

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE
MEZCLADO DE CAFÉ DURANTE LA FASE DE SECADO PARABÓLICO O
TIPO TÚNEL**



BRIAN STEVEN VALENCIA ULCHUR

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

POPAYÁN

2024

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE
MEZCLADO DE CAFÉ DURANTE LA FASE DE SECADO PARABÓLICO O
TIPO TÚNEL**

BRIAN STEVEN VALENCIA ULCHUR

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

Director: PhD (c), Mag. ANDRÉS FELIPE SOLIS PINO

Co-director: Mag. JHON ALEXANDER GUERRERO NARVÁEZ

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

POPAYÁN

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente de Jurado

Firma del Jurado

Firma de Jurado

Popayán-Cauca, 17 de diciembre de 2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi corazón a mis padres, Nidia Ulchur y Héctor Valencia, y a mi hermano Dylan, quienes han estado incondicionalmente a mi lado, brindándome su apoyo en cada etapa de mi vida. Mis padres, con su esfuerzo incansable, han sido mi guía e inspiración, inculcando cada día los valores del respeto, la responsabilidad, el trabajo, el estudio y, sobre todo, el de ser una buena persona. Sin ellos, nada de esto habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profunda gratitud a mi director y codirector de tesis, cuya guía, enseñanza, dedicación y compromiso han sido fundamentales en este proceso, permitiéndome alcanzar este importante logro. Quiero agradecer al Parque Tecnológico de Innovación del Café – TECNiCAFÉ y, especialmente, a su equipo de trabajo, cuyo conocimiento y experiencia fueron un apoyo invaluable durante el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron significativamente a este trabajo. Su ayuda incondicional, constante motivación, apoyo, generosidad y paciencia fueron fundamentales. Gracias especialmente a Juan, Pablo, César, Kevin, Jasmín, Mayita y muchos otros amigos y compañeros; todos ustedes representaron un pilar importante para mí.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	12
RESUMEN.....	13
1 CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	15
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	18
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.4 MARCO TEÓRICO.....	20
1.4.1 Conceptos relacionados con el café	20
1.4.1.1 Café.....	20
1.4.1.2 Café Arabica (Coffea Arabica).....	20
1.4.1.3 Coffea canephora (Robusta)	20
1.4.1.4 Mucílago.....	21
1.4.1.5 Pergamino del Café.....	21
1.4.1.6 Humedad del Café	21
1.4.1.7 Calidad del café.....	22
1.4.2 Etapas de la producción del café.....	22
1.4.2.1 Cosecha	22
1.4.2.2 Selección de grano.....	22

1.4.2.3	Despulpado y lavado	22
1.4.2.4	La fermentación del café	23
1.4.2.5	Secado	23
1.4.2.6	Almacenamiento del café	23
1.4.3	Conceptos relacionados al proceso de secado de café.....	23
1.4.3.1	Secado Solar.....	23
1.4.3.2	Secado Mecánico.....	24
1.4.3.3	Secador parabólico	24
1.4.3.4	Secador tipo túnel	24
1.5	ANTECEDENTES	25
1.6	METODOLOGÍA	28
1.6.1	FASE 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	28
1.6.2	FASE 2: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TEÓRICO	28
1.6.3	FASE 3: VALIDACIÓN DEL DISPOSITIVO PROPUESTO	29
1.6.4	FASE 4: INTRODUCCIÓN DE LAS CONCLUSIONES EN LA TEORÍA ²⁹	
1.6.5	FASE 5: DOCUMENTACIÓN	29
2	CAPÍTULO 2 - ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA LITERATURA.....	30
3	CAPÍTULO 3 - MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE MEZCLADO AUTOMÁTICO PARA EL CAFÉ DURANTE LA FASE DE SECADO.....	52
3.1	DISEÑO CAD/CAM/CAE Y SU IMPLEMENTACIÓN	52
3.1.1	Diseño asistido por ordenador del sistema propuesto	52
3.1.2	Fabricación asistida por ordenador del sistema propuesto.....	61
3.1.3	Ingeniería asistida por ordenador (CAE)	66

3.1.4	Construcción electrónica del sistema propuesto.....	70
3.1.5	Software de control para el proyecto propuesto	76
3.1.6	Implementación del sistema propuesto	79
4	CAPÍTULO 4 - VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO	86
4.1	DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE CONCEPTO	87
4.2	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO	89
4.3	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	97
5	CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES ...	102
	BIBLIOGRAFÍA.....	104
6	ANEXOS	110

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE EL DOMINIO SECADO DEL GRANO DE CAFÉ.	32
FIGURA 2. PUBLICACIONES EN EL DOMINIO DEL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ DESDE LOS AÑOS 60 HASTA LA ACTUALIDAD.	34
FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DE FUENTES DE REVISTAS Y CONFERENCIAS EN EL DOMINIO DE SECADO DEL GRANO DE CAFÉ	35
FIGURA 4. LÍNEA DE TIEMPO CRONOLÓGICA DE LA PRODUCCIÓN INVESTIGADORA DE LAS FUENTES MÁS RELEVANTES.	36
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES MÁS DESTACADOS EN DOMINIO Y SU NÚMERO DE PUBLICACIONES.	38
FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DE LOS PAÍSES MÁS DESTACADOS EN DOMINIO Y SU NÚMERO DE CITAS.	39
FIGURA 7. RELACIONES ENTRE PAÍSES EN EL BLOQUE IBEROAMERICANO Y DEMÁS INTERNACIONALES.	40
FIGURA 8. DOCUMENTOS SEGMENTADOS POR AUTORES ÚNICOS Y AUTORES DE MÚLTIPLES PAÍSES.	42
FIGURA 9. PRINCIPALES ENTIDADES PATROCINADORAS EN EL DOMINIO DEL SECADO DEL CAFÉ.	44
FIGURA 10. PALABRAS CLAVES PROPUESTAS POR AUTORES UTILIZADAS EN EL DOMINIO DEL SECADO DEL CAFÉ.	46
FIGURA 11. MAPA TEMÁTICO DEL DOMINIO DEL SECADO DEL CAFÉ.	48
FIGURA 12. COLLAGE DE BOCETOS A MANO ALZADA DEL DISPOSITIVO PROPUESTO. 53	
FIGURA 13. COLLAGE DE LA MARQUESINA.	54
FIGURA 14. MODELO 3D DEL SECADOR PARABÓLICO.	55
FIGURA 15. COLLAGE RASTRILLOS MEZCLADORES PARA EL SECADO SOLAR DEL CAFÉ PERGAMINO.	55

FIGURA 16.	PRIMERA VERSIÓN DE LAS ASPAS PARA EL SISTEMA DE MEZCLADO.	57
FIGURA 17.	PROPUESTA N°2 DEL ASPA.	58
FIGURA 18.	PROPUESTA N°3 DEL ASPA.	58
FIGURA 19.	PROPUESTA N°3 DEL ASPA.	59
FIGURA 20.	PROPUESTA N°1 DEL SOPORTE.	60
FIGURA 21.	PROPUESTA N°2 DEL SOPORTE.	60
FIGURA 22.	PROPUESTA N°3 DEL SOPORTE.	61
FIGURA 23.	MODELOS ASPA 3D EN CURA Y PARÁMETROS.	62
FIGURA 24.	MODELOS SOPORTES 3D EN CURA Y PARÁMETROS.	63
FIGURA 25.	FALLOS DE IMPRESIÓN.	64
FIGURA 26.	PROCESO DE IMPRESIÓN DE ASPAS Y SOPORTE.	64
FIGURA 27.	PROCESO DE ACABADO DE LAS PIEZAS.	65
FIGURA 28.	SISTEMA ENSAMBLADO EN SU TOTALIDAD.	66
FIGURA 29.	SIMULACIÓN DE TENSIÓN DEL ASPA.	67
FIGURA 30.	SIMULACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DEL ASPA.	68
FIGURA 31.	SIMULACIÓN DE DEFORMACIÓN DEL ASPA.	69
FIGURA 32.	CIRCUITO ELECTRÓNICO EN PROTEUS.	71
FIGURA 33.	TARJETA DESARROLLO ESP32 DRIVER CP2102 IOT WIFI BLUETOOTH ARDUINO.	71
FIGURA 34.	MOTORREDUCTOR 500 RPM 120W DE 110VAC CON CAJA REDUCTORA 5GN-3K.	72
FIGURA 35.	CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTOR 110VAC DE 60W.	73
FIGURA 36.	PULSADOR ELÉCTRICO – INICIO O PARO DEL SISTEMA.	74
FIGURA 37.	PILOTOS INDICADORES LED – INDICAN INICIO O PARO DEL SISTEMA.	74

FIGURA 38.	SWITCH DE CODILLO DE 3 PINES – SELECTOR DE MODOS DEL SISTEMA	75
FIGURA 39.	SENSOR FINAL DE CARRERA – LÍMITE DE MOVIMIENTO DEL SISTEMA.	75
FIGURA 40.	MODELO DE CONTROL DIAGRAMA GRAFCET DEL SISTEMA	.76
FIGURA 41.	SIMULACIÓN DEL CIRCUITO EN WOKWI.....	79
FIGURA 42.	MONTAJE DE RIELES.....	80
FIGURA 43.	MONTAJE ESTRUCTURA EJE CENTRAL.....	81
FIGURA 44.	SOPORTE PARA EJE QUE CONECTA AL MOTOR.....	81
FIGURA 45.	ESTRUCTURA BASE PARA EL MOTOR.....	82
FIGURA 46.	MONTAJE FINAL DEL PROTOTIPO.....	83
FIGURA 47.	CAJA DE CONTROL Y ESTRUCTURA DE MONTAJE.....	84
FIGURA 48.	MONTAJE FINAL DEL PROTOTIPO.....	85
FIGURA 49.	COLLAGE - MONTAJE DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEZCLADO PARA PRUEBAS.....	86
FIGURA 50.	MEDIDOR DE HUMEDAD KETT PM-450	88
FIGURA 51.	MUESTRAS DE CAFÉ PARA LAS PRUEBAS.....	89
FIGURA 52.	PROBLEMA EN LA MUESTRA TIPO HONEY.....	91
FIGURA 53.	EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE SECADO DEL GRANO DE CAFÉ, COMPARANDO LAS MUESTRAS TRATADAS CON EL PROTOTIPO DE MEZCLADO AUTOMÁTICO Y AQUELLAS PROCESADAS SIN SU USO.....	97
FIGURA 54.	NIVELES DE HUMEDAD DE LA MUESTRA SUAVE LAVADO O PERGAMINO EN LOS DOS MÉTODOS.....	98
FIGURA 55.	NIVELES DE HUMEDAD DE LA MUESTRA TIPO HONEY EN LOS DOS MÉTODOS.....	99
FIGURA 56.	NIVELES DE HUMEDAD DE LA MUESTRA CEREZA O NATURAL EN LOS DOS MÉTODOS.....	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. TABLA DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS, OPERACIONALES Y FUNCIONALES PARA EL PROCESO DE SECADO.	56
TABLA 2. ELEMENTOS REQUERIDOS PARA LA FUNCIONALIDAD DEL PROTOTIPO. 69	
TABLA 3. HUMEDADES DÍA 1 DE LAS MUESTRAS	90
TABLA 4. HUMEDADES DÍA 2 DE LAS MUESTRAS	90
TABLA 5. HUMEDADES DÍA 3 DE LAS MUESTRAS	91
TABLA 6. HUMEDADES DÍA 4 DE LAS MUESTRAS	92
TABLA 7. HUMEDADES DÍA 5 DE LAS MUESTRAS	92
TABLA 8. HUMEDADES DÍA 6 DE LAS MUESTRAS	93
TABLA 9. HUMEDADES DÍA 7 DE LAS MUESTRAS	93
TABLA 10. HUMEDADES DÍA 8 DE LAS MUESTRAS.....	94
TABLA 11. HUMEDADES DÍA 9 DE LAS MUESTRAS.....	94
TABLA 12. HUMEDADES DÍA 10 DE LAS MUESTRAS.....	95
TABLA 13. HUMEDADES DÍA 11 DE LAS MUESTRAS.....	96
TABLA 14. HUMEDADES DÍA 12 DE LAS MUESTRAS.....	96

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en desarrollar un sistema automatizado para el mezclado de café durante su secado en estructuras tipo parabólico o túnel. Para lograr un secado óptimo, es fundamental que la humedad se distribuya de manera uniforme en cada grano; sin embargo, el mezclado manual presenta desafíos que pueden afectar esta uniformidad, provocando variaciones indeseables en el sabor y apariencia del café. El objetivo principal de este prototipo es mejorar la uniformidad en el secado del café mediante un enfoque de diseño mecatrónico. Este método incluye una investigación previa sobre dispositivos existentes que apoyen este proceso y tecnologías que puedan implementarse en la creación y desarrollo del prototipo.

Actualmente, la falta de tecnificación en el secado del café ha resultado en una escasez de herramientas automatizadas, llevando a procesos no estandarizados y generando incertidumbre en la calidad del producto final. Con esta propuesta, se busca optimizar la calidad del secado, alcanzando un nivel de humedad final uniforme entre el 10.5% y el 11%. Para ello, el sistema automatizado controlará el mezclado del grano en un secador parabólico, contribuyendo así a una mejora en la consistencia y calidad del café producido.

Palabras claves: Sistema automatizado, mezclado de café, secado de café, secador parabólico, secador tipo túnel, uniformidad de humedad, calidad del café, diseño mecatrónico, tecnificación, humedad del grano, homogeneidad en el secado, proceso de secado.

ABSTRACT

This project focuses on developing an automated system for the mixing of coffee during drying in parabolic or tunnel type structures. In order to achieve optimal drying, it is essential that the moisture is distributed uniformly in each bean; however, manual blending presents challenges that can affect this uniformity, causing undesirable variations in the flavor and appearance of the coffee. The main objective of this prototype is to improve coffee drying uniformity through a mechatronic design approach. This method includes prior research on existing devices that support this process and technologies that can be implemented in the creation and development of the prototype.

Currently, the lack of technification in coffee drying has resulted in a shortage of automated tools, leading to non-standardized processes and generating uncertainty in the quality of the final product. This proposal seeks to optimize the quality of the drying process, achieving a uniform final humidity level between 10.5% and 11%. For this purpose, the automated system will control the mixing of the beans in a parabolic dryer, thus contributing to an improvement in the consistency and quality of the coffee produced.

Key words: Automated system, coffee blending, coffee drying, parabolic drying, tunnel drying, moisture uniformity, coffee quality, mechatronic design, technification, bean moisture, drying homogeneity, drying process.

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo automatizado para el secado de café, basado en la implementación de técnicas de secado parabólico y túnel, con el fin de optimizar la calidad y eficiencia del proceso en el Cauca. Se inicia con la identificación del problema, analizando los retos asociados a los métodos tradicionales de secado en la región. Posteriormente, se justifica la pertinencia del proyecto debido a la necesidad de aumentar la competitividad de los caficultores locales. A continuación, se definen los objetivos generales y específicos del trabajo, acompañados de un marco teórico que detalla los principios fundamentales del proceso de secado del café y revisa investigaciones previas. Por último, se describe la metodología en cinco fases, que van desde el diagnóstico inicial hasta la validación del prototipo en condiciones reales.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El café es un pilar fundamental de la economía en Colombia, apreciado por su sabor y aroma que los distingue en gran medida en el mundo, obteniendo así un renombre internacional [1]. La producción de café ha generado constantemente empleo en el territorio colombiano, sosteniendo a familias y comunidades de las zonas rurales, fomentando la tradición cafetera que ha perdurado hasta el día de hoy [2]. Colombia se ubica como el tercer productor más importante a nivel mundial, por características propias de su bebida, como puede ser la suavidad, textura y sabor [3], aunque existen una gran variedad de factores que pueden afectar la calidad del grano, como los cambios climáticos [4], las situaciones sociopolíticas [5] y la economía [6].

El Departamento del Cauca es una zona territorial cafetera de gran relevancia en el país, debido a sus paisajes montañosos y clima templado dan la posibilidad de tener buenas condiciones para la producción de cultivos de café de tipos especiales, los cuales tienen una alta demanda en el mercado internacional [7]. Las tierras caucanas poseen fincas cafeteras que representan una fuente de empleo a cientos de familias dedicadas al cultivo de café, forjándose como una tradición sujeta a una gran cantidad de generaciones [8], dando así más de 93.000 familias que dependen de la caficultura cafetera con diferentes variedades de café arábico [9]. Los cafetales en el departamento del Cauca se destacan por su alta calidad con una producción de café con perfiles de sabor distintivos y que en la bebida tiene notas dulces y de alta acidez, puntos muy apetecidos por los expertos [10].

El proceso de cultivo del café conlleva varias actividades que deben realizarse con sumo detalle. A grandes rasgos, el cultivo del cafeto inicia una vez sembrada la

planta, que tarda alrededor de 260 días en madurar, dependiendo de las condiciones ambientales y climáticas [11]. Luego se cosechan las cerezas maduras y sobremaduras, recolectando las que están en su punto óptimo de maduración. Después, se procede al despulpado para retirar la pulpa exterior y dejar solo el grano cubierto por una capa de mucílago, que se elimina mediante fermentación y lavado para obtener sabores distintivos. Finalmente, el grano se seca después de la fase de lavado [12]. Es precisamente esta fase una actividad fundamental en la calidad final del producto, debido a que el grano producido tiene alrededor de un 53% de agua y esto puede generar microorganismos que afectan la calidad del café, por lo tanto se somete a una fase de secado que hará reducir ese porcentaje hasta alcanzar valores entre 10% y el 12% [13], esto es importante que se realice de manera idónea y correcta para alcanzar una alta calidad para así preservar el aroma y el sabor característico del café [14].

Existen diferentes métodos para realizar el proceso de secado del café tanto mecánicos como naturales. Entre los más destacados se encuentran el “Secado Solar”, que consta de extender los granos de café en pisos de concreto o camas elevadas durante varios días a luz del sol [15], también está el “Secado en Camas Africanas”, aunque es poco común, ya que es una estructura con diferentes superficies hechas en malla, además de una alta exposición a la luz y una mejor circulación del aire [16], [17]; otra opción muy vista principalmente en grandes industrias cafeteras, es “Secado en Silo” ya que dentro de un cilindro se aplica aire caliente para realizar el proceso de secado mucho más rápido [18]. Asimismo, un sistema muy utilizado en las fincas cafeteras para el secado del grano de café es el “Secado Parabólico” y el “Secado Tipo Túnel” [19].

Puntualmente, la técnica del secado parabólico involucra una estructura que adopta la forma de una parábola, con un suelo construido en concreto o malla soportada por una estructura elaborada en guadua o madera. Además, se considera como alternativa el uso de un secador tipo túnel, atendiendo a las sugerencias de los usuarios de secadores parabólicos. La adaptación a un diseño tipo túnel se realiza principalmente para mejorar la operatividad y mantenimiento, reducir el tiempo de secado y disminuir el costo por metro cuadrado. Este tipo de estructura, conformada por una cubierta en forma de parábola y construida en guadua con malla plástica que proporciona un 40% de sombra, tiene la capacidad de secar hasta 270 kg de café lavado, con una altura de capa de 2 cm [13].

Los tipos de secado tipo túnel y parabólico tienen una serie de desventajas que afectan la producción del café, iniciando por el costo del equipo que pueden ser bastante elevados en comparación con otros métodos naturales de secado. Esto puede suponer un reto financiero para quienes se inician en el proceso. Asimismo, el equipo utilizado en el secado parabólico y de túnel requiere un mantenimiento regular para garantizar un rendimiento óptimo. También, existe un riesgo potencial de contaminación y pérdida de calidad del café si no se controla adecuadamente el proceso de secado, generando contaminantes ambientales como microorganismos

o suciedad que pueden afectar negativamente a la calidad final del producto. Finalmente, a pesar de ofrecer un mayor control sobre las condiciones de secado en comparación con el secado al sol, estos métodos siguen estando sujetos a condiciones climáticas adversas que pueden afectar a su eficacia, lo que supone un riesgo para la consistencia del proceso.

Reconociendo la importancia de la tecnología en los sistemas productivos agrícolas, especialmente en el café, hasta donde el autor sabe existe poca evidencia de herramientas o dispositivos que apoyen el proceso de secado con técnicas tipo parabólico o túnel de forma automatizada, lo que conlleva a una falta de tecnificación y homogenización durante el secado del café, resultando así en procesos no estandarizados y generando incertidumbre en la calidad del producto final [20].

Considerando las problemáticas mencionadas y teniendo como principal preocupación ayudar a tecnificar los procesos productivos del café en la fase de secado se propone la siguiente pregunta de investigación: **¿Cómo apoyar el proceso de secado del café producido en el Departamento del Cauca empleando un dispositivo automatizado que haga uso del secado parabólico y tipo túnel?**

1.2 JUSTIFICACIÓN

La realización de este anteproyecto se justifica por la necesidad de mejorar la calidad y uniformidad del café de exportación durante la etapa de secado. La automatización de este proceso asegura una mezcla uniforme de granos de café, lo que da como resultado un producto final de mayor calidad y mayor valor comercial, la implementación de este sistema ayudará a optimizar el proceso de secado, reducir costos y aumentar la eficiencia de la producción de café para exportación.

Las tecnologías que pueden culminar para el uso durante el proceso de secado del café, pueden ofrecer varias ventajas importantes, como mejorar la calidad del café al garantizar un secado uniforme y controlado, lo que da como resultado un producto final de mayor calidad y más consistente, también la implementación de nuevas tecnologías aumenta la eficiencia del proceso, reduciendo el tiempo necesario para secar el café y permitiendo una producción más rápida y consistente, esto aumenta la productividad y la rentabilidad de los productores.

El uso de tecnología como sistemas automatizados de secado y monitoreo facilita el desarrollo de soluciones más eficientes y precisas. Esto podría conducir a la creación de nuevas tecnologías específicas para el procesamiento del café y al desarrollo de sistemas más inteligentes y conectados que optimicen todo el proceso de producción. Además, la modernización podría abrir nuevas oportunidades para integrar nuevas, revolucionando potencialmente la forma en que se produce y gestiona el café en todo el mundo.

El impacto a nivel social de la modernización del proceso de secado del café podría tener varios aspectos positivos, por ejemplo, la mejora en la eficiencia y la calidad del producto final puede aumentar la competitividad de los productores en los mercados internacionales, lo que puede conducir a mayores ingresos para las comunidades productoras de café, además de reducir la dependencia del trabajo manual durante el proceso de secado, creando así un ambiente de trabajo más seguro reduciendo la carga para los trabajadores.

A nivel económico, la tecnificación del proceso de secado del café puede actuar en pro de mejorar la calidad y uniformidad del café, de esta manera este puede aumentar su valor en el mercado internacional, lo que podría resultar en mayores ingresos para los productores y para la economía local en general. Además de reducir costos, como los relacionados con la mano de obra y el consumo de energía, se pueden mejorar los márgenes de beneficio para los productores. También, al promover la adopción de tecnologías más eficientes y sostenibles, se puede mejorar la competitividad de los productores en el mercado global y ayudar a diversificar sus fuentes de ingresos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de dispositivo automatizado¹ de soporte al proceso de secado de café basado en las técnicas de secado parabólico y túnel empleando como caso de estudio el Parque Tecnológico de Innovación del Café - TECNICAFFÉ.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las diferentes estrategias de apoyo al proceso de secado de café mediante un análisis bibliométrico de la literatura.
- Implementar un dispositivo automatizado que ayude al proceso de secado de café a partir de las técnicas de secado parabólico y túnel.
- Validar la efectividad² del dispositivo propuesto a través de un caso de estudio utilizando métodos estándar de estimación de humedad del grano de café en comparación con la propuesta.

¹ **Automatizado:** Se refiere a la aplicación de tecnología y controladores para realizar el proceso de mezclado sin necesidad de intervención humana directa. Esto implica que el sistema es capaz de detectar y ajustar los parámetros de mezclado, como la velocidad y el tiempo, para apoyar el proceso de distribución uniforme de los granos de café durante el secado.

² **Efectividad:** En este proyecto, se define la efectividad como la capacidad demostrada por el prototipo para alcanzar de manera consistente y uniforme una humedad óptima del grano, situada entre el 10.5% y el 11%.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Conceptos relacionados con el café

1.4.1.1 Café

Es una de las bebidas que más consumo y popularidad tiene a nivel mundial, convirtiéndose en una parte fundamental para la cultura y la sociedad en gran parte del mundo. Para el proceso de producción del café se necesita de diferentes etapas, como la siembra, el cultivo de los granos, luego la cosecha de este, despulpado, lavado, secado, tueste y la preparación de la bebida final. Además de que la preparación puede ser muy diversa, para alcanzar una amplia variedad de aromas y sabores, de esta manera se busca una calidad mucho mayor. Colombia ha contribuido en la diversidad y calidad del café, obteniendo una reputación de clase mundial, por su calidad del grano y sus métodos de preparación, con sabores y aromas únicos y deseados por las personas [21].

1.4.1.2 Café Arabica (Coffea Arabica)

Conocido botánicamente como *Coffea arabica*, es una de las especies de café más populares y cultivadas del mundo. Originario de Etiopía, el café Arábica es apreciado por su sabor suave y aromático, que abarca desde aromas afrutados hasta florales, y su acidez equilibrada. Este tipo de café requiere condiciones especiales de cultivo, como gran altitud, clima templado y suelo rico en nutrientes [22].

1.4.1.3 Coffea canephora (Robusta)

Es otra especie de café muy popular, el cual es originario de África central y occidental, se cultiva ampliamente en estos lugares y en países como Brasil y Ecuador. El café robusta es variable debido a su polinización cruzada y resulta útil en los programas de mejora genética del *Coffea arabica* por su rusticidad, alta producción y resistencia a plagas y enfermedades. Su bebida es amarga y tiene un alto contenido en cafeína, y los árboles son vigorosos, con una copa amplia, hojas generalmente grandes y frutos pequeños [23].

1.4.1.4 Mucílago

Es una capa viscosa que recubre el grano de café, encontrándose entre la cáscara y la pulpa. Por los azúcares y compuestos que contiene esta especie de líquido gelatinoso, se pueden obtener diferentes sabores característicos que contribuyen al proceso de fermentación y secado del café [24]. En Colombia, se ha buscado darle un uso muy importante al manejo del mucílago y así evitar la contaminación que ciertos sectores generan con ello. Muchos utilizan el mucílago como abono orgánico para sus cultivos, ya que contiene un alto contenido en nutrientes. Algunos han ideado técnicas para reutilizar el agua empleada en el lavado del café, disminuyendo de esta manera el impacto ecológico de la producción cafetera [25]. Estas acciones evidencian la dedicación de los productores de café en Colombia hacia la sostenibilidad y la excelencia en la producción cafetera.

1.4.1.5 Pergamino del Café

Es una capa delgada y resistente que recubre el grano de café después de que se ha retirado el mucílago y se ha secado. Esta capa está compuesta principalmente por celulosa y protege al grano de café durante el proceso de almacenamiento y transporte. El pergamino también juega un papel importante en el desarrollo del sabor del café, ya que permite que los sabores y aromas se desarrollen de manera óptima durante el proceso de fermentación y secado [26]. El pergamino del café desempeña un papel fundamental en la producción de café de alta calidad en Colombia, siendo un componente clave en el proceso de postcosecha. Aunque comúnmente se elimina antes del tueste, en ciertas circunstancias se conserva en el grano para crear lo que se conoce como "café en pergamino", caracterizado por un sabor más suave y delicado. La calidad del pergamino del café colombiano es altamente apreciada en la industria cafetera internacional, contribuyendo de manera significativa a la reputación del país como productor de café de excelencia a nivel mundial [27].

1.4.1.6 Humedad del Café

La humedad del café es un parámetro crítico en su procesamiento y almacenamiento, dado que impacta directamente en la calidad y el sabor del producto final. Normalmente, el café verde se maneja y transporta con un contenido de humedad que oscila entre el 10% y el 12%, mientras que el café tostado suele presentar niveles de humedad considerablemente inferiores, en el rango del 3% al 5%. Un exceso de humedad en el café puede propiciar la proliferación de hongos y mohos, lo que afectaría negativamente a su calidad y a la seguridad alimentaria. Por otro lado, un contenido de humedad demasiado bajo puede resultar en la

pérdida de los perfiles sensoriales característicos del café. Por consiguiente, los productores de café en Colombia implementan diversas técnicas, como el secado al sol o el uso de secadores mecánicos, para controlar de manera precisa el contenido de humedad del café y así asegurar su calidad y frescura [15].

1.4.1.7 Calidad del café

La calidad del café se define por sus atributos sensoriales, físicos y químicos, como sabor, aroma, cuerpo y acidez, influenciados por factores como la variedad, origen, cultivo, cosecha, procesamiento y tostado. Los granos de café de alta calidad se caracterizan por tener un sabor complejo, equilibrado y distintivo, lo que los hace más apreciados en el mercado. En Colombia, la calidad del café es fundamental en su industria cafetera, ya que el país es reconocido por producir cafés de alta calidad, con un sabor suave y equilibrado, con notas afrutadas y florales, altamente valorados a nivel internacional [4].

1.4.2 Etapas de la producción del café

1.4.2.1 Cosecha

Consiste en recolectar los frutos maduros del cafeto, generalmente de forma manual, asegurando que solo se recolecten los frutos en óptimas condiciones de madurez para garantizar la calidad del café [28], [29].

1.4.2.2 Selección de grano

Después de la cosecha, se realiza una selección de los granos, descartando los defectuosos o inmaduros. Este proceso puede ser manual o utilizando maquinaria especializada [28], [29].

1.4.2.3 Despulpado y lavado

En esta etapa, se retira la pulpa del fruto para dejar solo el grano de café. Posteriormente, los granos se lavan para eliminar residuos de pulpa y mucílago [28], [29].

1.4.2.4 La fermentación del café

Es la etapa clave después del lavado, donde los granos se fermentan en agua durante 12 a 20 horas. Durante este proceso, las enzimas naturales descomponen el mucílago, influenciando en el sabor, la acidez y el cuerpo del café. La fermentación es crucial para desarrollar los sabores característicos del café [29].

1.4.2.5 Secado

Los granos lavados se secan para reducir su humedad a niveles óptimos para su almacenamiento y procesamiento posterior. El secado puede ser natural, al sol, o mediante secadores mecánicos [28], [29].

1.4.2.6 Almacenamiento del café

Los granos de café se almacenan temporalmente en silos o en áreas frescas y ventiladas para permitir que terminen de perder cualquier exceso de humedad antes de su empaquetado final. Este almacenamiento breve ayuda a estabilizar los granos y a mantener su calidad durante el proceso de comercialización [28], [29].

1.4.3 Conceptos relacionados al proceso de secado de café

1.4.3.1 Secado Solar

Se trata de un método de procesamiento tradicional en el cual los granos de café se exponen al sol en camas elevadas o patios de secado. Este proceso, que puede extenderse a lo largo de varias semanas, permite que los granos absorban los azúcares naturales presentes en la cereza, otorgando al café un sabor más dulce y afrutado. Además, el secado natural puede incidir en el cuerpo y la acidez del café, generando perfiles de sabor únicos y distintivos. En Colombia, el secado natural del café es una práctica común en algunas regiones, especialmente en aquellas donde las condiciones climáticas son favorables. Este método se emplea principalmente para producir cafés especiales con perfiles de sabor particulares y complejos. Aunque el secado natural puede ser más lento en comparación con otros métodos, muchos productores consideran que contribuye a la calidad y al carácter distintivo del café colombiano [13].

1.4.3.2 Secado Mecánico

Es un método de procesamiento que emplea maquinaria especializada para disminuir la humedad de los granos de café de manera rápida y precisa. Este proceso implica el uso de secadores mecánicos que distribuyen aire caliente a través de los granos, acelerando así el proceso de secado. El secado mecánico se aplica con frecuencia en regiones donde las condiciones climáticas no favorecen el secado natural, o cuando se necesita un secado más rápido y uniforme para asegurar la calidad del café. En Colombia, los secadores mecánicos permiten a los productores secar el café de manera más rápida y eficiente, reduciendo el riesgo de fermentación y deterioro. A pesar de que el secado mecánico implica una inversión inicial en equipamiento, muchos caficultores colombianos han adoptado esta técnica para mejorar la calidad y la eficiencia de su producción de café [13].

1.4.3.3 Secador parabólico

El secador parabólico de CENICAFÉ utiliza la energía solar para calentar el aire que se aplica a los granos de café, lo que acelera el proceso de secado. Gracias al diseño parabólico, puede concentrar la energía solar de forma más eficiente, lo que permite un secado más rápido y uniforme de los granos. El uso de esta tecnología reduce el tiempo de secado y mejora la calidad del café al evitar la fermentación y la contaminación durante el proceso. Los secadores parabólicos están contribuyendo de forma significativa a la industria del café al ofrecer una alternativa más eficaz y sostenible al secado convencional del café [19].

1.4.3.4 Secador tipo túnel

Este sistema utiliza un diseño similar al del secador parabólico, aprovechando la energía solar para calentar el aire. Sin embargo, en lugar de concentrar la energía solar en un punto focal, el secador tipo túnel distribuye el calor de manera uniforme a lo largo de un túnel que atraviesa la zona de secado. Esto permite un secado más homogéneo y controlado de los granos de café, mejorando la calidad y eficiencia del proceso. Además, al utilizar un túnel para el secado, se facilita la manipulación y el control del proceso, lo que puede resultar en una mayor capacidad de producción y una mejor calidad del café final. Como una alternativa a los secadores solares tipo parabólico utilizados en Colombia, se diseñaron este tipo de secadores solares tipo túnel, teniendo en cuenta sugerencias de los usuarios de los secadores parabólicos, principalmente para facilitar la operación y mantenimiento, disminuir el tiempo de secado y el costo por metro cuadrado [13].

1.5 ANTECEDENTES

Existen diferentes sistemas automatizados que apoyan el proceso de secado del de café mediante la técnica de secado parabólico, entre los más destacados se encuentran:

En la última década se han presentado una serie de sistemas importantes para el secado de granos de café, por ejemplo, el trabajo realizado por Acuña et al., [30], quien realizó un sistema automático de secado de granos de café accionado con energía solar. El cual consta de un secador de granos en busca de disminuir la humedad del grano de café mediante un sistema que se basa en la conversión de energía solar en energía eléctrica mediante paneles solares fotovoltaicos, que están conectados a un regulador solar para controlar la carga de las baterías. Tanto el calentador eléctrico como el ventilador centrífugo son alimentados por el inversor, mientras que el resto de componentes se alimentan directamente de las baterías. Posteriormente, los granos de café se disponen manualmente sobre una capa de secado, donde el aire, previamente calentado a 35°C por el calentador eléctrico, se dirige hacia ellos a través de una placa de acero inoxidable perforada. Para garantizar un secado uniforme, se utiliza un rastrillo accionado por un motor paso a paso que recorre toda la capa de granos. El diseño del secador de granos de café permite obtener 30 kg de café especial con mejor sabor y aroma, gracias a un proceso de secado controlado a menos de 35°C y agitación constante. El sistema de control supervisa y regula la temperatura, mientras que el mecanismo de agitación funciona continuamente para garantizar la calidad del producto.

Por otro lado Rosero et al., [31], en el proyecto de investigación “Desarrollo de un prototipo secador solar de café tipo parabólico semi automatizado para 50kg: finca Villa Carolina, Buesaco, Nariño”, describe el desarrollo de un prototipo de secador de café, destinado a beneficiar al sector cafetero de Buesaco, Nariño. Este prototipo, desarrollado siguiendo prácticas de ingeniería, ofrece un secado óptimo del café que reduce el tiempo de secado y aumenta la producción de café seco en el proceso de tostado. El diseño incluye un secador solar parabólico con lechos vibratorios para un secado uniforme, un sensor de temperatura para controlar el calor, un extractor para mantener la frescura del café durante el secado y paneles solares para la transformación de la energía solar en calor. Además, se han incorporado elementos calefactores y células fotovoltaicas para garantizar un funcionamiento estable y eficaz del secador. Este prototipo ha demostrado su eficacia en las pruebas realizadas con granos de café, consiguiendo un secado uniforme en 48 horas a una temperatura de 40 - 45 °C. Además de reducir costes y mejorar la calidad de vida del caficultor al reducir las tareas manuales, este diseño ofrece ventajas sobre los modelos tradicionales en términos de durabilidad y eficiencia.

Otros trabajos de suma importancia en el campo como “Diseño de un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora en el Ecuador” [32], el cual propone un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el secado, que garantice una deshidratación uniforme y reduzca las pérdidas económicas. Basado en controladores lógicos programables o como comúnmente se conoce, PLC (Programmable Logic Controller), y un rastrillo automatizado con tornillo sin fin, este sistema ofrece una solución adaptable y económicamente viable. La tecnificación de los procesos de producción de café en Ecuador es crucial para competir en los mercados internacionales y aumentar la capacidad de exportación. Muños y Ruales mencionan que este proyecto se basó en tres etapas: levantamiento de información, diseño y selección de equipos. Cada etapa permitió conocer las necesidades del usuario y adaptar la idea de la mejor manera posible para plasmar dichos requerimientos en la rutina de programación del sistema. El sistema propuesto ofrece al usuario una solución personalizable y viable desde un punto de vista económico y práctico. El sistema automatizado para el secado del grano de café se diseñó considerando la importancia de garantizar la uniformidad y homogeneidad requeridas para la calidad de un café de alta especialidad, reduciendo así los riesgos de incubación de hongos que podrían afectar la calidad sensorial del producto. Esta automatización asegura un proceso tecnificado que mejora la calidad del café y aumenta la capacidad de exportación hacia mercados internacionales.

Otro trabajo importante de mencionar es el desarrollo de un “Prototipo secado y volteo de cafés especiales aprovechando las energías renovables” [33]. En el Centro de Formación Agroindustrial del SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje) se ha desarrollado un sistema innovador que combina energía solar y biomasa. Este sistema incluye un secador con sistema de volteo diseñado estructuralmente, con análisis térmicos para validar su eficiencia. El objetivo de Polania y Benavides era implementar este prototipo en el beneficiadero del Centro de Formación Agroindustrial "La Angostura" del SENA Regional Huila, con la finalidad de optimizar los procesos de secado y volteo de cafés especiales utilizando energías renovables. Este sistema garantiza un secado homogéneo y controlado, reduciendo la intervención manual y mejorando la calidad del café obtenido. Además, el prototipo reduce las tareas manuales del operario, disminuyendo los costos en el proceso y mejorando la calidad de vida del caficultor al reducir las jornadas de volteo. Este sistema también mejora la calidad del producto final, reduciendo problemas como granos pelados, resquebrajados, contaminados con materiales extraños, germinados o con ataque microbiano.

De acuerdo con lo encontrado en los antecedentes, se puede indicar que existen estudios sobre la mezcla automática de granos de café durante el secado parabólico o secado en túnel, pero son escasos, por lo que este estudio intenta contribuir al

conocimiento en esta importante área de aplicación del proceso productivo del café mediante la implementación de un sistema automatizado para el proceso de mezclado del café durante la fase de secado parabólico o tipo túnel.

1.6 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto denominado “Prototipo de un sistema de mezclado automático para café tipo exportación durante la fase de secado” se utiliza una adecuación del método científico propuesto por Mario Bunge [34]. Para la construcción del prototipo se siguen las actividades de la metodología de diseño mecatrónico [35].

1.6.1 FASE 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para esta fase se utiliza la propuesta realizada por “Diseño de un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora en el Ecuador” [32], que propone un dispositivo para el movimiento automatizado del grano de café mediante un Controlador Lógico Programable (PLC) y un rastrillo en movimiento con ayuda de un tornillo sin fin. A continuación, se listan las principales actividades de esta fase.

- Reconocimiento de los hechos: Clasificación y selección de los hechos.
- Descubrimiento del problema: Hallazgo de un vacío o faltante. Estudio de los referentes teóricos del proyecto sobre secado del café y dispositivos que apoyen este proceso.
- Formulación del problema: Planteamiento de una pregunta, reducción del problema a su núcleo significativo002E

Producto esperado: Planteamiento del problema, pregunta problema y análisis bibliométrico.

1.6.2 FASE 2: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TEÓRICO

En esta fase se emplea la metodología de diseño mecatrónico [35], donde se expresan las directrices principales para desarrollar un producto con mejor sinergia en cualquier dominio de aplicación. Las actividades de esta fase se enumeran a continuación.

- Selección de los factores pertinentes: Estudio de los diferentes dispositivos que apoyen al secado del café.
- Identificación de estrategias: Seleccionar e identificar las diferentes tecnologías que pueden ser aplicados en el dominio del problema.

- Desarrollo del prototipo propuesto.

Producto: Reporte con la caracterización de los diferentes dispositivos que apoyan el proceso de secado del café y desarrollo del prototipo propuesto.

1.6.3 FASE 3: VALIDACIÓN DEL DISPOSITIVO PROPUESTO

En esta fase se implementan algunas directrices reportadas en la metodología general de validación [36], que guían el desarrollo de la prueba de concepto.

- Búsqueda de soportes: Deducción de consecuencias particulares que pueden haber sido verificadas en proyectos similares.
- Planteamiento de predicciones o resultados esperados al realizar el dispositivo propuesto.
- Diseño y planeación del caso de estudio: planteamiento de los objetivos, hipótesis y fuentes y medios para realizar el caso de estudio.
- Ejecución de la prueba de concepto: Validar el prototipo propuesto.

Producto: Reporte técnico con las consecuencias verificables, además, de las predicciones de resultados y reporte técnico del caso de estudio ejecutado.

1.6.4 FASE 4: INTRODUCCIÓN DE LAS CONCLUSIONES EN LA TEORÍA

- Confrontación de los resultados obtenidos con las predicciones.
- Reajustes al prototipo propuesto: Análisis de resultados y ajustes necesarios.

