). *AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FERMENTACIÓN DE ALMENDRAS DE CACAO (THEOBROMA CACAO L.) PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES DE EL ORO*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA.
- EZO-PH Atlas Scientific | Development Boards, Kits, Programmers | DigiKey. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from https://www.digikey.com.mx/en/products/detail/atlas-scientific/EZO-PH/16003108?srsltid=AfmBOopNpBzIYafRTxV5W5UQpk1BpW1DDoDIU2vn_xOtaK6dwaiNNGvM
- Fabián Vera-Chang, J., José Reyes-Pérez, J., Ismael Benavides-Veraa, J., Guillermo Intriago-Flor, F., Humberto Vásquez-Cortezb, L., Naga-Raju, M., Estefanía Alvarado-Vásquez, K., Lovani Castro-Triana, V., & Castro, M. (2023). Effects of two fermentative methods on cacao (*Theobroma cacao L.*) Trinitario, induced with *Rhizobium japonicum* to reduce cadmium. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales, ISSN-e 2422-4456, Vol. 10, N°. 1, 2023 (Ejemplar Dedicado a: Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales), Págs. 95-106, 10(1), 95–106*. <https://doi.org/10.23850/24220582.5460>
- FERMENTADORA DE CACAO | Autodesk Community Gallery. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://www.autodesk.com/community/gallery/project/129859/fermentadora-de-cacao>
- Figueroa, J. (2023). *Diseño y Ensamble de un Biorreactor Automatizado para el Proceso de Fermentación del Cacao*. <http://repositorio.unad.edu.co/handle/10596/56194>

- Flores Dávila, F. S. (2023). *Evaluación del uso de enzimas pectinolíticas presentes en residuos de cítricos en el proceso de fermentación del cacao (Theobroma cacao l.)*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15306>
- Gravity: Industrial Analog pH Sensor (Arduino, Raspberry Pi) - DFRobot*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from https://www.dfrobot.com/product-2069.html?srsId=AfmBOorq_36gMsTJi-T8PVQpNfSCQrj4I0fKf7m13wT953qMYIfy8ihy
- Graziani de Fariñas, L., Ortiz de Bertorelli, L., Alvarez, N., & Trujillo de Leal, A. (2003). Fermentación del cacao en dos diseños de cajas de madera. *Agronomía Tropical*, 53(2), 175–188. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2003000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Honeywell. (2008). *HIH-4030/31 Series Humidity Sensors*. <https://www.pololu.com/file/0J324/HH-4030-datasheet.pdf>
- Humidity Sensor - HIH-4030 Breakout - Ingenieria C&C*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from https://www.controlcomp.com/inicio/32-humidity_sensor_hih-4030_breakout.html
- INJELETRICA Motor Limpiador Parabrisa Jeep Renegade 2018/2020 - 91498535*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://injeletrica.mercadoshops.com.br/motor-limpador-parabrisa-jeep-renegade-20182020--91498535/up/MLBU3017958601>
- Ismail, A. A., Hamza, H. S., & Kotb, A. M. (2018). Performance Evaluation of Open Source IoT Platforms. *2018 IEEE Global Conference on Internet of Things, GCIoT 2018*. <https://doi.org/10.1109/GCIOT.2018.8620130>
- Jimenez-Peralta, F., Gloria, J., & Pizango-Linares, E. (2023). Sistema inteligente basado en deep learning para la optimización de la fermentación del cacao. *Revista Amazonía Digital*, 2(1), e277–e277. <https://doi.org/10.55873/RAD.V2I1.277>
- K-Type Thermocouple 10cm Metal Head - 1832°F | TL1813 | PerfectPrime*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://perfectprime.com/products/tl1813?srsId=AfmBOopYLTLcMg7y5Rqs6z8910NeDEGRFslIWjwkVy9IHCfaiK5FQrAX>
- Loayza Lozano, W. (2014). *Influencia de la frecuencia de remoción, durante la fermentación, en la calidad sensorial del cacao (Theobroma cacao, L.) de Satipo*. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/3877>
- Morales C., L. I. (2020). *Fermentación asistida de cacao (Theobroma cacao) y participación de Zamorano en la investigación e innovación de derivados de este cultivo: Revisión literaria*. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6909>
- NASA POWER | Data Access Viewer (DAV)*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