1.6.5 FASE 5: DOCUMENTACIÓN

- Escritura de artículos.
- Redacción del documento final de la tesis.

Producto: Documento final de trabajo de fin de grado y artículo científico.

CAPÍTULO 2 - ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA LITERATURA

Este estudio realiza un análisis bibliométrico en el campo del secado del café, utilizando métodos estadísticos descriptivos e inferenciales. El objetivo principal es evaluar el estado actual, identificar tendencias y destacar retos y oportunidades en la investigación sobre el secado del café. Con ello no sólo se pretende aumentar la visibilidad y fomentar la colaboración en este campo, sino también detectar lagunas y áreas que requieren mayor atención en futuras investigaciones [37].

El análisis bibliométrico se realizó de acuerdo con las directrices establecidas por Donthu en su trabajo sobre análisis estadístico de dominios específicos [38]. Además, se incorporaron elementos de la metodología Science Mapping Workflow, reconocida en el campo de la bibliometría [39]. En cuanto a las fuentes de datos, Scopus fue la principal base de datos utilizada para la recopilación de datos. Para el análisis bibliométrico, se utilizó la librería Bibliometrix [40] en el entorno de programación R [41]. Finalmente, las visualizaciones gráficas se elaboraron utilizando RStudio [42] y Google Sheets [43].

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para recopilar datos bibliográficos de forma sistemática, se utilizó una estrategia de búsqueda que se describe en la Tabla 1. La fase inicial consiste en la selección cuidadosa de dos términos, "coffee beans", con el fin de delimitar el alcance de la búsqueda. En la siguiente fase, se emplea el operador booleano de unión (OR) para ampliar la búsqueda, abarcando todos los documentos relacionados con el proceso de secado del grano de café y sus términos sinónimos.

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la base de datos científica "Scopus", reconocida por su indexación de documentos relevantes en el ámbito de la ingeniería [44]. Luego de aplicar la cadena de búsqueda en dicha plataforma, los datos fueron extraídos y consolidados mediante un algoritmo implementado en el lenguaje de programación R.

Table 1. Search string applied on Scopus.

("coffee beans") AND ("Drying" OR "Drying room" OR "Sun drying" OR "Mechanical drying" OR "Coffee dryer")

Ejecución de la búsqueda

Este análisis bibliométrico se fundamentó en una estrategia de búsqueda que priorizó los títulos, resúmenes y palabras clave de documentos académicos, todos ellos sometidos a un riguroso proceso de revisión por pares para asegurar su calidad y pertinencia en el ámbito de estudio. La búsqueda se llevó a cabo en la base de datos Scopus, reconocida y ampliamente aceptada en la comunidad científica. No se impuso ningún límite temporal específico en la búsqueda, la cual se ejecutó en mayo de 2024.

La búsqueda arrojó 289 documentos, publicados entre 1963 y 2024. Para evaluar su relevancia, se procedió a la selección de estos artículos mediante el examen de sus títulos y resúmenes. Se llevó a cabo una depuración para eliminar cualquier duplicado, resultando en un conjunto único de resultados en la base de datos. Además, se incorporaron estudios secundarios para facilitar la extracción de datos. Por último, estos documentos fueron importados a "Bibliometrix" para su análisis, con el objetivo de determinar el estado actual del campo de investigación.

Análisis y discusión

En esta sección se presentan en detalle los principales hallazgos derivados de la investigación y el análisis tanto descriptivo como inferencial centrado en el sector del secado del grano de café. Como se indicó anteriormente, el estudio hizo énfasis en aspectos como los autores más relevantes, los artículos más citados, las revistas más consultadas, la producción científica por países, la estructura conceptual del dominio y afiliaciones institucionales, así como las interrelaciones existentes dentro del campo. Esta estrategia permitió establecer un diagnóstico del estado actual del área de investigación y reconocer tendencias, desafíos y oportunidades para futuras investigaciones en el secado de café.

2.1 Información general del dominio

En esta sección, se presenta un análisis general de las publicaciones científicas relacionadas con el secado de granos de café (Figura 1). El análisis abarca un período de publicación desde 1963 hasta 2024 e involucra un total de 183 fuentes, incluyendo revistas académicas, documentos de conferencia y libros, entre otros, lo que constituye un conjunto de 289 documentos publicados durante este lapso de tiempo. Los datos detallan una tasa de crecimiento anual en publicaciones del 4,54%, lo que sugiere una tendencia moderada al alza de la producción investigadora en este campo a lo largo del tiempo. Además, la antigüedad media de estos documentos es de 7,76 años, lo que revela que la investigación es relativamente reciente y ha estado en un constante desarrollo.



Figura 1. Información general sobre el dominio secado del grano de Café.

El promedio de citas por documento publicado es de 14.06, indicando una alta tasa de referenciación por parte de la comunidad científica hacia las publicaciones realizadas en este campo. El total de referencias alcanza 8300, denotando una diversidad temática y un respaldo científico moderado en las publicaciones realizadas en el dominio. Entre los 289 documentos analizados, se identificaron 1775 keywords Plus [45] y 765 keywords propuestas por los autores. Además, se registró un total de 1040 autores, evidenciando redes de colaboración entre investigadores de diversos países alrededor del mundo.

En términos de colaboración, cada documento presenta en promedio 4,25 autores, destacando un índice de coautoría internacional del 17,99%, que indica una alta frecuencia de colaboración internacional en el dominio, lo que se traduce en una cooperación global estrecha entre la comunidad científica. A pesar de la predominancia la investigación conjunta, con una media de 4,25 coautores por documento, también se identifican algunas contribuciones independientes, como se evidencia en los 14 documentos de autoría única.

La producción investigadora en el dominio del secado del grano de café comprende un total de 289 documentos, distribuidos en diversas categorías, entre las que se

destacan 212 artículos, 1 libro, 15 capítulos de libros y un predominio de 61 documentos en congresos. La prevalencia de artículos encontrados indica que los autores buscan profundizar a través de un enfoque de publicación especializada y revisada por pares y sin una rápida difusión del conocimiento [46].

Según los hallazgos en el campo del secado del grano de café, se exhibe dinamismo y una evolución moderada, caracterizada por el establecimiento de redes de colaboración entre autores tanto a nivel nacional como internacional. Este entorno propicio para la colaboración ha facilitado un crecimiento exponencial en esta área en períodos de tiempo relativamente cortos.

2.2 Producción científica anual en el dominio

En lo que respecta a la producción científica anual en este campo (Figura 2), se observa un patrón de publicaciones continuas que abarcan casi 20 años, de 2005 a 2024. El número de documentos publicados ha experimentado un incremento progresivo a lo largo de estos años, con una aceleración notoria en los últimos períodos. Específicamente, el año con el mayor número de artículos publicados fue 2023, con 39 documentos, seguido de 2021 y 2019, con 32 y 26 respectivamente. Por otro lado, se identifican varios años con escasa o nula evidencia de publicaciones, siendo 1963, 1966, 1967, 1990, 1994, 1997 y 1998 los años con menor número de documentos, lo que sugiere un crecimiento gradual en este dominio durante la última década. Respecto a la distribución de los documentos por año, los datos revelan un patrón unimodal con sesgo positivo, alcanzando su punto máximo en 2023. Es relevante destacar que los datos correspondientes a 2024 no son representativos de todo el año.

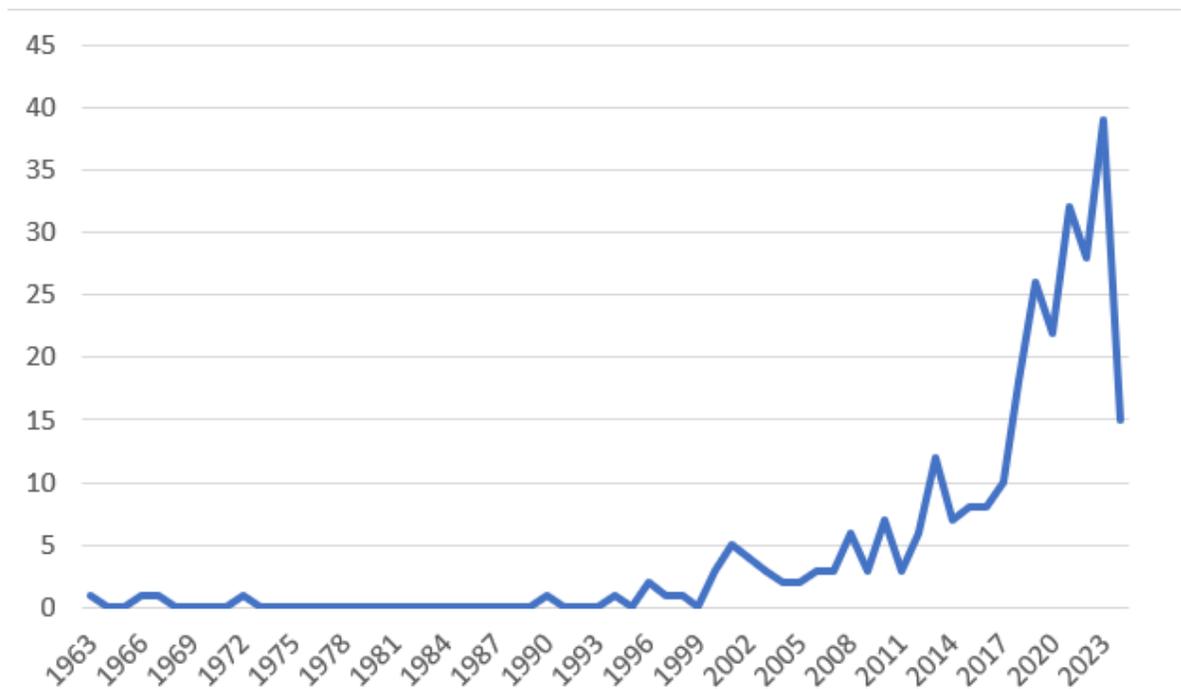


Figura 2. Publicaciones en el dominio del Secado del grano de Café desde los años 60 hasta la actualidad.

Teniendo en cuenta lo expuesto, se puede inferir que el incremento en las publicaciones científicas durante los últimos 20 años en este campo puede atribuirse a varios factores. Entre ellos se destacan un aumento en la disponibilidad de fondos de investigación en el dominio del café, así como el creciente reconocimiento de la importancia de este campo, lo cual ha generado una mayor conciencia sobre la necesidad de una interacción más efectiva, impulsando así el avance tecnológico en las últimas décadas [47]. Además, el aumento en el número de investigadores en el sector cafetero también puede haber contribuido significativamente a este aumento de publicaciones. Asimismo, se observa una diferencia significativa entre los períodos 1963-2004 y 2005-2024 en cuanto al promedio de artículos publicados por año. Mientras que en el primer lapso de años el promedio fue de 0,64 artículos por año, en el período posterior se elevó a 13,1 artículos por año. Este contraste subraya la naturaleza expansiva y el ritmo acelerado de evolución de este dominio. Por último, los datos también sugieren que es probable que el crecimiento en las publicaciones continúe en los próximos años, a medida que más investigadores del sector agrícola se interesen en este campo y se disponga de mayores fondos para la obtención de resultados más avanzados.

2.3 Fuentes relevantes en el dominio

El dominio del secado del grano de café exhibe una amplia diversidad en cuanto a las fuentes de publicaciones, tanto de revistas como de conferencias, como se ilustra en la Figura 3, que presenta alrededor de 183 fuentes relevantes en este campo, destacando las 10 más significativas. Es importante resaltar que la fuente con el mayor número de artículos publicados es "Coffee Science", con 14 artículos, superando por dos el número de artículos publicados por la segunda fuente más importante, "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science", que cuenta con 12 artículos. Ambas publicaciones representan una serie de artículos en el campo de la caficultura, donde se compilan los resultados de investigaciones presentadas en diversas conferencias, talleres y monografías de investigación.

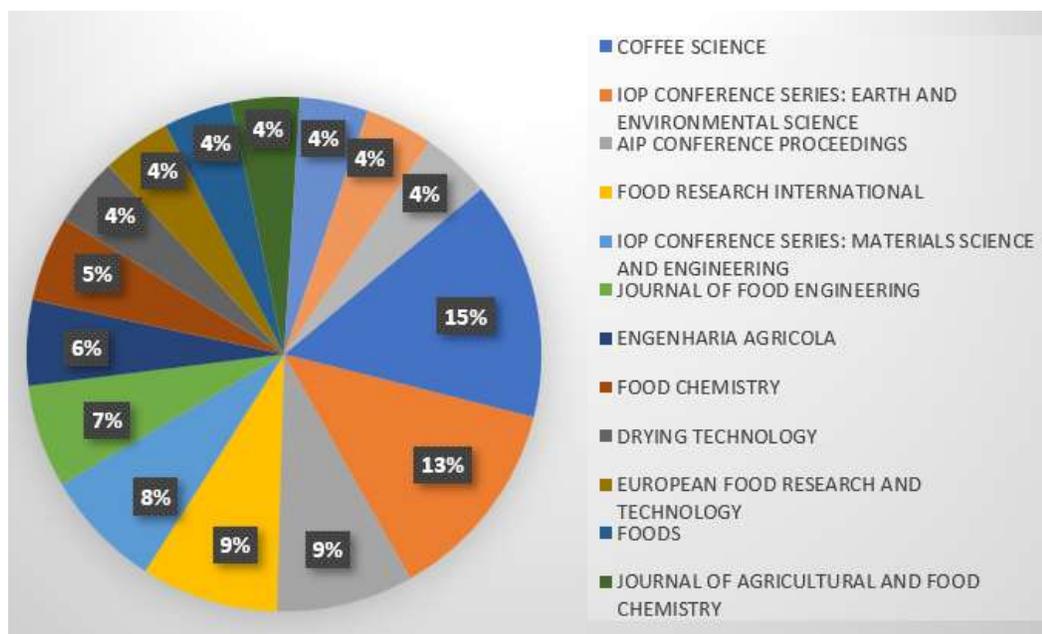


Figura 3. Distribución de fuentes de revistas y conferencias en el dominio de secado del grano de Café

Se observa que la principal fuente de artículos en este campo es la revista "Coffee Science", una publicación de acceso abierto especializada en café, dedicada a difundir investigaciones de alta calidad en todas las áreas científicas relacionadas con el café. Los estudios publicados en esta revista constituyen contribuciones significativas al avance de la ciencia del café, abarcando áreas como la agricultura, la biología, la ciencia de los alimentos centradas en el café. Lo anterior habla de la

importancia de este producto para la comunidad científica desde cualquier campo del conocimiento e indirectamente de su importancia en la industria [48].

La preponderancia de publicaciones en este dominio se centra en artículos presentados en series de libros y en ponencias de congresos, lo cual puede atribuirse a una comunidad de investigación académica robusta en este ámbito, que tiene un enfoque significativo en la investigación aplicada. Dado el continuo progreso en el campo del secado del café, es de suma importancia presentar los resultados de manera oportuna; la publicación en actas de congresos y series de libros emerge como una vía eficaz para difundir los nuevos descubrimientos, obteniendo retroalimentación inmediata y facilitando la interacción y el establecimiento de contactos con otros investigadores en estos eventos, lo que enriquece aún más el trabajo investigativo.

En consonancia con lo anterior, las diez principales fuentes que contienen más publicaciones representan aproximadamente el 22% del total de trabajos, lo que supone casi una cuarta parte del conjunto total de publicaciones. Es importante destacar que existe un gran número de fuentes que solo cuentan con una publicación, lo que refleja una baja productividad y representa el 49% del total de las publicaciones.

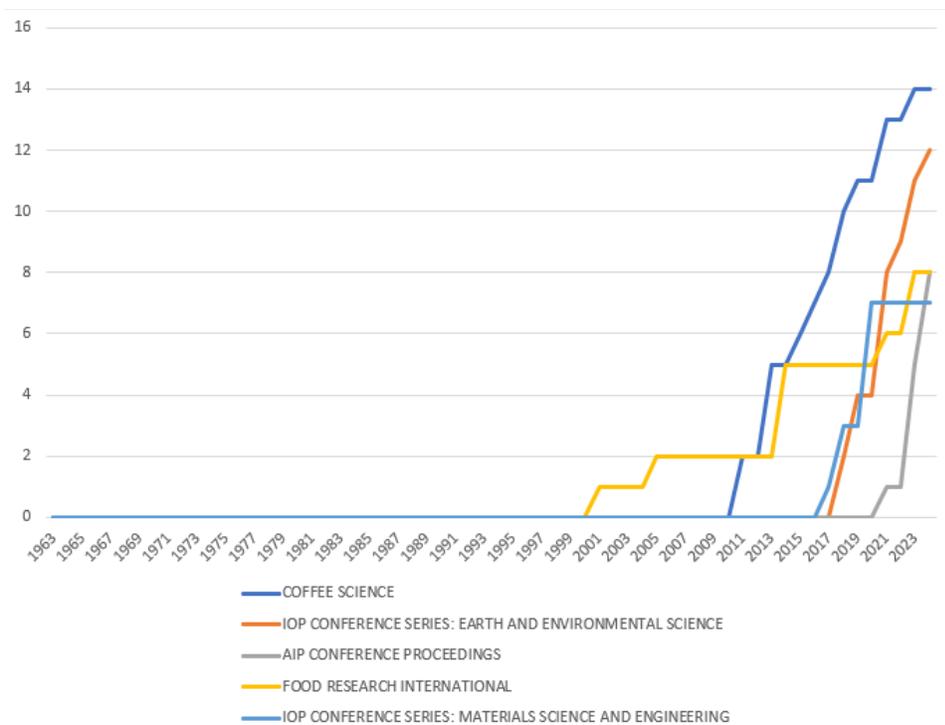


Figura 4. Línea de tiempo cronológica de la producción investigadora de las fuentes más relevantes.

La Figura 4 presenta la evolución del número de publicaciones en el dominio del secado del café desde el año 2000 hasta el 2024 en diversas revistas y congresos científicos. Se aprecia que, en los primeros años, el volumen de publicaciones era escaso, casi inexistente; sin embargo, a partir del año 2011 se observa un aumento notable en las publicaciones en diversas fuentes, destacándose especialmente la prominencia de COFFEE SCIENCE, que va ganando terreno progresivamente sobre las demás. En términos generales, se registra un crecimiento constante y sostenido en el número de publicaciones a lo largo de los años, lo que indica que el sector del Secado del Café está en continuo desarrollo y está captando cada vez más atención por parte de la comunidad científica.

2.4 Autores relevantes en el dominio

En esta sección se analizan los autores más destacados en el estudio del secado del café. En la Figura 5 se presentan los autores clasificados según el número de artículos publicados. Borém F.M. de Brasil encabeza la lista con 12 publicaciones, seguido de Ambarita, Dong e Isquierdo con 6 artículos. Hu, Jham, Napitupulu, Selmar, Siagian y Zhao han publicado respectivamente 5, 4, 4, 4, 4 y 4 artículos en este campo.

Cabe destacar que este análisis revela una mayor presencia de autores asiáticos con un número significativo de publicaciones en comparación con otros continentes. Aunque Brasil lidera en términos de número de publicaciones en este campo, la destacada participación de autores asiáticos indica un considerable interés de Asia en el ámbito del secado del café. Es pertinente señalar que la diversidad geográfica de los autores en este campo sugiere una amplia distribución de la investigación en todo el mundo, con especial énfasis en Brasil e Indonesia. Este hallazgo podría ser crucial para fomentar oportunidades de investigación en colaboración basadas en mediciones y datos obtenidos en diversas regiones del mundo.

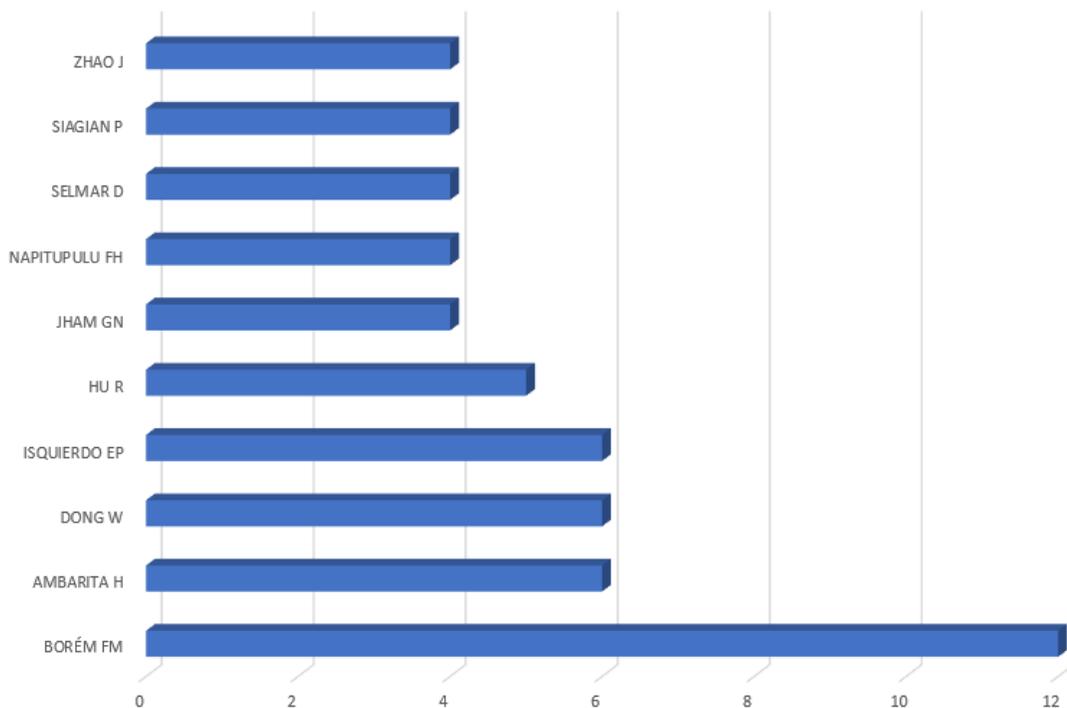
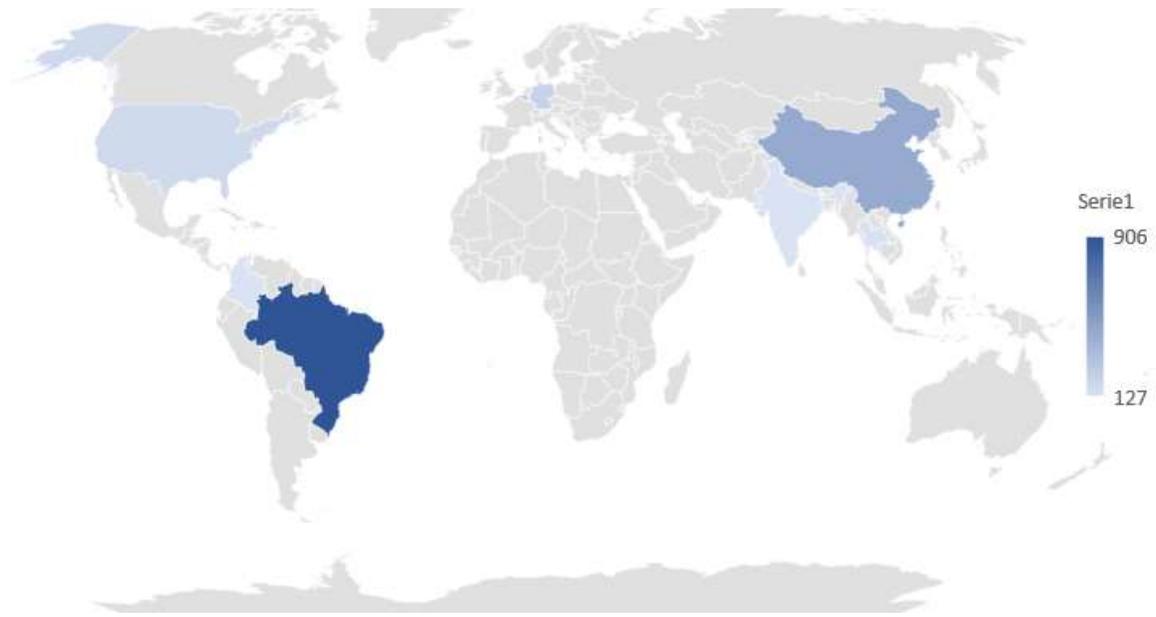


Figura 5. Distribución de los autores más destacados en dominio y su número de publicaciones.

En cuanto al análisis de la producción a lo largo del tiempo de los cinco autores más prolíficos, se observa que sus publicaciones abarcan desde 2008 hasta 2023. En 2018, todos estos autores realizaron una o más publicaciones, destacando este año como significativo en su producción (Figura 5). Destaca que Borém mantuvo un ciclo continuo de publicaciones desde 2008 hasta 2023, manteniendo vigente su trabajo en este campo de investigación. Por otro lado, Isquierdo tuvo un ciclo de publicación de 7 años, de 2011 a 2018, que no ha tenido continuidad hasta el momento en esta área de investigación. Además, se observa que la mayor producción de artículos en este dominio ha ocurrido en las últimas dos décadas, coincidiendo con los avances tecnológicos, lo que podría indicar un crecimiento significativo de la investigación en este campo. Es relevante mencionar que Borém alcanzó el mayor número de publicaciones en un solo año natural, con un total de 3 en 2018. Por último, Dong y Hu son los autores con más citas en 2019, con una media de 40,33 citas por artículo, lo que demuestra su notable influencia en la comunidad investigadora con solo 2 publicaciones cada uno ese año.

2.5 Países con mayor número de citas en el dominio

El análisis de las citas por países en el dominio del secado de granos de café (Figura 7) muestra que Brasil, China y Bélgica son los países líderes en esta área. Brasil es el líder destacado con 906 citas, seguido de China con 441 y Bélgica con 285. Después de los tres primeros países, la producción disminuye poco a poco, donde Colombia tiene un total de 128 citas, en comparación con Bélgica, por ejemplo. Es importante destacar que los tres primeros países (Brasil, China y Bélgica) suman un alrededor del 47,26% del total de todas las citas a nivel mundial, lo que habla de la importancia de la temática en el dominio para estas regiones geográficas. Por último, los demás países tienen una producción investigadora que se acerca a los dos primeros países, pero hay otros que tienen una producción muy baja, por ejemplo, Costa Rica y Honduras con un total de una cita cada uno, siendo los que menos citas sobre el campo tienen a nivel mundial.



Estos datos muestran marcadas diferencias en la contribución y el reconocimiento científico entre países, destacando la importancia de centros de investigación específicos en la evolución y el avance del conocimiento en esta área específica. Este análisis proporciona una visión detallada de cómo las diferentes naciones contribuyen al corpus académico mundial sobre el secado del café. La presencia de Estados Unidos, Suiza, Dinamarca, Tailandia, Colombia y la India, indica una diversidad geográfica en la investigación sobre el secado del café, lo que pone de

relieve la colaboración internacional y el intercambio de conocimientos. Finalmente este análisis no sólo revela diferencias en la producción científica entre países, sino que también ofrece una visión de las redes mundiales de investigación y de las tendencias emergentes en este campo vital para la economía y la sostenibilidad del café en todo el mundo.

2.6 Colaboración entre países - Mapa mundial

En el ámbito del secado del café (Figura 7), se observa la presencia de extensas redes de investigación que trascienden las fronteras de las Américas, evidenciando relaciones intercontinentales en los países involucrados. Desde 2021, el USDA-ARS (United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service) y WCR (World Coffee Research) [49] han colaborado activamente en la creación de un conjunto selecto de marcadores SNP (Polimorfismos de Nucleótido Único), diseñados para identificar las principales variedades cultivadas en más de trece países de América Central, Perú, Indonesia y África Oriental y Meridional. Este avance facilita una diferenciación más precisa entre las variedades robusta y arábica. Este caso ilustra los diversos esfuerzos de los investigadores por establecer redes de cooperación e investigación a nivel global en este campo específico.



Figura 7. Relaciones entre países en el bloque iberoamericano y demás internacionales.

Al analizar las relaciones intercontinentales, se observa una variedad significativa en las colaboraciones entre países, aunque la frecuencia de documentos compartidos entre estas naciones es baja. Por ejemplo, Brasil destaca como el país con más colaboraciones en investigación, siendo Bulgaria el país con el que ha compartido más documentos, un total de tres. Esto sugiere que es poco común que coincidan los temas de investigación con otros países de manera frecuente, resultando en la mayoría de las naciones colaborando solo una vez entre sí. Además, se infiere que las barreras lingüísticas no representan un obstáculo significativo para las relaciones internacionales, y que la proximidad geográfica puede facilitar estas conexiones. Por otro lado, Suiza, aunque solo ha colaborado con dos países, ha tenido una frecuente colaboración con Austria, sumando un total de tres documentos compartidos. Varias naciones también han colaborado en dos ocasiones, como Francia y Bélgica, Indonesia y Tailandia, y México y Francia, entre otros ejemplos.

Las colaboraciones entre países destacan aquellos que han participado en múltiples colaboraciones internacionales. Tailandia, por ejemplo, ha trabajado con siete países distintos, compartiendo un documento con cada uno de ellos. Le siguen el Reino Unido e India, ambos con cinco colaboraciones diferentes, cada uno también compartiendo un documento con cada país colaborador. Asimismo, Colombia, China e Indonesia han colaborado en cuatro ocasiones con diferentes países. Sin embargo, tanto Colombia como Indonesia han compartido dos documentos con dos de esos países colaboradores específicos.

El análisis revela que la producción de investigación en este ámbito está predominantemente concentrada en algunos países específicos, como Brasil y Bulgaria, así como Colombia y Estados Unidos, pero evidentemente sigue siendo escasa, por lo que una oportunidad de mejora en el dominio tiene que ver con establecer lazos de colaboración en la comunidad científica, para traer las ventajas que este tipo de relaciones conlleva. Además, evidencia patrones influenciados por redes de investigación y la cercanía geográfica entre los países colaboradores.

2.7 Relaciones entre países por autores

Ahora bien, centrándose en el análisis de la autoría de correspondencia de los documentos en el dominio del Secado del Café y sus relaciones, se pueden identificar dos categorías de publicaciones, las realizadas en un solo país (SCP) y las realizadas en colaboración con otros países (MCP). Las publicaciones de un solo país indican el número de documentos publicados por cada país dentro de sus fronteras, mientras que las publicaciones de varios países indican el número de artículos publicados por cada país en colaboración con otros países [50].

Entre los países más destacados en este dominio está Brasil, el cual se destaca por tener el mayor número de publicaciones individuales con un total de 42, y también lidera en publicaciones colaborativas con 6. Alemania y China son notables por tener exclusivamente publicaciones individuales, con 5 y 9 respectivamente. Colombia se posiciona como el tercer país con mayor volumen de publicaciones, destacando que el 84.62% de estas son de autoría única. Este análisis revela una clara tendencia global hacia la poca colaboración internacional en la investigación, aunque también muestra la existencia de países con poca o ninguna producción científica en este dominio.

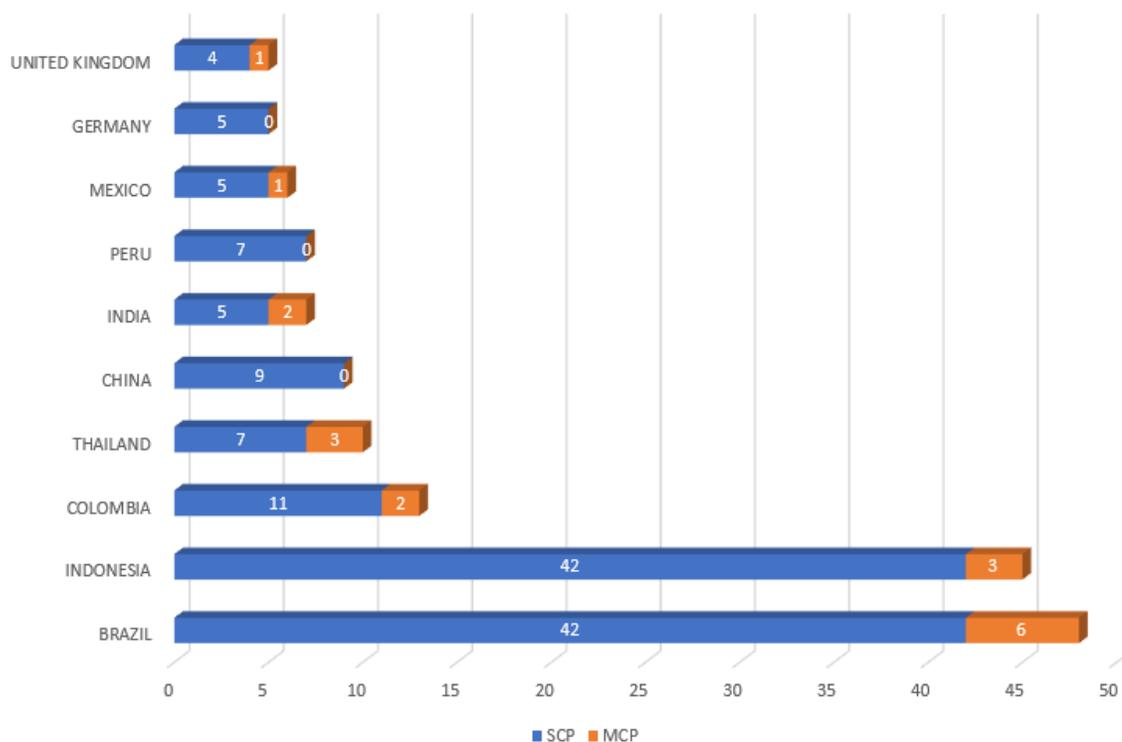


Figura 8. Documentos segmentados por autores únicos y autores de múltiples países.

Se puede indicar que las publicaciones con autores de múltiples países suelen ser significativamente más frecuentes que aquellas con autoría exclusivamente nacional. Este fenómeno subraya la importancia crucial de la colaboración internacional como un factor clave para avanzar en el fundamento científico y para potenciar tanto la calidad como la amplitud de la investigación [51]. Por lo tanto, este aspecto merece una atención renovada en este campo, con el objetivo de robustecer aún más este indicador.

Es relevante destacar que países con un volumen total más bajo de publicaciones, como India, México y Reino Unido, presentan un porcentaje notablemente mayor de publicaciones colaborativas entre varios países que de publicaciones individuales. Esta tendencia es consistente en todos los países analizados (Figura 7), lo cual indica que la colaboración científica mediante la coautoría multinacional es común tanto en países emergentes como en aquellos con una producción científica establecida.

La observación de que los países que lideran en publicaciones individuales también suelen destacar en publicaciones colaborativas entre varios países sugiere que aquellos con mayores recursos o con una comunidad científica más desarrollada participan de manera más activa en colaboraciones internacionales.

2.8 Principales fuentes financiadoras en el dominio del Secado del Café

La investigación sobre el secado del grano de café muestra que existe una diversidad de fuentes de financiación (Figura 9), indicando la participación de diversas organizaciones en el avance de este campo. En términos generales, la distribución de los patrocinadores revela un número significativo de universidades que respaldan numerosos estudios, destacando el alto interés de las instituciones académicas en esta área específica. El principal financiador identificado es el "Spice and Beverage Research Institute", con 29 artículos, seguido de cerca por la "Universitas Sumatera Utara", que ha apoyado 20 artículos. Los 16 principales patrocinadores, cada uno contribuyendo con 10 o más trabajos, representan conjuntamente el 23% del total de la producción, lo que significa casi una cuarta parte del conjunto, reflejando una red de apoyo concentrada, pero de considerable impacto.

Desde una perspectiva geográfica, se destacan Brasil, China e Indonesia como principales patrocinadores y puntos focales de este dominio, mientras en Colombia se muestra un total de 10 entidades financieras, todas ellas universidades como la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Valle y la Universidad de Caldas, entre otras. Esta diversidad de fuentes de financiación subraya el dominio de ciertos patrocinadores específicos, al mismo tiempo que resalta la variabilidad en la cantidad de trabajos a través del espectro, lo que enfatiza la naturaleza multidisciplinaria del apoyo dentro del dinámico campo de investigación sobre el secado del café.

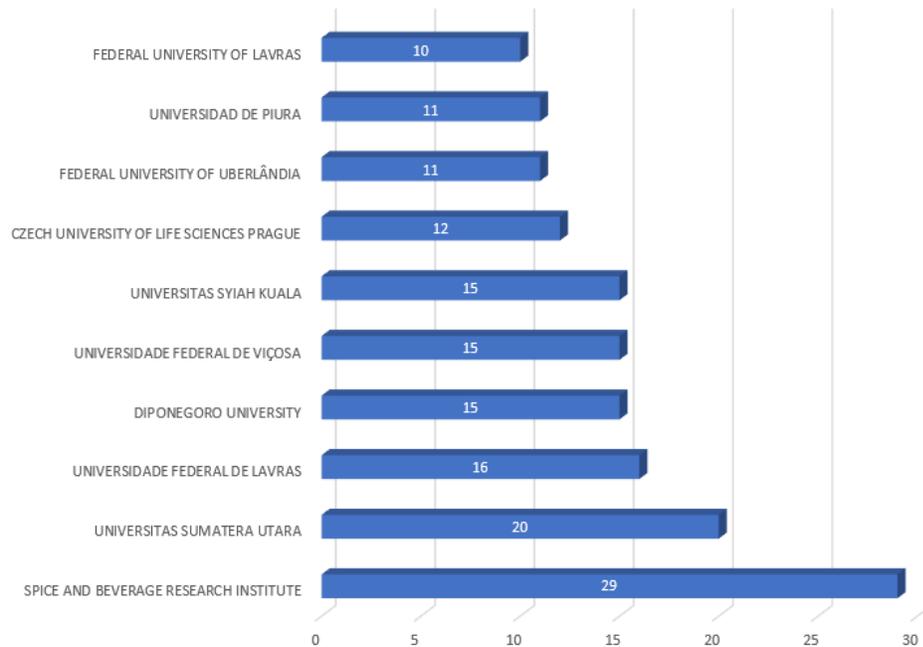


Figura 9. Principales entidades patrocinadoras en el dominio del Secado del Café.

En el secado del café, hay pautas claras en la distribución de la financiación y la colaboración en este campo especializado. El "Spice and Beverage Research Institute" de la China destaca como principal financiador, lo que refleja el compromiso estratégico del país con la investigación en este campo. Este instituto apoya 29 publicaciones, lo que le sitúa ligeramente por delante del segundo financiador. La "Universitas Sumatera Utara" de Indonesia le sigue de cerca con 20 trabajos, consolidándose como un actor clave en este ámbito. Por otro lado, la "Universidade Federal de Lavras" de Brasil destaca el papel prominente de América Latina en la financiación, con 16 trabajos patrocinados, según la literatura científica, esto demuestra el impacto significativo de la región [52]. Además de las instituciones académicas, se observa la participación de la industria alimentaria, como Nestlé, y entidades del sector agropecuario y productivo como "Agricultural Research Company Of Minas Gerais" Research Centre" y "Agricultural Research Company Of Minas Gerais". Aunque su contribución es menor en comparación, esto sugiere un potencial considerable para nuevas inversiones del sector privado, que podrían catalizar nuevos avances en el secado del café.

La distribución de los fondos revela que muchos patrocinadores apoyan un número limitado de trabajos, lo que sugiere la posibilidad de lograr un mayor impacto si se realizan mayor financiación y no se concentra en grupo selecto de comunidad científica. Además, la colaboración entre países latinoamericanos desempeña un papel crucial, poniendo de relieve la interconexión entre financiación e investigación en diversas instituciones académicas. La participación de entidades privadas

subraya aún más la importancia de la colaboración internacional y su influencia en la configuración de la investigación sobre el secado del café.

2.9 Estructura conceptual del dominio

La estructura conceptual de un dominio se define como el conjunto integral de conceptos, términos, relaciones y principios que delimitan y caracterizan un área específica de conocimiento [53]. Para observar la estructura conceptual, se utilizaron palabras clave extraídas de los documentos de los autores y palabras clave adicionales, utilizadas por las bases de datos para optimizar la indexación de los documentos en diversas categorías. Al examinar los documentos pertinentes y las palabras clave utilizadas por los autores (Figura 10), se observó que la palabra "coffee" aparecía 99 veces, mientras que "drying" se registraba 70 veces. Además, se identificaron otros términos clave relevantes en este dominio, como "granos de café", "coffea arabica", "drying process" y "moisture". Esta diversidad temática dentro del dominio subraya la amplitud de áreas interrelacionadas que conforman el estudio del secado del Café. Es notable cómo el proceso de secado juega un papel crucial en el procesamiento del café, ya que influye significativamente en la calidad final del producto obtenido [22]. Asimismo, términos clave como "chemistry" y "freeze drying" también tienen una importancia considerable en este campo, siendo objeto de numerosas investigaciones relacionadas con el secado del café [54].

En términos generales, las palabras clave se centran en el café y su proceso de secado. Por ejemplo, términos como "green", "coffee" y "beans" se agrupan como palabras clave relacionadas con el café, mientras que términos como "dryers (equipment)", "moisture determination" y "solar dryers" se clasifican como palabras clave del proceso de secado. Se trata de palabras significativas que los autores han identificado y propuesto en este ámbito específico.

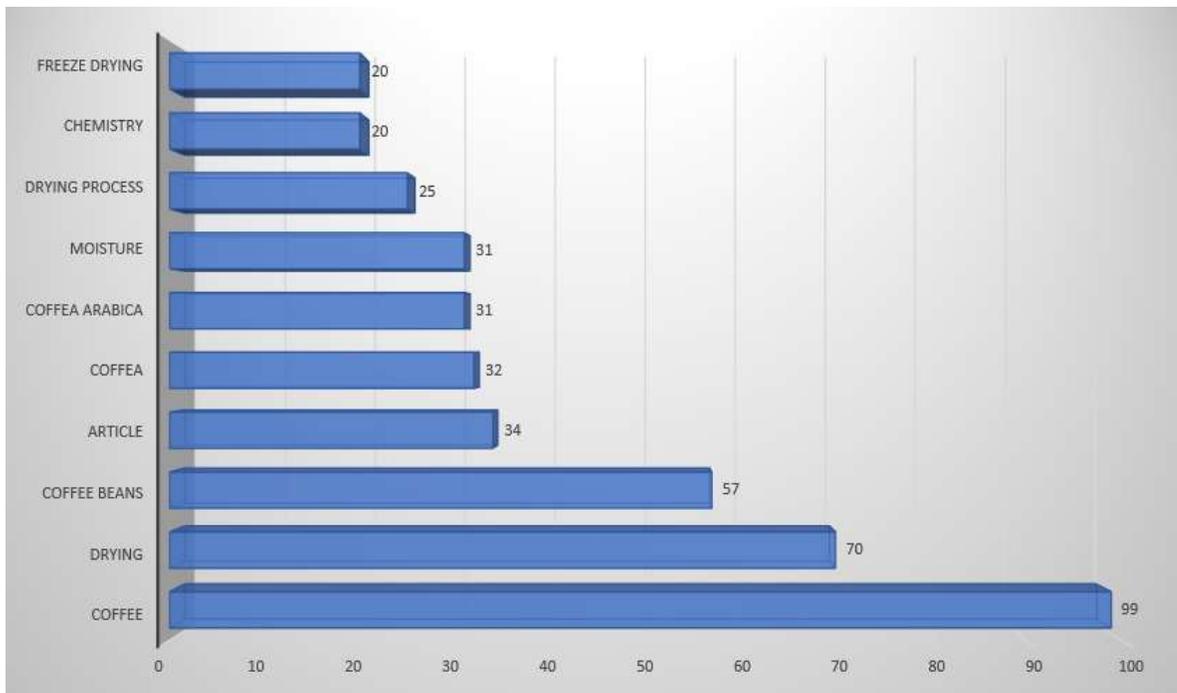


Figura 10. Palabras claves propuestas por autores utilizadas en el dominio del Secado del Café.

Al analizar la distribución de las palabras clave en el campo del secado del café, se observa que “coffee” destaca como el término más frecuente, lo que subraya su prominencia general en el campo, con un 12% de todas las palabras clave. Sin embargo, es notable que el término “drying”, que ocupa el segundo lugar con el 8% de todas las palabras, muestra una fuerte asociación con otros términos similares, lo que indica un enfoque significativo de los autores en el proceso de secado del café. Además, términos como “dryers” (secadores) y “solar dryers” (secadores solares) indican un panorama de investigación dinámico, con un enfoque exploratorio de estas tecnologías, con el objetivo de mejorar el control de calidad [9], [13]

La disminución de la frecuencia de términos como "drying air" (secado de aire) y "drying chambers" (cámaras de secado), refleja un cambio de los métodos tradicionales a un renovado interés por la búsqueda de nuevas tecnologías y la innovación en el diseño. Además, hay un interés creciente por el control de calidad, los estudios controlados y el secado por congelación, aspectos que revelan un carácter interdisciplinario manifestado en términos clave como "freeze drying" y "quality control", lo que indica un alcance más amplio que trasciende los límites de los procesos convencionales.

2.10 Mapa temático del dominio

Un mapa temático es una representación visual que refleja un área de estudio específica, ilustrando los principales temas derivados de un análisis de coocurrencia, permitiendo clasificarse en cuatro categorías distintas, a saber, temas motores, temas nicho, temas emergentes o en declive y temas básicos. Estas clasificaciones vienen determinadas por sus respectivas métricas de densidad y centralidad [55]. La Figura 11 presenta los términos de palabras clave pertinentes extraídos de las palabras clave de los autores dentro del dominio. El eje X representa la centralidad del conglomerado de la red, o el grado de interacción con otros conglomerados del gráfico, y mide la importancia de un tema de estudio. El eje Y representa la densidad, una métrica de la fuerza interna de una red de conglomerados y el crecimiento del tema [56].

En el dominio de la investigación sobre el Secado del Café, los temas básicos giran en torno a temas primordiales que encapsulan la esencia del campo. En su núcleo, “coffee” (café) sirve como tema frecuente, proporcionando el marco general sobre el que se construye todo el contexto de la investigación. Este concepto cumple un papel importante por su usabilidad, ya que es un tema con muchos campos de trabajos, da la opción de realizar y mejorar cada vez más las investigaciones. Igualmente, el posicionamiento de “food processing” (procesamiento de comidas) y “harvesting” (cosecha) como temas específicos más relevantes para el secado del café, donde los investigadores buscan llevar la interacción del procesamiento del café, investigando desde su etapa de cosecha, hasta tener el producto final, como se evidencia en investigaciones [10].

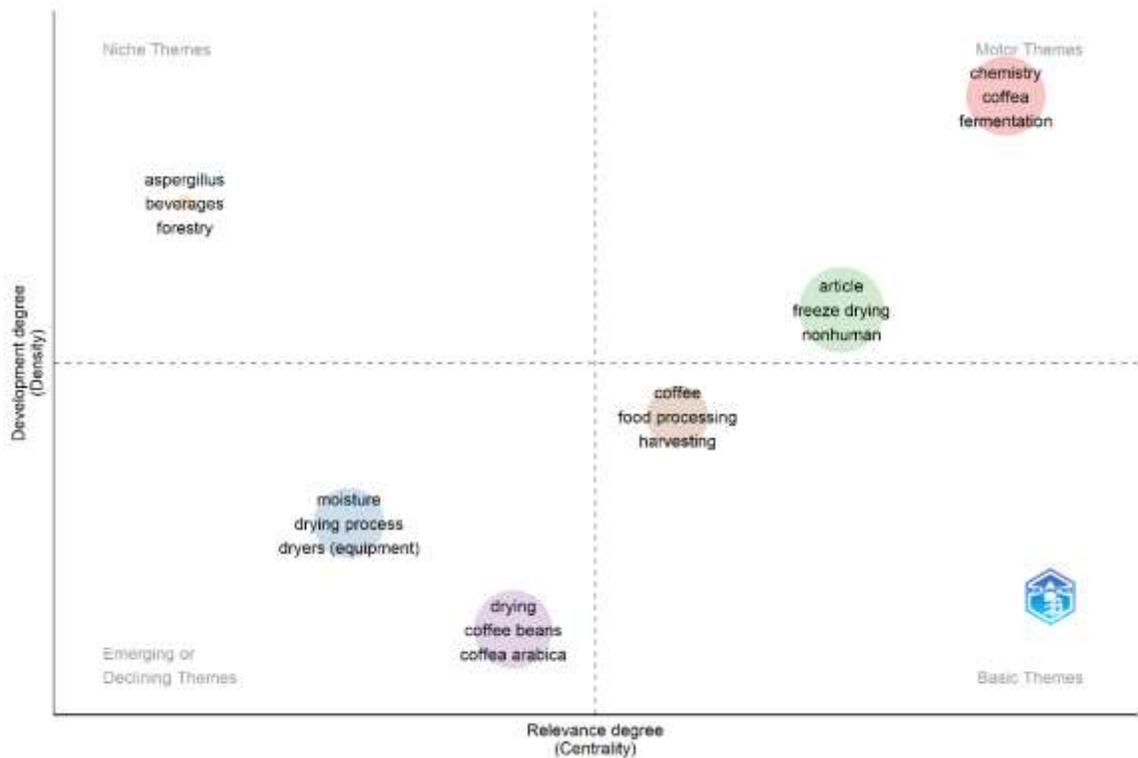


Figura 11. Mapa temático del dominio del Secado del Café.

En cuanto a los temas motores, la química destaca la importancia del estudio de las propiedades químicas del grano de café, lo que refleja el esfuerzo continuo de la comunidad científica por identificar métodos innovadores para optimizar el proceso de secado [57]. Esta atención al detalle químico subraya el compromiso con el desarrollo de alternativas tecnológicas que mejoren tanto la calidad del café como su viabilidad en términos económicos y culturales. Paralelamente, el estudio del café se establece como otro tema crucial, debido a su significativo impacto en la economía local y en las prácticas culturales de las regiones productoras. El secado de los granos de café, como elemento central de este dominio, no sólo determina la calidad final del producto, sino que también tiene implicaciones directas en las prácticas agrícolas regionales. La integración de innovaciones científicas en el secado del café contribuye a la mejora de la calidad del producto y, al mismo tiempo, fortalece la economía y las tradiciones culturales de las zonas productoras, lo que pone de relieve la necesidad de un enfoque multidisciplinar en la industria del café. Adicionalmente, la liofilización o el secado por congelación surge como un tema relevante, ya que esta técnica reduce la pérdida de compuestos aromáticos y de sabor, mejorando la consistencia del producto final y optimizando las prácticas agrícolas relacionadas [58]. Este enfoque refleja una tendencia hacia la incorporación de tecnologías avanzadas para resolver retos tradicionales en la producción de café, resaltando la importancia de la innovación técnica en el contexto de la ingeniería agrícola [9].

Los nichos temáticos surgen como focos de exploración especializada en el campo de la investigación del secado del café, cada uno de los cuales profundiza en aspectos específicos del tema. En particular, el estudio de *Aspergillus* se debe a que es uno de los principales hongos responsables de la producción de ocratoxina A (OA) en el café, especialmente en países de clima tropical. Por ello, en la última década ha cobrado gran relevancia la investigación dirigida a identificar las especies de *Aspergillus* que contaminan el café y son potenciales productoras de OA [59]. Las bebidas representan otro nicho temático, centrado en la investigación y el análisis de los granos de café en diferentes etapas de la producción y su correlación con las características sensoriales de la bebida final [60]. Por último, otro tema destacado es la silvicultura, que estudia estrategias para optimizar el uso de las plantas y contribuir así a la creación de sistemas de producción más sostenibles y beneficiosos para la tierra [61].

Discusión

El análisis bibliométrico ejecutado en esta investigación proporciona perspectivas sobre el panorama investigativo del Secado del Café durante los últimos 60 años. En este sentido, los resultados indican un rápido crecimiento de las publicaciones del dominio en los últimos 20 años, lo que puede indicar una correlación con los avances tecnológicos en el campo y su relevancia como un dominio investigativo que aborda necesidades sociales y en la agricultura tanto en América Latina como Europa y Asia. La diversidad conceptual que abarca elementos básicos del secado del café como el secado por congelación y la usabilidad de la química refleja la madurez interdisciplinaria del área [62]. En esta línea, la estructura conceptual del campo evoluciona con el tiempo, estudiando dominios emergentes como los granos de café, la humedad y el proceso de secado, sugiriendo que la investigación en este campo responde a las demandas y oportunidades de los agricultores, así como a los avances y estándares globales en el campo, tal cual se ha reportado en otros dominios [63].

Es relevante señalar que la investigación sobre el secado del grano de café y el análisis de citas en este campo destacan a Brasil y China como líderes en términos de financiación e impacto académico. Esto puede estar relacionado con la prosperidad económica y cafetera de estas regiones, lo que sugiere que la disponibilidad de recursos financieros y la infraestructura académica son factores que impulsan los avances en la investigación, como se documenta en la literatura [64]. Además de las instituciones académicas, también participan la industria alimentaria y el sector agrícola, lo que indica un potencial para nuevas inversiones privadas. La correlación entre la concentración de financiación y el elevado número de citas subraya la importancia de la colaboración internacional y el significativo impacto de la investigación en países como Brasil, que destaca en ambos aspectos. Aunque Bélgica no es uno de los principales financiadores, destaca en citas, lo que

indica una gran influencia de la investigación en este campo. Una amplia colaboración internacional facilita el intercambio de ideas, pero una red más sólida dentro de la región podría ayudar a generar más conocimientos contextuales.

En cuanto a la estructura del conocimiento en este dominio, se trata de una estructura conceptual rica y diversa, con términos clave que definen y describen esta área de estudio. Esta riqueza conceptual incluye términos como "química" y "lío-filización", lo que indica un enfoque interdisciplinario y exploratorio en este campo, buscando mejorar el control del proceso y garantizar un producto final de alta calidad. Las palabras clave más frecuentes son "café" y "secado", lo que pone de manifiesto su importancia en el ámbito y un giro hacia la mejora de la calidad y la adopción de nuevas tecnologías, consolidando la relevancia de este campo en la investigación mundial. Además, la participación de instituciones académicas y de la industria privada, como el "Spice and Beverage Research Institute" y "Nestlé", sugiere un potencial de nuevas inversiones que pueden transformar significativamente el sector del café. Para la comunidad cafetera, esto representa una oportunidad única de acceder a recursos financieros y tecnológicos avanzados que pueden mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de secado del café [65].

La principal contribución de este estudio es proporcionar una visión global de la situación actual y las tendencias en la investigación sobre el secado del café, identificando los actores clave, los problemas y los retos en este campo, y estableciendo una base académica de los patrones de productividad y las redes de colaboración en la región. Esto puede servir de plataforma para futuros esfuerzos de investigación en paradigmas de secado culturalmente informados y orientados a los usuarios del café.

Conclusiones Parciales

Este estudio realizó un análisis bibliométrico del secado del café a lo largo de seis décadas, utilizando herramientas como Bibliometrix y VOSviewer. Se analizaron 289 artículos, recopilando datos cuantitativos sobre las publicaciones desde 1963 hasta 2024, centrándose en los autores principales, los países de origen y la estructura del conocimiento en este campo. El análisis reveló que en los últimos 20 años ha habido un creciente interés de la comunidad cafetera por este tema, impulsado por los avances tecnológicos, lo que ha facilitado importantes avances en el secado del café. La tasa de crecimiento anual de las publicaciones es del 4,54%, lo que indica una moderada producción investigadora. Se identificaron redes de investigación establecidas entre varios países, destacando Brasil, China y Bélgica, que representan más del 40% de las citas, lo que sugiere que las sólidas infraestructuras académicas de estos países impulsan el aumento de la producción investigadora. El campo también muestra una amplia colaboración, tanto regional como internacional, lo que pone de relieve las conexiones intercontinentales y la

influencia de las organizaciones y redes mundiales. En cuanto a las publicaciones, existe una diversidad de fuentes, con predominio de los artículos, lo que refleja una cultura de intercambio de conocimientos y rápida difusión dentro de la comunidad investigadora.

Con respecto a las fuentes de financiación, un amplio abanico de organizaciones está impulsando los avances en el secado del café, con "Spice and Beverage Research Institute" y "Universitas Sumatera Utara" como principales patrocinadores. Se sugiere que un mayor apoyo del sector privado podría acelerar los avances tecnológicos en los procesos de producción de café. Los principales objetivos de estos estudios son investigar y mejorar la tecnificación del proceso de secado, garantizando así una mejor calidad del café al final de su producción.

Por otro lado, se observa que la estructura del conocimiento en este dominio presenta una notable riqueza conceptual, que va desde términos básicos como "café" y "secado", que son conceptos, relaciones y principios fundamentales que definen y describen esta área, hasta el uso de métodos menos convencionales como "liofilización". Esto indica que se trata de una disciplina madura y diversa, con una amplia gama de temas y aplicaciones que reflejan su naturaleza interdisciplinaria y su impacto productivo. Las palabras clave más recurrentes son "café", "secado", "granos de café", "química" y "liofilización", lo que pone de manifiesto la relación entre el café y el secado, junto con la adopción de métodos no tradicionales.

Finalmente, lo que se espera de esta investigación en un futuro es centrarse en la realización de estudios bibliométricos similares centrados en subáreas específicas dentro del secado del café, como la tecnificación del proceso, las bebidas y la silvicultura. De este modo se obtendría una comprensión más profunda de las tendencias y oportunidades de investigación dentro de estos nichos temáticos. En cuanto a la investigación primaria, caracterizar a los investigadores del secado del café para obtener una visión directa de los retos, motivaciones y perspectivas sobre el estado de la investigación en la región podría permitir el desarrollo de estrategias y recomendaciones para aumentar la actividad investigadora y la producción en este campo.

CAPÍTULO 3 - MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE MEZCLADO AUTOMÁTICO PARA EL CAFÉ DURANTE LA FASE DE SECADO

En este capítulo se presenta de manera metodológica todo el proceso necesario para entender y llevar a cabo la implementación de un prototipo de mezclador para el secado del café. Para ello, se siguen ciertas directrices de la metodología de diseño mecatrónico. El capítulo se organiza en dos secciones principales: diseño electrónico e implementación del diseño asistido por computadora, habitualmente conocido como CAD (por sus siglas en inglés computer-aided design), fabricación asistida por ordenador o diseño CAM (por sus siglas en inglés computer-aided manufacturing) e Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por sus siglas en inglés). En la primera sección, se desarrolla un modelo 3D virtual utilizando software como SolidWorks [66], con el objetivo de simular y facilitar su posterior implementación física de forma óptima y segura. La segunda sección se enfoca en el diseño electrónico, cubriendo todas las etapas necesarias para el desarrollo del sistema interno.

3.1 DISEÑO CAD/CAM/CAE Y SU IMPLEMENTACIÓN

La falta de tecnificación en el secado del café ha generado inconsistencias en la calidad del producto [67]. El desarrollo de un sistema automatizado para la mezcla durante el secado busca mejorar la uniformidad y calidad del grano, ofreciendo ventajas como secado controlado, mayor eficiencia y competitividad internacional. Con la implementación de un diseño CAD/CAM/CAE se busca optimizar el secado parabólico o túnel del café en el Departamento del Cauca.

3.1.1 Diseño asistido por ordenador del sistema propuesto

Se propone el uso de rastrillos móviles para rotar y mezclar los granos de café durante el secado, garantizando que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente sin dañar los granos. El diseño inicial comenzó con un boceto a mano alzada, inspirado en los rastrillos manuales utilizados habitualmente en la industria del café. Este boceto preliminar sirvió de base para el posterior desarrollo de modelos 3D mediante software de diseño asistido por ordenador (CAD) [68].

En la figura 12 se muestran los bocetos realizados a mano alzada, con ellos se logró obtener una idea preliminar del diseño de la solución propuesta, facilitando la visualización inicial de los componentes y funcionalidades clave del dispositivo automatizado. De esta manera se permitió identificar cómo en las técnicas de secado parabólico y tipo túnel podrían automatizarse de manera efectiva para abordar la problemática del secado de café, brindando una base sólida para el desarrollo posterior del prototipo. Así, se establecieron las primeras directrices sobre la disposición, estructura y mecanismos necesarios para optimizar el proceso de secado.

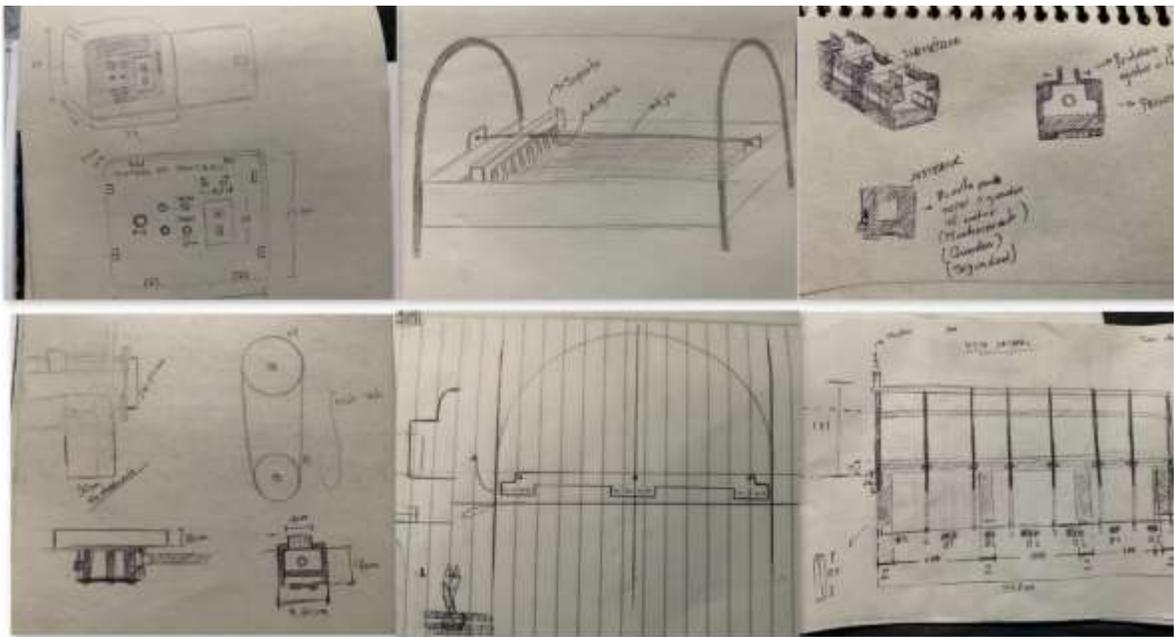


Figura 12. Collage de bocetos a mano alzada del dispositivo propuesto.

Fuente: Elaboración propia

En el modelado 3D del prototipo y de la estructura del secador parabólico, que se desarrollaron siguiendo la metodología de diseño mecatrónico, que integra las disciplinas de mecánica, electrónica y control, lo que permitió una planificación más detallada y precisa del prototipo. El uso del CAD permite simular y optimizar el diseño antes de su implementación física, garantizando un desarrollo más eficiente y seguro del mezclador automático.

En el desarrollo del secador parabólico, se inició por tomar las dimensiones precisas de la estructura física ubicada en las instalaciones de TECNICA FÉ, lo que permitió proceder a la fabricación de cada uno de los componentes que integran el sistema. Se trata de la estructura base de madera, los soportes que sostienen la base, los

arcos de PVC (policloruro de vinilo) y la cama de secado compuesta por una malla (Figura 13). Este enfoque metodológico garantiza que todos los elementos encajen correctamente en el diseño propuesto.



Figura 13. Collage de la Marquesina.

Fuente: Elaboración propia

El objetivo de este proceso es obtener un modelo exacto del secador parabólico, con dimensiones precisas y utilizando los mismos materiales (Figura 14). Esto permitirá realizar simulaciones de movimiento del sistema una vez se haya completado también su modelado, facilitando así la validación del diseño y su comportamiento en condiciones reales de funcionamiento.



Figura 14. Modelo 3D del Secador Parabólico.

Fuente: Elaboración propia

Ahora, un aspecto muy importante para un sistema de mezclado durante el secado, es la herramienta esencial que muchos caficultores tienen, un rastrillo con el cual se busca mover el café durante un secado solar (Figura 15), con la función de buscar un secado uniforme en todo el grano [69]. Por lo tanto, fue necesario realizar un rastrillo propio, con la capacidad de mezclar el café sin provocar algún daño a este.



Figura 15. Collage rastrillos mezcladores para el secado solar del café pergamino.

Fuente: Cenicafé e Innovakit [70].

Tabla 1. Tabla de requerimientos técnicos, operacionales y funcionales para el proceso de secado.

CATEGORÍA	REQUERIMIENTO	DESCRIPCIÓN
TÉCNICOS	Sistema de control automático	Utilización de un microcontrolador (como ESP32) para gestionar el movimiento del mezclador y controlar la frecuencia de mezclado.
	Fuente de alimentación	Sistema alimentado exclusivamente por una fuente de voltaje de 110 V, garantizando operación estable en entornos con suministro eléctrico estándar.
	Materiales de construcción	Uso de materiales de alta calidad, con apoyo de la impresión 3D, diseñados para resistir fricción, humedad y calor, asegurando la durabilidad del sistema.
OPERACIONALES	Ajuste de frecuencia de mezclado	Configuración variable para ajustar el tiempo y la intensidad del mezclado según las necesidades del proceso y las condiciones climáticas.
	Facilidad de mantenimiento	Diseño modular para permitir el reemplazo rápido de piezas y facilitar las inspecciones periódicas del equipo.
	Escalabilidad	Posibilidad de adaptar el sistema para manejar diferentes volúmenes de grano, ajustándose a las necesidades de pequeños y medianos productores.
FUNCIONALES	Movilidad uniforme	Asegurar que el mezclador distribuya el grano de manera homogénea para formar capas finas que favorezcan un secado uniforme.
	Protección contra sobreesfuerzo	Sistema de control para detectar y prevenir sobrecargas en el motor, prolongando su vida útil y evitando interrupciones en el proceso de secado.
	Operación autónoma	Sistema capaz de funcionar de manera autónoma durante periodos prolongados, reduciendo la intervención manual y garantizando un secado eficiente.

Para optimizar el rendimiento del rastrillo, se decidió desarrollar un diseño modular, permitiendo ajustar el número de aspas en función de las necesidades operativas, además de facilitar la sustitución individual de las aspas dañadas, lo que contribuye a reducir tanto los plazos de fabricación como los costes asociados a la sustitución completa del rastrillo. Partiendo de esta premisa, se procedió al diseño en 3D de las aspas, para lo que se modelaron tres versiones antes de llegar a una configuración final óptima.

El proceso comenzó con la propuesta de un diseño inicial basado en un modelo desarrollado previamente por Innovakit, una empresa conocida por crear herramientas para la comunidad cafetera [71]. Se generaron varias ideas para el diseño del aspa (Figura 16), que incluían un ángulo de torsión de 90° desde su eje superior y un espacio diseñado para integrar un eje, con la intención de garantizar un ajuste hermético entre varias aspas. Sin embargo, este diseño presentaba varias limitaciones, como unas dimensiones excesivamente grandes que implicaban un desperdicio de material durante la fabricación. Además, el eje de encaje presentaba errores, al carecer de pestañas que impidieran la rotación no deseada de las aspas durante el proceso de mezclado. Otro problema importante era el ángulo de giro, que, al ser demasiado bajo, permitía que pasara demasiado café entre las aspas, impidiendo una mezcla eficaz de los granos.



Figura 16. Primera versión de las aspas para el sistema de mezclado.

Fuente: Elaboración propia

En la segunda propuesta (Figura 17) se introdujeron mejoras significativas, reduciendo la altura del aspa para disminuir el consumo de material, se añadieron pestañas en el área de integración del eje para evitar el giro involuntario durante el mezclado, y se aumentó el ángulo de torsión a 120° desde el eje superior, lo que impide el paso excesivo de granos entre las aspas y asegura un mezclado más eficiente. Aunque este diseño presenta características favorables, existe una limitación importante: al unir todas las aspas planeadas para el prototipo, se

requerirá un eje central para su ensamblaje, lo que incrementaría el peso total y, en consecuencia, el esfuerzo necesario para el movimiento del sistema, aumentando el riesgo de fallos mecánicos.



Figura 17. Propuesta N°2 del aspa.

Fuente: Elaboración propia

En la tercera propuesta (Figura 18), se realizó un par de cambios, uno es la eliminación del espacio del eje para evitar el incremento del peso mencionado anteriormente y añadir un eje que pueda encajar perfectamente con otra aspa, de esta manera la unión entre ellas será fuerte y también no existiría el giro involuntario que habría durante el movimiento del mezclador y el segundo cambio fue hacer un poco más delgada la parte superior de la pieza y reducir un poco más el uso de material en el futuro.



Figura 18. Propuesta N°3 del aspa.

Fuente: Elaboración propia

A pesar de que la tercera propuesta tiene características óptimas y eficaces para el prototipo, se decidió hacer un pequeño cambio en el eje de encaje, el cual fue ponerlo en una posición centrada del costado de la parte superior y aumentar un poco su longitud, la cual entrará aún más en otra aspa y asegurar aún más el encaje entre estas. (Figura 19)

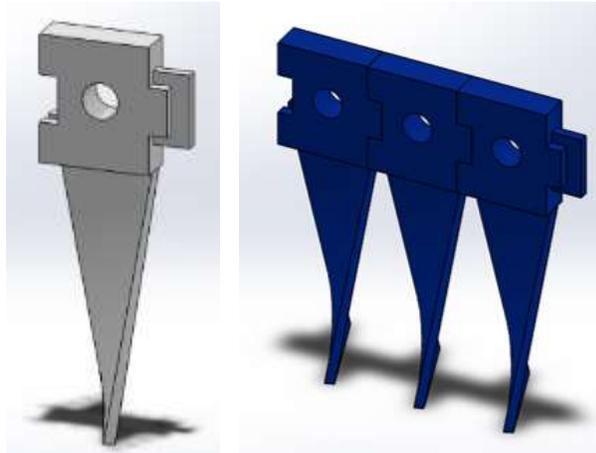


Figura 19. Propuesta N°3 del aspa.

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño del soporte que albergará las aspas del prototipo, se desarrollaron varias propuestas que fueron ajustándose conforme evolucionaron los modelos de las aspas, dado que estos cambios impactaban en las dimensiones y los ajustes necesarios. En el diseño inicial del soporte (Figura 20), se contemplaba que el movimiento del soporte se lograra mediante la implementación de un motor en cada extremo del soporte. El diseño del soporte está compuesto por tres secciones que permiten fijar las aspas mediante tornillos, tanto en los extremos como en la parte central, asegurando su estabilidad durante el funcionamiento del sistema. El modelo tiene enfoque modular que no solo facilita el ensamblaje y el mantenimiento, sino que también ofrece flexibilidad para futuras mejoras en el diseño del prototipo, permitiendo la adaptación a diferentes escenarios operativos.

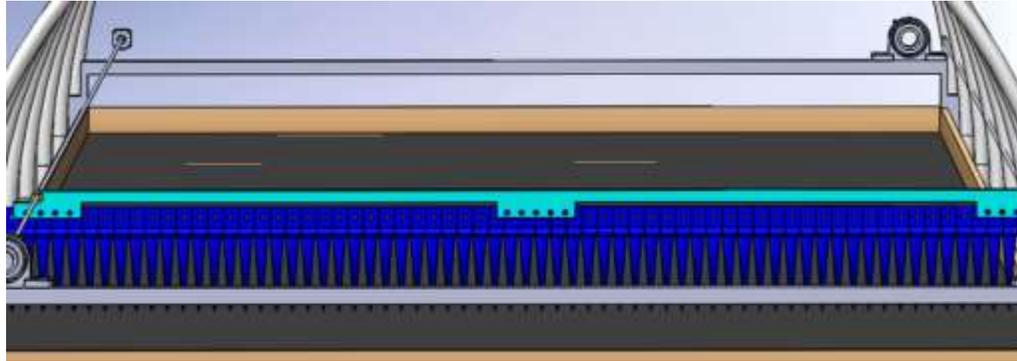


Figura 20. Propuesta N°1 del soporte.

Fuente: Elaboración propia

Se presentó un segundo diseño con un importante ajuste centrado en la reducción de costes y la mejora de la eficacia operativa. En esta propuesta, el movimiento del soporte se gestiona mediante un eje central, eliminando la necesidad de motores en ambos extremos, lo que simplifica la arquitectura del sistema y reduce el consumo de energía. Además, se incluyó una guía en los extremos del soporte para mejorar la estabilidad estructural, reduciendo así el riesgo de fallos mecánicos y minimizando las fracturas en los componentes durante el funcionamiento. Esta guía también funciona como un elemento adicional para equilibrar las cargas y disipar las vibraciones generadas durante el funcionamiento, ampliando así la durabilidad del sistema. Esta actualización no sólo reduce los costes y mejora la fiabilidad, sino que también facilita un mantenimiento más eficaz y accesible, lo que resulta crucial para su uso en entornos de producción a gran escala. (Figura 21)



Figura 21. Propuesta N°2 del soporte.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a las limitaciones observadas con las guías laterales en el diseño anterior, como la deformación potencial en la mitad de la guía causada por la longitud y el peso del material, se identificó que este problema podría aumentar el roce del

sistema con la cama del secadero durante el movimiento. Como consecuencia, esto generaría un desgaste prematuro de las piezas y un esfuerzo mecánico excesivo para el motor, comprometiendo su durabilidad y eficiencia. Por lo tanto, en el tercer diseño del soporte (Figura 22), se decidió reemplazar las guías cilíndricas por guías de riel, lo que llevó a modificar también los laterales del soporte. Esta nueva configuración permite la adición de llantas que se ajustan a los rieles, proporcionando un movimiento más suave y preciso, reduciendo el daño a las piezas y disminuyendo la carga mecánica sobre el motor, lo que garantiza un funcionamiento más eficiente y una mayor vida útil del sistema.

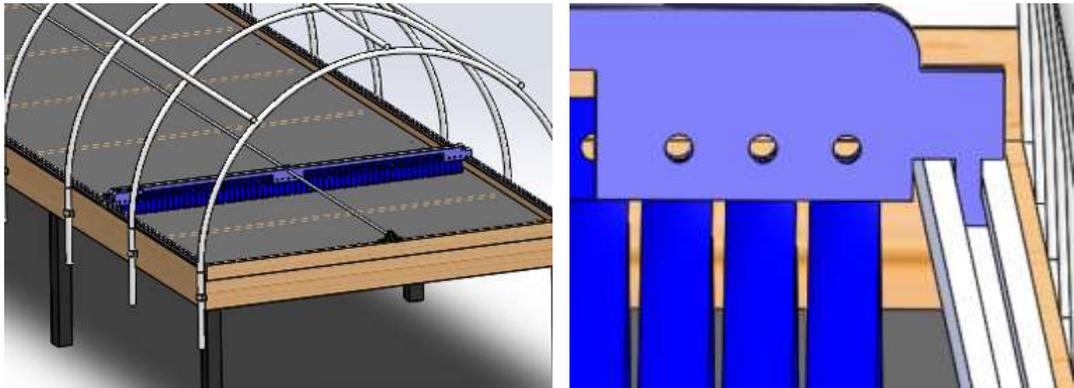


Figura 22. Propuesta N°3 del soporte.

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Fabricación asistida por ordenador del sistema propuesto

El sistema se desarrolló aplicando el diseño de fabricación asistida por ordenador (CAM) [68], siguiendo una metodología bien estructurada. Se llevaron a cabo investigaciones detalladas para determinar los requisitos específicos del sistema en el proceso de secado del café, evaluando también las posibilidades que ofrecía la impresión 3D para la fabricación de componentes clave. Para el prototipo se eligió el material ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) debido a su alta resistencia a los impactos y su capacidad para soportar variaciones de temperatura. Para la fabricación de las piezas se utilizaron dos impresoras Ender 3 V2 y 4 impresoras Ender 5 Plus, seleccionadas por su precisión y fiabilidad en la producción de piezas con geometrías complejas, asegurando que los componentes impresos mantuvieran las especificaciones requeridas y ofrecieran un rendimiento óptimo en el entorno de trabajo. Posteriormente, se imprimieron las piezas necesarias, se ensamblaron y se realizaron pruebas exhaustivas para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Este enfoque permitió optimizar tanto el diseño como

la fabricación del mezclador automático, garantizando un funcionamiento fiable y eficiente.

Con los modelos 3D finalizados, el siguiente paso consistió en utilizar el software Cura, una herramienta de corte que prepara los archivos para la impresión 3D. El objetivo consistió en ajustar los parámetros de impresión de manera óptima para garantizar que las piezas tuvieran la resistencia necesaria para el sistema. A pesar de que el material seleccionado presentaba ciertas limitaciones durante el proceso de impresión, lo que generó algunos desafíos, se logró obtener las piezas impresas según las especificaciones requeridas sin comprometer la calidad o funcionalidad del diseño.

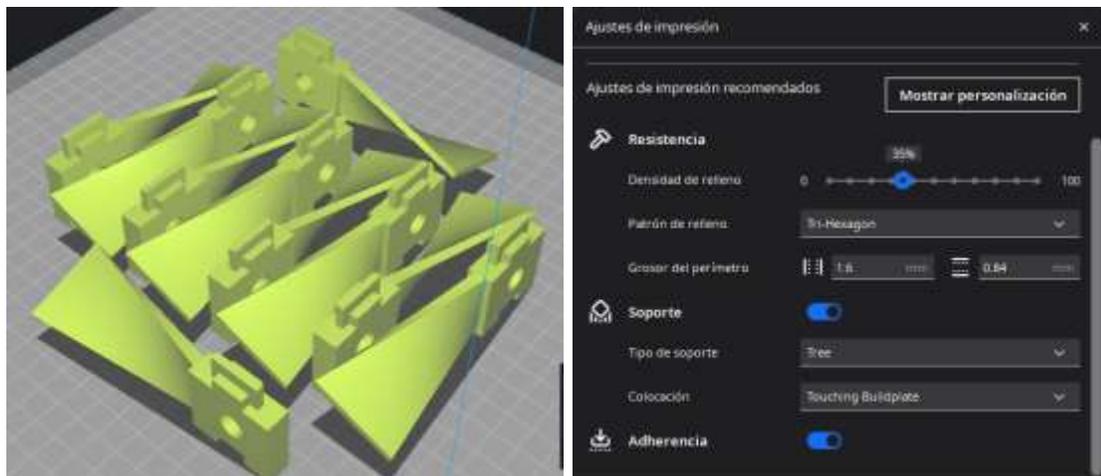


Figura 23. Modelos Aspa 3D en Cura y parámetros.

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, se procedió a detallar los parámetros utilizados en el software CURA para la impresión de las piezas de los soportes de las aspas (Figura 24).

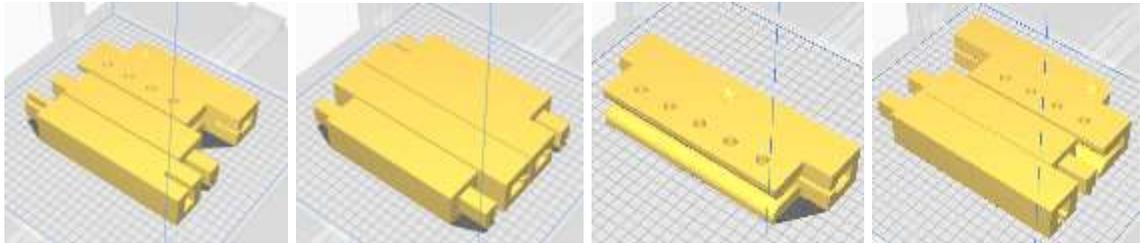
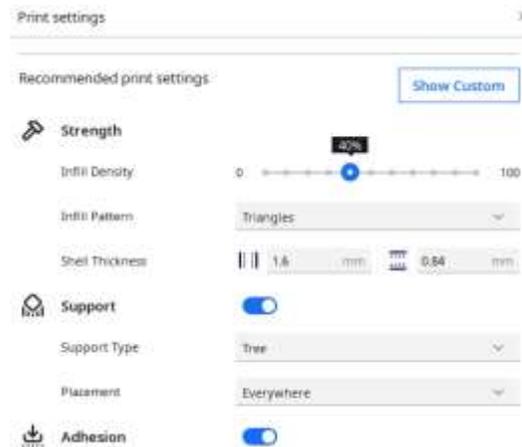


Figura 24. Modelos soportes 3D en Cura y parámetros.

Fuente: Elaboración propia

Durante las primeras etapas de la impresión 3D, se llevaron a cabo varias pruebas para optimizar los parámetros de impresión, con el objetivo de evitar el fenómeno de "warping" [72]. Este problema ocurre cuando las capas inferiores de la pieza se levantan durante el proceso de impresión, lo que afecta la calidad y precisión del modelo (Figura 25). Se ajustaron diversas configuraciones para minimizar este efecto y asegurar la correcta adherencia de las capas, lo cual fue crucial para obtener piezas funcionales y con la resistencia adecuada.

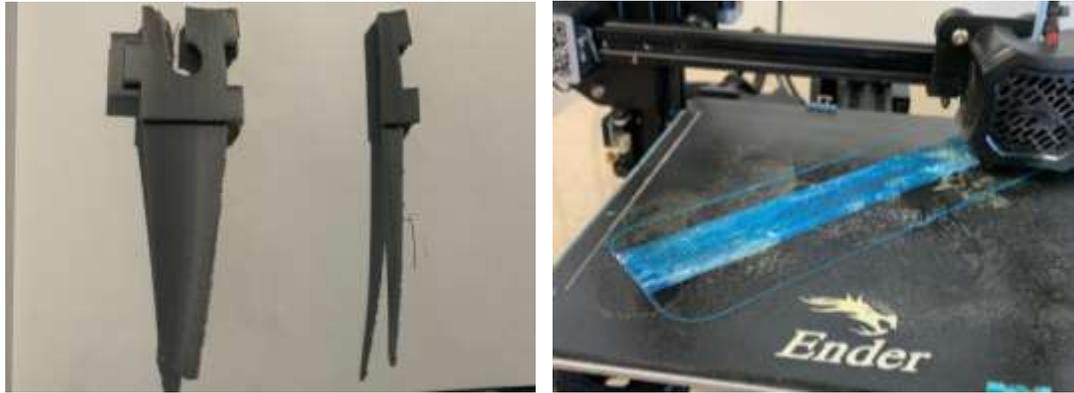


Figura 25. Fallos de impresión.

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos los parámetros óptimos para la impresión de las piezas, se procedió a imprimir todas las aspas necesarias para completar el rastrillo, sumando un total de 52 aspas. La producción se distribuyó estratégicamente entre las impresoras disponibles, logrando imprimir hasta 10 aspas por impresora simultáneamente. Finalizada la impresión de las aspas, se continuó con las piezas que conforman el soporte, utilizando los mismos parámetros optimizados. Debido a las dimensiones más grandes de estas piezas, se imprimió una pieza por impresora, en total, se fabricaron 11 piezas para el soporte. El proceso completo de impresión tomó entre 10 y 12 días, realizado en las instalaciones de la Corporación Universitaria Unicomfauca. (Figura 26)

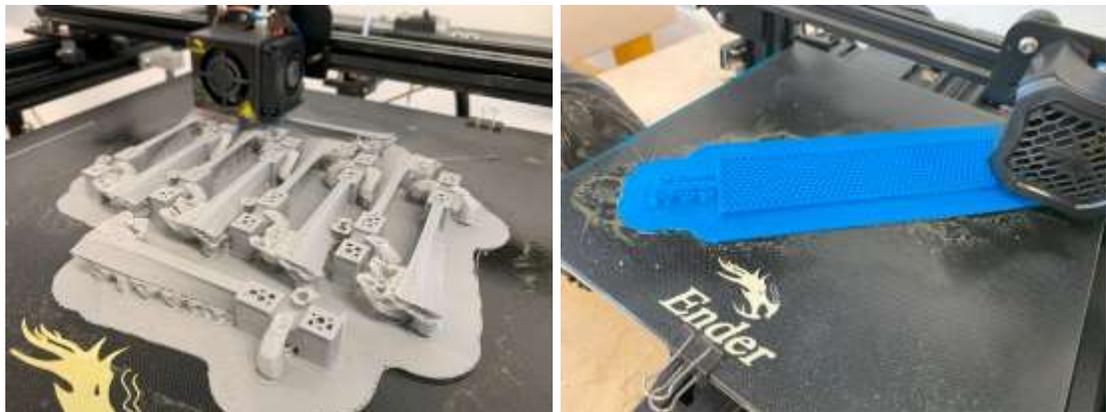


Figura 26. Proceso de impresión de aspas y soporte.

Fuente: Elaboración propia

Al concluir la fase de impresión, se llevó a cabo el proceso de acabado en cada una de las piezas. Esto implicó lijar cuidadosamente aquellas superficies con residuos de soportes generados durante la impresión 3D y limpiar todas las piezas con acetona, un disolvente líquido utilizado para suavizar la superficie del material. Este procedimiento tuvo como objetivo mejorar el acabado final, proporcionando un aspecto liso y uniforme, además de incrementar la calidad estética del prototipo (Figura 27).



Figura 27. Proceso de acabado de las piezas.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se procedió al ensamblaje de todas las piezas, implementando un riel DIN (acrónimo de Instituto Alemán de Normalización) en uno de los laterales del soporte de las aspas. Este componente se añadió con el propósito de mejorar la estabilidad del sistema, ya que se identificó, tras análisis previos, que el diseño modular presentaba un riesgo de fracturas en las piezas durante el movimiento del prototipo debido a la falta de estabilidad estructural. La incorporación del riel DIN proporcionó la estabilidad requerida, aumentando la eficacia del sistema y extendiendo significativamente la vida útil de las piezas.





Figura 28. Sistema ensamblado en su totalidad.

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Ingeniería asistida por ordenador (CAE)

Las capacidades del diseño del rastrillo se analizaron mediante un sistema de ingeniería asistida por ordenador (CAE) [68], con el objetivo de asegurar su rendimiento y durabilidad en condiciones reales de operación. El diseño modular del rastrillo fue sometido a una evaluación exhaustiva en términos de tensión, desplazamiento y deformación de sus componentes, aplicando una fuerza máxima de 13 N en las esquinas inferiores de la cuchilla. Se identificaron estas zonas como las de mayor contacto con los granos de café durante el proceso de secado. Se integraron en el análisis factores adicionales como la gravedad y la temperatura máxima de funcionamiento, que puede alcanzar hasta 60 °C, para obtener resultados más precisos y realistas. Este enfoque permitió optimizar el diseño del rastrillo, garantizando un funcionamiento eficaz y sin fallos en las exigentes condiciones del secado del café.

Por otra parte, se llevó a cabo un análisis estático sobre un aspa, que arrojó resultados favorables en términos de tensión, desplazamiento y deformación del diseño. En la simulación realizada (Figura 29), los valores de tensión oscilaron entre 0,119 MPa y 43,705 MPa, manteniéndose por debajo del límite elástico del material, que es de 47 MPa. Estos resultados indican que el modelo es estructuralmente robusto y capaz de soportar fuerzas significativas sin comprometer su integridad. Además, los valores de desplazamiento y deformación se mantuvieron dentro de unos márgenes aceptables, lo que confirma la viabilidad del diseño para su aplicación en condiciones reales, garantizando tanto la durabilidad como la funcionalidad bajo cargas operativas.

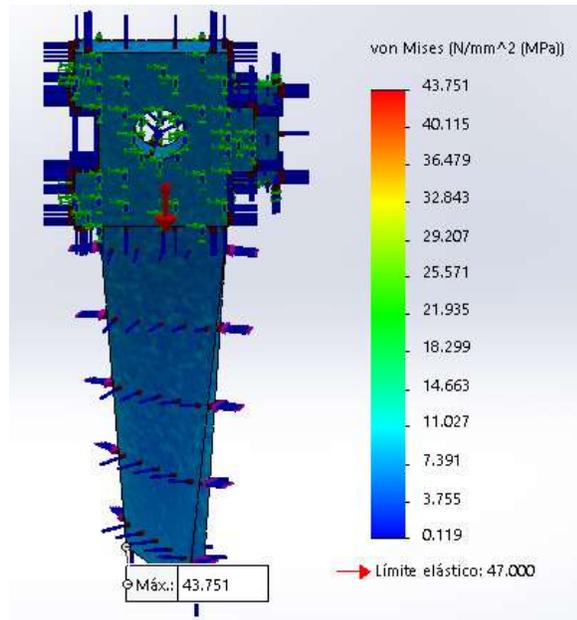


Figura 29. Simulación de tensión del aspa.

Fuente: Elaboración propia

En el análisis de desplazamiento (Figura 30), reveló que el aspa puede experimentar un desplazamiento máximo de 0,71043 mm bajo la aplicación de esfuerzos continuos en el tiempo. Este valor se considera dentro de límites aceptables, dado que las fuerzas aplicadas son significativas, pero no superan las capacidades de diseño del material. Además, el desplazamiento observado no compromete la funcionalidad del sistema ni genera preocupaciones en cuanto a la integridad estructural de las piezas, lo que refuerza la fiabilidad del diseño en escenarios operativos prolongados. Esto garantiza que, en condiciones normales de carga, el sistema mantendrá su rendimiento y estabilidad sin afectar a su eficacia.

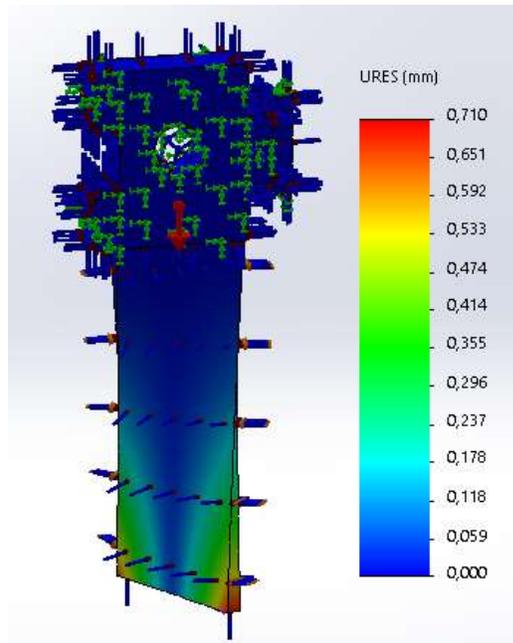


Figura 30. Simulación de desplazamiento del aspa.

Fuente: Elaboración propia

De igual importancia, se realizó un análisis enfocado a las esquinas inferiores del aspa, debido a que ésta cuenta con una mayor probabilidad de deformación, atribuida al contacto constante con los granos de café durante el proceso de mezcla. Este resultado era previsible, dado que estas zonas están sometidas a un mayor desgaste mecánico. Sin embargo, los resultados de la simulación mostraron que la deformación observada afecta sólo a una pequeña proporción de la pieza (Figura 31), lo que no compromete la funcionalidad global del sistema. La magnitud de la deformación se mantiene dentro de los límites tolerables del diseño, lo que indica que, aunque estas zonas están más expuestas al desgaste, no se espera que afecten significativamente al rendimiento y la vida útil del rastrillo a corto y medio plazo. Este comportamiento es coherente con la distribución de tensiones observada y refuerza la necesidad de optimizar estas zonas críticas para mejorar la durabilidad.

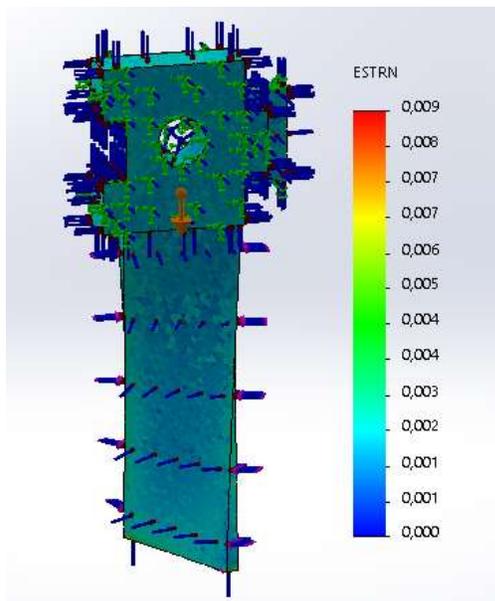


Figura 31. Simulación de deformación del aspa.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Elementos requeridos para la funcionalidad del prototipo.			
Ítem	MATERIAL	CANTIDAD	FUNCIONALIDAD
1	Tarjeta Desarrollo Esp32 Arduino IoT	1	Coordinar el funcionamiento del sistema, controlando los motores y los sensores, y gestionando los modos automático y manual.
2	Fuente de alimentación (110 V)	1	Proveer energía al sistema, asegurando un suministro constante para todos los componentes eléctricos.
3	Motorreductor	1	Proporcionar el movimiento necesario para el mezclado automático, asegurando una distribución homogénea del grano de café durante el secado solar.
4	Controlador de velocidad del motorreductor	1	Regular la operación del motorreductor, ajustando la velocidad según sea necesario y protegiéndolos contra sobrecargas.

5	Panel de control con pilotos LEDs y switch selector de modos	3	Indicar el estado del prototipo (encendido o apagado) mediante LEDs y permitir el cambio entre modos automático y manual para manejar el motorreductor según se requiera.
6	Pulsadores eléctricos	2	Permitir al usuario encender o apagar el sistema manualmente de forma sencilla y confiable.
7	Sensores finales de carrera	2	Delimitar el recorrido máximo del prototipo, evitando movimientos indeseados y protegiendo el motorreductor y la estructura.
8	Construcción del prototipo con impresión 3D	2	El prototipo incluye 52 aspas de mezclado y su soporte, fabricados con impresión 3D utilizando 4 rollos de 1 kg de filamento ABS, material que proporciona alta resistencia a esfuerzos y tolerancia a temperaturas extremas. Además, se incorporó una varilla roscada de 3 metros de longitud, conectada mediante poleas al motorreductor, para permitir el movimiento del sistema durante el proceso de mezclado.
9	Cableado de alta resistencia	VARIOS	Garantizar conexiones seguras entre los componentes eléctricos y soportar condiciones de operación en ambientes húmedos o con variaciones de temperatura.

3.1.4 Construcción electrónica del sistema propuesto

Para la implementación electrónica del dispositivo propuesto, se seleccionaron cuidadosamente diversos componentes electrónicos y materiales para facilitar la interacción entre el usuario y el prototipo. El diseño se centró en garantizar una experiencia de usuario intuitiva, permitiendo un control sencillo de arranque y parada, así como la posibilidad de operar el motor en modo manual o automático. Además, se prioriza la facilidad de programación, con el objetivo de que el sistema fuese accesible y adaptable para los usuarios, garantizando así una interacción eficiente y amigable con la tecnología implementada (Figura 32).

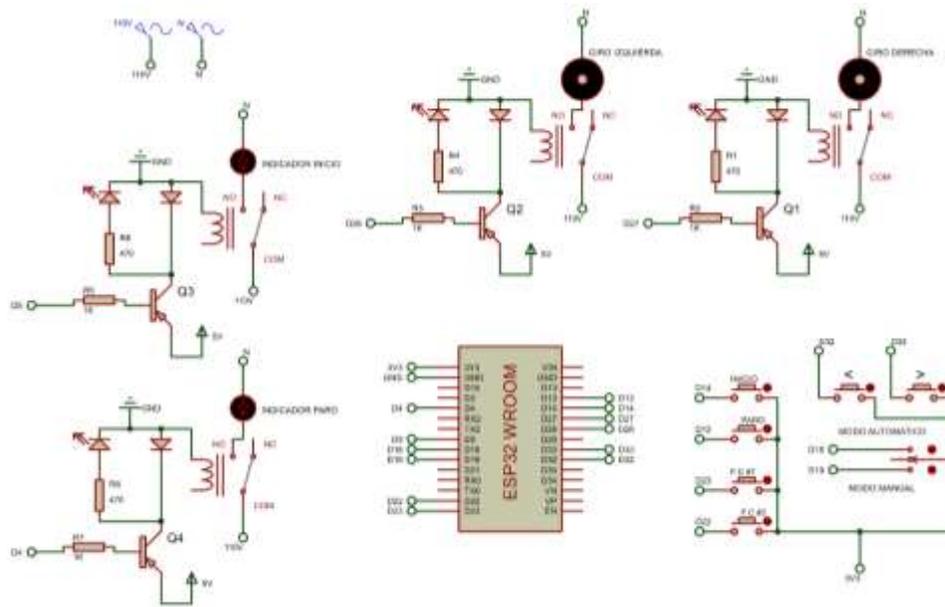


Figura 32. Circuito Electrónico en Proteus.

Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación de este prototipo, se eligió un microcontrolador como núcleo de procesamiento encargado de coordinar las diversas funciones del sistema y gestionar las señales de entrada y salida. Esta elección permite centralizar el control y mejorar la eficiencia del dispositivo, además de facilitar la interacción entre los diferentes sensores y actuadores involucrados en el proceso. Como plataforma de desarrollo se seleccionó la tarjeta de desarrollo ESP32 con el driver CP2102 (Figura 33), diseñada para brindar alta capacidad de procesamiento, bajo consumo de energía, y una amplia compatibilidad para aplicaciones en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT).



Figura 33. Tarjeta Desarrollo Esp32 Driver CP2102 Iot Wifi Bluetooth Arduino.

Fuente: Adquisición Comercial.

La elección de la ESP32 como microcontrolador principal se debe a las numerosas ventajas que ofrece para este proyecto. En primer lugar, su capacidad para comunicarse de manera eficiente con otros dispositivos y sensores facilita la integración de múltiples componentes en el sistema. Además, destaca por su bajo consumo de energía, ya que incluye modos de ahorro como la suspensión e hibernación, lo que permite reducir significativamente la demanda energética cuando el dispositivo no está en uso. Otra ventaja importante es su amplia memoria, que supera la de otros microcontroladores de su categoría, permitiendo almacenar y ejecutar programas más complejos de manera rápida y eficiente. La ESP32 también cuenta con un mayor número de entradas y salidas, tanto analógicas como digitales, lo cual brinda flexibilidad para futuras expansiones del sistema, facilitando la incorporación de dispositivos adicionales en caso de ser necesario.



Figura 34. Motorreductor 500 rpm 120W de 110VAC con caja reductora 5GN-3K.

Fuente: Adquisición Comercial.

En el desarrollo del prototipo, una parte crucial fue la selección del actuador encargado de generar el movimiento del sistema; en este caso, se optó por un motorreductor de corriente alterna con caja reductora integrada, diseñado para operar en espacios compactos sin sacrificar rendimiento (Figura 34). Este motor, que funciona a 110V y alcanza una velocidad de 500 rpm, presenta unas dimensiones de 23 cm de largo por 9 cm de ancho y alto, facilitando su instalación en áreas reducidas y de difícil acceso. Entre sus especificaciones técnicas se destacan su voltaje de 110 VAC, frecuencia de 50/60 Hz, potencia de 120 W, número de polos (4), velocidad de rotación de 500 rpm, torque máximo de 20 Kg·cm, corriente de 1.67 A y capacitancia de 1.2 μF / 450 V. Estas características permiten un balance óptimo entre potencia y eficiencia, ofreciendo un torque elevado para aplicaciones que requieren fuerza en espacios limitados y asegurando una operación estable y compatible con el sistema de control basado en el

microcontrolador ESP32, lo que facilita su integración en el diseño automatizado del prototipo.



Figura 35. Control de velocidad para motor 110VAC de 60W.

Fuente: Adquisición Comercial

Para controlar eficazmente este motor, se utilizó un controlador de velocidad de corriente alterna de 110V y 60W que ajusta la velocidad mediante un potenciómetro (Figura 35), variando el rango de 0% a 100% en función de las necesidades del sistema, además de poder ajustar el control del giro. De esta manera se consigue un control gradual de la velocidad del motor y cambio de giro, según se requiera para el proceso del prototipo. Además, el controlador dispone de un interruptor ON/OFF, el que permite parar el motor de forma segura y rápida cuando es necesario. El controlador garantiza un funcionamiento estable y adaptable, optimizando el rendimiento del sistema en diversas condiciones de uso.

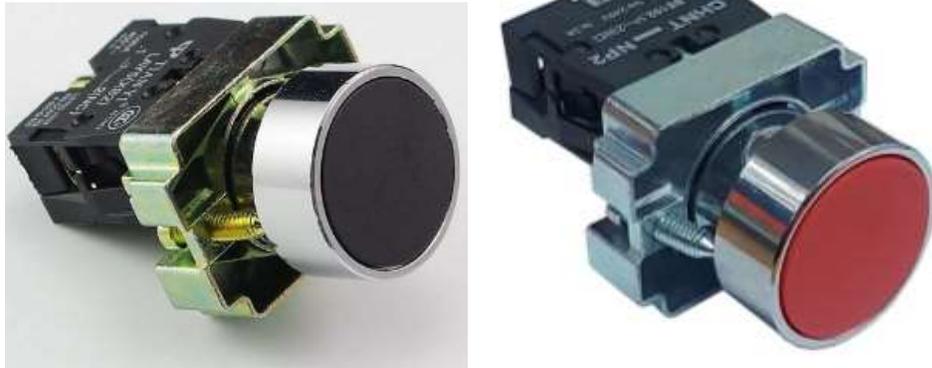


Figura 36. Pulsador eléctrico – Inicio o paro del sistema.

Fuente: Adquisición Comercial.

Para el accionamiento del sistema, se incorporaron cuatro pulsadores estratégicamente seleccionados para distintas funciones (Figura 36). Dos de ellos son pulsadores metálicos de 22 mm de diámetro, implementados para iniciar y detener el proceso general. Los otros dos pulsadores son más pequeños, de 5 mm de diámetro, y están destinados al control direccional del motor en modo manual, permitiendo seleccionar el giro a la izquierda o a la derecha según los requerimientos del usuario.



Figura 37. Pilotos Indicadores LED – Indican inicio o paro del sistema.

Fuente: Adquisición Comercial.

Ahora, para la indicación del estado de funcionamiento del sistema, se integraron dos pilotos Led de 110V y 22 mm de diámetro: uno de color verde y otro de color rojo (Figura 37). El piloto Led verde indica que el sistema está en funcionamiento, por otro lado, el piloto led rojo se enciende para señalar que el sistema se encuentra detenido, de esta manera brinda una señal visual clara para identificar cuando el equipo está activo o inactivo. Estos pilotos indicadores led permiten al usuario monitorear rápidamente el estado del sistema en todo momento.



Figura 38. Switch de codillo de 3 pines – Selector de modos del sistema

Fuente: Adquisición Comercial.

El sistema tiene dos modos de funcionamiento: manual y automático, y se utilizó un interruptor basculante para seleccionar entre ellos (Figura 38). Este dispositivo permite desviar o interrumpir el flujo de corriente, lo que facilita la elección del modo de funcionamiento. Accionando el interruptor, el usuario puede redirigir la señal eléctrica al microcontrolador para activar el modo deseado, manual o automático. De esta manera se permite pasar fácilmente de un modo a otro, lo que proporciona al usuario un mayor control para gestionar el sistema en función de las necesidades operativas.



Figura 39. Sensor Final de Carrera – Límite de movimiento del sistema.

Fuente: Adquisición Comercial.

En el prototipo, es fundamental detectar los límites de desplazamiento del motor para evitar colisiones y posibles daños en la estructura. Para ello, se utilizaron dos finales de carrera situados en los extremos del secador, cuya función es identificar el límite de desplazamiento del motor. Estos finales de carrera son sensores mecánicos que funcionan mediante una palanca o botón, y se activan cuando un componente móvil los presiona al llegar al final de la carrera (Figura 39). Cuando se

accionan, interrumpen o redirige la señal eléctrica, enviando una alerta al sistema para que detenga el motor inmediatamente.

3.1.5 Software de control para el proyecto propuesto

Para la programación del prototipo, se desarrolló una lógica basada en un modelo de control GRAFCET (Figura 40), una herramienta utilizada en la automatización para representar secuencias de estados y transiciones de forma estructurada. El diagrama diseñado cuenta con 9 etapas principales, cada una definida para gestionar el flujo del sistema según el modo de operación seleccionado: automático o manual. En este diagrama se explica como es el funcionamiento del código fuente del controlador, en el Anexo 1 se puede observar el código de programación en Arduino.

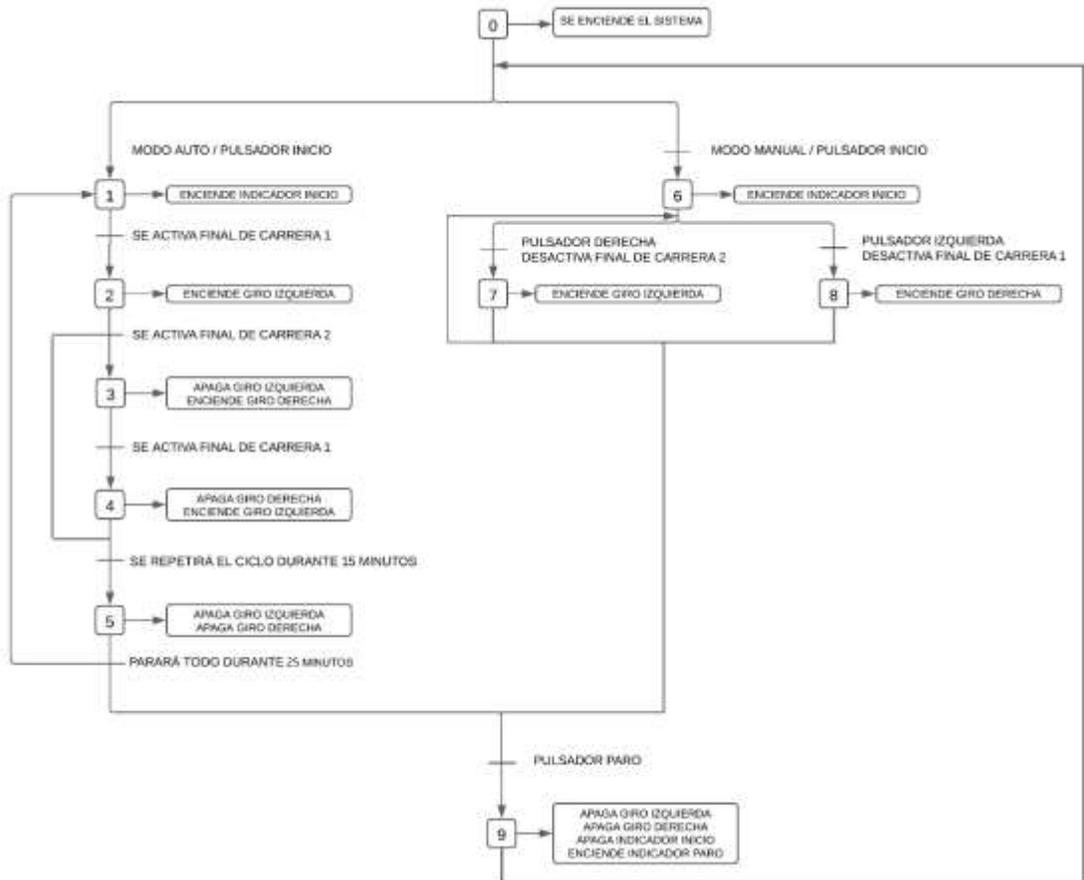


Figura 40. Modelo de control Diagrama Grafcet del sistema

Fuente: Elaboración propia.

En la etapa 0, se inicializa el sistema y se permite la selección del modo de operación. Desde aquí, el flujo se bifurca en dos líneas de acuerdo con el modo elegido:

- **Modo Automático:** En este modo, el sistema espera una transición donde se selecciona el modo y se activa el pulsador de inicio. Al hacer esto, se pasa a la etapa 1, en la cual se activa un indicador de inicio y el sistema espera la transición correspondiente a la activación del primer final de carrera. Esta activación permite avanzar a la etapa 2, donde se inicia el giro hacia la izquierda hasta que se activa el segundo final de carrera, indicando la siguiente transición hacia la etapa 3. Aquí, el giro hacia la izquierda se detiene y se inicia el giro a la derecha. Se espera una nueva transición cuando el primer final de carrera se activa de nuevo, lo que permite pasar a la etapa 4, donde se apaga el giro a la derecha y se reactiva el giro a la izquierda.
Este ciclo de cambios de dirección se repite durante 15 minutos. Transcurrido este tiempo, el sistema avanza a la ****etapa 5****, en la cual se detiene el giro en ambas direcciones y se inicia un receso de una hora antes de regresar a la ****etapa 1**** y reiniciar el ciclo completo. El modo automático se mantiene en funcionamiento hasta que el usuario lo detenga mediante el pulsador de paro.
- **Modo Manual:** Tras la etapa 0, se selecciona el modo manual y se activa el pulsador de inicio, lo que permite avanzar a la etapa 6. En esta etapa, se activa el indicador de inicio y se presentan dos opciones de control: Si el usuario presiona el pulsador de giro a la derecha y el segundo final de carrera está desactivado, el sistema pasa a la etapa 7, donde se enciende el giro a la izquierda. Alternativamente, si el usuario presiona el pulsador de giro a la izquierda y el primer final de carrera está desactivado, el sistema avanza a la etapa 8, donde se enciende el giro a la derecha.
Este proceso manual se repite de acuerdo con las necesidades del usuario, hasta que se presione el pulsador de paro. Este pulsador permite la transición tanto en modo automático como en modo manual hacia la ****etapa 9****, en la cual se apagan todos los giros y el indicador de inicio, y se enciende el indicador de paro, deteniendo el sistema de manera segura.

En relación con la programación del prototipo, se desarrolló un código basado en un diagrama GRAFCET, utilizando el software Arduino. Este código permite controlar un motorreductor en un sistema que opera en modos automático y manual. La configuración incluye pulsadores de inicio y paro, finales de carrera que delimitan el recorrido, y pilotos LED que indican el estado del sistema.

En el modo automático, al presionar el botón de inicio, el motorreductor gira a la izquierda y permanece activo hasta que se cumplen 15 minutos de operación o se

alcanza el final de carrera correspondiente. En ese momento, el motorreductor se apaga y se activa automáticamente en la dirección opuesta, manteniendo el mismo ciclo de funcionamiento. Este proceso se alterna en ciclos de 15 minutos de movimiento y 25 minutos de reposo, optimizando así el funcionamiento del sistema y prolongando la vida útil de los componentes.

En el modo manual, el operador controla el motorreductor mediante botones específicos: uno para girar a la izquierda y otro para girar a la derecha. El motor se apaga automáticamente cuando se alcanza el final de carrera y solo puede volver a activarse si este se desactiva. Para proporcionar una señal visual del estado, se utilizan dos LEDs piloto: uno verde que indica que el sistema está en funcionamiento y uno rojo para señalar que está detenido. Además, una función de paro general permite detener el motorreductor y reiniciar los indicadores visuales sin importar el modo en que el sistema esté operando, garantizando una respuesta rápida y segura en cualquier situación.

La Figura 41 muestra la simulación del circuito electrónico realizada en el simulador online "Wokwi", una herramienta que permite replicar el funcionamiento de placas, componentes y sensores ampliamente utilizados, como Arduino, ESP32 y STM32. Esta simulación se utilizó para evaluar la viabilidad del microcontrolador en procesos aplicados a la agricultura. En el circuito simulado, la placa ESP32 está conectada a varios elementos: pulsadores verdes y rojos para simular el arranque y parada del proceso; pulsadores azules y amarillos para representar el movimiento del motor a izquierda y derecha; y otros pulsadores negros y grises que simulan los finales de carrera, delimitando el movimiento del motor. También se incluyó un interruptor de tres pines que permite cambiar entre los modos automático y manual, y cuatro LEDs como indicadores: uno verde y otro rojo para señalar el arranque y la parada, uno azul para indicar el movimiento simulado del motor hacia la izquierda, y uno amarillo para el movimiento hacia la derecha. Al final de la simulación, se comprobó que el microcontrolador tiene la capacidad necesaria para gestionar este tipo de procesos, proporcionando la confianza necesaria para su implementación en un sistema físico.

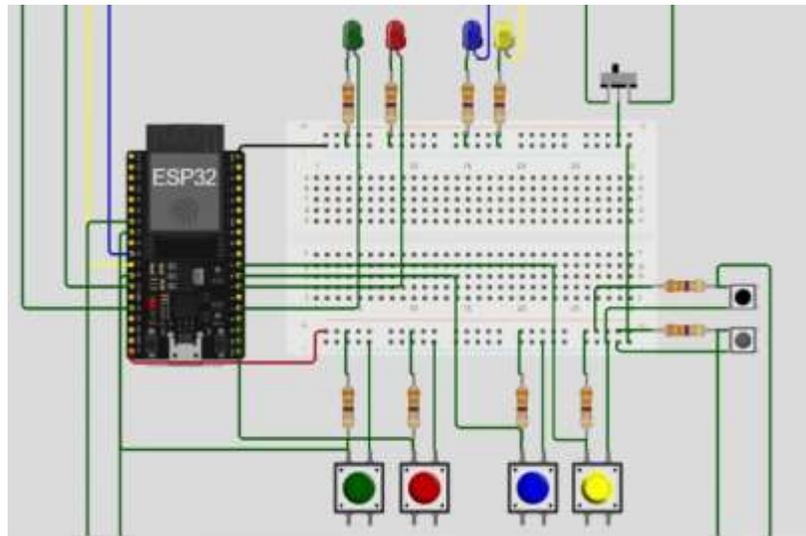


Figura 41. Simulación del Circuito en Wokwi.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6 Implementación del sistema propuesto

En este apartado se describe el proceso de instalación del prototipo en el secadero solar, detallando los pasos y precauciones tomadas para asegurar su correcto funcionamiento. Inicialmente, se procedió a la colocación de los rieles laterales, ajustándose a las dimensiones específicas del prototipo. Este paso requirió una planificación cuidadosa para garantizar la alineación precisa de los componentes, especialmente del soporte y las aspas, lo cual ayudó a definir las posiciones exactas de los rieles. Durante la instalación, se observó que el secadero presentaba ciertas irregularidades en su estructura, lo que podría afectar el movimiento del prototipo. Estas desuniformidades representaban un riesgo, ya que podían generar un aumento en la fricción y, en consecuencia, un mayor desgaste de los materiales. Para minimizar este impacto, se tomaron medidas para adaptar los rieles de forma que compensaran estas variaciones, lo cual contribuyó a reducir el riesgo de daños para tener un óptimo desplazamiento del prototipo dentro del secadero solar.



Figura 42. Montaje de Rieles.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 42 se observa el prototipo montado en los rieles mediante un sistema de rodachines. Este sistema permite un desplazamiento más fluido y libre, minimizando la fricción y evitando desgastes innecesarios en los materiales. La elección de rodachines facilita un movimiento suave, asegurando que el prototipo se desplace con la fricción mínima necesaria para su estabilidad y correcto funcionamiento en el secadero solar.

Para la instalación del eje central, se construyó una estructura base ubicada en uno de los laterales del secadero, diseñada para proporcionar una sujeción firme y segura. Esta estructura integra una chumacera de media pulgada que sostiene uno de los extremos del eje, asegurando la estabilidad y evitando movimientos no deseados. Además, este montaje actúa como contrapeso, ayudando a prevenir cualquier ondulación pronunciada en el eje y facilitando un movimiento más uniforme y controlado. Para asegurar una correcta alineación y soporte a lo largo de toda la longitud del eje, se instaló una segunda estructura de soporte en el centro de la marquesina. Esta estructura central incluye otra chumacera, similar a la primera, colocada aproximadamente entre los 280 cm y 290 cm del eje, lo cual ayuda a minimizar posibles desviaciones.



Figura 43. Montaje Estructura Eje Central.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la estructura base también cuenta con una chumacera adicional en la parte inferior que soporta el extremo del eje conectado al motor. Este diseño asegura un soporte continuo y robusto del eje en todos sus puntos clave, optimizando su funcionamiento y reduciendo el riesgo de desgaste o interferencias durante la operación del sistema en el secadero solar.



Figura 44. Soporte para eje que conecta al motor.

Fuente: Elaboración propia.

La estructura base que soporta el motor está firmemente anclada en una base de cemento, lo cual proporciona una fijación robusta y le confiere resistencia ante movimientos fuertes. Esta estructura se encuentra ubicada en la parte inferior del secadero, con el propósito de proteger el motor de las condiciones ambientales adversas, como la lluvia y el calor excesivo. El motor está asegurado mediante una

estructura tipo jaula que se atornilla al soporte de la base. Esta jaula está diseñada para mantener el motor en una posición estática y estable, minimizando el riesgo de movimientos no deseados que puedan causar daños en el motor o en el eje central. Para la conexión entre el motor y el eje central, el motor incluye un acople en su eje que permite fijar una varilla. Esta varilla cuenta con una polea, que se conecta mediante una correa a otra polea ubicada en el eje principal del sistema. La varilla está firmemente sujeta en la chumacera inferior de la estructura que sostiene el eje central, asegurando así una transmisión de movimiento estable entre el motor y el eje.



Figura 45. Estructura base para el Motor

Fuente: Elaboración propia.

Por último, toda la estructura física y los componentes mecánicos se instalan de forma que se optimice la eficacia del sistema. La instalación se planificó para minimizar las modificaciones en la estructura de la marquesina, reduciendo así tanto los costes como la cantidad de trabajo necesario para su implementación. Este enfoque de instalación facilita la integración del sistema sin comprometer la infraestructura existente y permite un funcionamiento eficaz con un impacto mínimo en el entorno estructural (Figura 46).



Figura 46. Montaje final del Prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

Para proteger la caja de control, que contiene toda la parte eléctrica del sistema (Figura 47), se realizó un proceso de hermetización con el fin de salvaguardar los circuitos frente a condiciones ambientales adversas, como la exposición al agua y al sol. Dentro de la caja de control se encuentran todas las conexiones eléctricas necesarias para el funcionamiento del prototipo. Se instalaron tres breakers que dividen las tres líneas principales de fase, neutro y tierra, permitiendo el suministro de energía eléctrica a todo el sistema. Además, en el interior se incluye un control de velocidad que permite ajustar la velocidad y el sentido de giro del motor según sea necesario. La caja de control también cuenta con una sección denominada “pared de control”, donde se ubican los elementos de interacción usuario-sistema. En esta sección se encuentran pulsadores, pilotos LED, un interruptor para seleccionar entre el modo manual y automático, y botones para controlar manualmente el movimiento del sistema. En un lugar accesible dentro de la caja se encuentra el microcontrolador, de fácil conexión y desconexión, lo cual facilita futuras modificaciones o actualizaciones en el sistema.

La distribución eléctrica está organizada mediante el uso de bornes de conexión, lo que permite un cableado ordenado y eficiente. En el extremo izquierdo de la caja de control salen dos cables principales: uno que suministra energía a todo el circuito y otro para la conexión directa con el motor. En el extremo derecho, dos cables adicionales están conectados a los finales de carrera, que se encargan de detectar el límite del recorrido del motor y prevenir posibles colisiones o daños en el prototipo.

La caja de control está montada en una estructura de madera hecha a medida, ubicada en la parte frontal del secadero. Esta posición facilita el acceso al sistema y proporciona una buena visibilidad para el monitoreo y operación del prototipo.



Figura 47. Caja de control y estructura de montaje.

Fuente: Elaboración propia.

Con el prototipo completamente instalado (Figura 48), se puede señalar que el soporte que sostiene las aspas tiene una distancia de 190 cm entre extremos. Este soporte sostiene toda la estructura del prototipo mediante un eje central de 3 metros de longitud, que se desplaza a lo largo de rieles de igual longitud. El sistema cuenta con dos modos de funcionamiento: automático y manual. En el modo automático, el prototipo realiza el proceso de mezclado durante intervalos de 30 minutos, tras los cuales entra en un periodo de reposo de una hora. Este ciclo se repite continuamente hasta que el usuario decide detener el proceso mediante el pulsador de paro.



Figura 48. Montaje final del prototipo

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4 - VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

En este capítulo se aborda la validación del sistema automatizado diseñado para el proceso de mezclado de café durante la fase de secado, ya sea en secaderos parabólicos o de tipo túnel. El objetivo principal es que el dispositivo opere de manera automática durante la mayor parte del día, ejecutando ciclos de mezclado de 15 minutos seguidos de periodos de descanso de 25 minutos. Cabe destacar que se elaboró un repositorio digital con el propósito de identificar las tecnologías existentes que apoyan el secado solar del grano de café y analizar los métodos de validación empleados en dichos sistemas. Durante este proceso, no se encontró un método estandarizado específico para validar el funcionamiento de un dispositivo de mezclado automático en el contexto de una marquesina de secado de café. Este hallazgo subraya la novedad y el aporte potencial de este proyecto en el desarrollo de soluciones innovadoras en este ámbito.

Por lo tanto, el prototipo fue sometido a una serie de pruebas en un entorno controlado utilizando tres tipos de variedad de grano de café. Estas pruebas permitieron analizar y observar el desempeño del sistema, así como evaluar su efectividad en la fase de secado. Para asegurar una validación precisa, se consideraron diversas pautas técnicas y operativas, las cuales garantizaron la obtención de resultados representativos del comportamiento del prototipo bajo condiciones reales de secado.



Figura 49. Collage - Montaje del Sistema Automatizado de Mezclado para pruebas.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo anterior, los resultados obtenidos con el prototipo se comparan con muestras procesadas mediante el método de mezclado tradicional (manual). Este análisis comparativo busca evaluar la eficacia del prototipo en relación con el método manual, permitiendo una confrontación objetiva de los resultados y

aportando datos valiosos sobre el desempeño y eficiencia del sistema automatizado frente a prácticas convencionales.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE CONCEPTO

En este contexto, se propuso un método de validación no probabilístico, diseñado para evaluar la eficacia del dispositivo de mezcla automática en comparación con el método tradicional. Para ello, se dividió el secadero solar en dos secciones, asignando a cada una de ellas tres tipos diferentes de granos de café. En la primera sección se utilizó el dispositivo automático de mezcla desarrollado en el proyecto, mientras que en la segunda sección se utilizó el método tradicional, que consiste en mezclar manualmente los granos utilizando un rastrillo. El objetivo de este enfoque experimental fue comparar la eficiencia de ambos métodos en términos de uniformidad en el secado, reducción del esfuerzo humano y optimización del tiempo, permitiendo determinar si el dispositivo automático supera, iguala o es menos eficiente que el método manual en el proceso de secado del café.

Para la validación del sistema, se seleccionaron tres tipos de muestras de café, comúnmente utilizadas en las instalaciones de TECNICAFÉ debido a la diversidad de resultados que ofrecen en cuanto a sabor, acidez y calidad en taza: Suave Lavado o Pergamino, tipo Honey y tipo Cereza o Natural. Cada muestra fue preparada con un peso específico asignado para cada sección del secador, garantizando condiciones uniformes y controladas para la comparación. Esta selección se realizó con el propósito de evaluar el desempeño del dispositivo automático de mezclado en diferentes tipos de granos, considerando sus características y comportamientos particulares durante el proceso de secado. De esta forma, se buscó garantizar resultados representativos y relevantes para determinar la eficiencia del sistema en condiciones reales. La primera muestra corresponde al Suave Lavado o Pergamino, obtenido tras la cosecha, el despulpado y el lavado. Para este tipo de grano se trabajó con 6.7 kg en cada sección, distribuidos en uno de los laterales de la cama del secadero. La segunda muestra corresponde al grano tipo Honey, que se obtiene después de la cosecha y el despulpado, conservando el mucílago. En este caso, se emplearon 8.5 kg por sección, colocados en la zona central de la cama del secadero. Finalmente, la tercera muestra es el grano tipo Cereza, que solo requiere la cosecha y el lavado, manteniendo la cáscara. Para este tipo de grano se trabajó con 6 kg en cada división, distribuidos en el lateral opuesto de la cama.

Una vez colocadas las tres muestras en las dos secciones del secadero, una para el mezclador automático y otra para el mezclador manual, se observaron y registraron los datos relativos a la humedad de los granos durante un periodo de 12 días, limitado por la disponibilidad de tiempo, teniendo en cuenta que las variedades de café seleccionadas presentan diferentes tiempos de secado. Por ejemplo, la muestra Suave Lavado suele requerir entre 7 y 10 días, la muestra tipo Honey entre 12 y 15 días, y la muestra tipo Cereza o Natural entre 20 y 30 días. Estos tiempos

pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones climáticas. Para ello, se utilizó un medidor de humedad KETT PM-450 (Figura 51), un dispositivo portátil diseñado específicamente para medir con precisión el contenido de humedad de granos y semillas. Este medidor utiliza la tecnología de resistencia eléctrica para proporcionar lecturas rápidas y fiables, lo que lo hace ideal para evaluar el proceso de secado del café [73].



Figura 50. Medidor de humedad KETT PM-450

Fuente: Elaboración propia.

Durante cada medición, se realizaron tres lecturas por muestra, tomándose en los lados derecho e izquierdo, así