- Navarrete, P. (2021). *Diseño de un prototipo de fermentador para granos de cacao*.
https://www.researchgate.net/publication/356509262_Disenio_de_un_prototipo_de_fermentador_para_granos_de_cacao
- OSEPP. (n.d.). *DHT11 Humidity & Temperature Sensor*. Retrieved November 14, 2025, from <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf?srltid=AfmBOorIZgEpOcuKRI03dCq5xi0nBWtWCXiwGNajK36btMQHHb-FRbJ>
- Paulina Córdova Bohórquez, R., Nicasio Quevedo Guerrero, J., Miguel García Batista, R., Herrera Reyes, S., Bohórquez, C., & Guerrero, Q. (2019). Automatización de un sistema de fermentación de almendra de cacao (*Theobroma cacao* L.) para pequeños productores. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(2), 149–156.
<https://aes.ucf.edu/cu/index.php/aes/article/view/287>
- PH-4502C Sensor de PH Liquido con electrodo E201C-BNC*. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from https://uelectronics.com/producto/sensor-de-ph-liquido/?srltid=AfmBOopcuIQvEWRTdDVI3W0iawnpXrL2IH_S8SM9ovma237x6B9d0Q7f
- Rios-Jara, J., & Lévano-Rodríguez, D. (2022). Importancia de los dispositivos usados en la fermentación de Cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 2(1), e281–e281. <https://doi.org/10.51252/RAA.V2I1.281>
- Rodriguez Silva, L. G., Sánchez López, D. B., Espinosa Carvajal, M. R., & Coronado Silva, R. A. (2023). Caracterización microbiológica, sensorial y bromatológica de la fermentación de cacao en los genotipos CCN 51 E ICS 95. *FAVE Sección Ciencias Agrarias*, 22, e0016.
<https://doi.org/10.14409/FA.2023.22.E0016>
- Rosales-Valdívia, B. S., García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & García-Mora, C. (2024). Influencia de la fermentación del cacao y del uso de cultivos iniciadores sobre las características organolépticas del chocolate: un análisis integral. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 12(23), 31–43.
<https://doi.org/10.29057/ICBI.V12I23.12047>
- Sabando, K. D. C., Portilla, M. C. C., Jerez, J. G. B., & Revelo, D. A. B. (2024). Beneficios de la fermentación de cacao (*Theobroma cacao*) en la industria alimentaria. *Tierra Infinita*, 10(1), 131–142. <https://doi.org/10.32645/26028131.1310>
- Sagastume, J. (2007). *Efecto del uso de estabilizadores en el rendimiento y características físico-químicas y sensoriales del queso crema Zamorano*.
<https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/668>
- Saguidon, J. R., Delloso, J. T., & Mendoza, R. N. (2024). Internet-of- Things (IoT) - Based Automated Temperature Monitoring and Control System for Enhanced Cacao Fermentation

Quality. *Proceedings, International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering, ICECIE*. <https://doi.org/10.1109/ICECIE63774.2024.10815649>

SCD30 Sensirion | Mouser. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://www.mouser.com/ProductDetail/Sensirion/SCD30?qs=rrS6PyfT74fdywu4FxpYjQ%3D%3D&srsltid=AfmBOorekzQRLnyhEVBy2-ekW8gqEaizxh83x6zNd2ALzeqHPGACMDVQ>

Seijas, M. G. (2012). Efecto de la frecuencia de remoción y tiempo de fermentación en cajón cuadrado sobre la temperatura y el índice de fermentación del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Científica UDO Agrícola*, ISSN-e 1317-9152, Vol. 12, N°. 4, 2012, Págs. 914-918, 12(4), 914–918.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6104327&info=resumen&idioma=ENG>

Sensirion. (2020). *Sensirion SCD30 Sensor Module*.
https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf

Sensirion. (2021). *SCD4x*.
<https://download.mikroe.com/documents/datasheets/SCD41%20Datasheet.pdf>

Sensor de Temperatura Digital DS18B20. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/16-sensor-de-temperatura-digital-ds18b20.html>

Solarte Rangel, M. L. (2021). *Caracterización de algunos compuestos de interés en los procesos de fermentación y tostado de dos especies de cacao Amazónico*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79691>

SONDA Sensor de temperatura y humedad FS400 SHT30 150cm – Safetyprice Electronics. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from https://safetypriceelectronics.com/producto/sonda-sensor-de-temperatura-y-humedad-fs400-sht30-150cm/?srsltid=AfmBOooAA6k3J-WTF26POtnXi1fgRSXKVOPPTdy9m8j7bP2_s8xRP_B

Teneda Llerena, W. F. (2016). Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao. (*Theobroma cacao* L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51. *Mejoramiento Del Proceso de Fermentación Del Cacao. (Theobroma Cacao L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51*. <https://doi.org/10.56451/10334/3743>

ThingsBoard — Open-source IoT (Internet of Things) Platform. (n.d.). Retrieved November 14, 2025, from <https://thingsboard.io/>

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. (2016). *Intelligent Infrared CO2 Module (Model: MH-Z19B)*. https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf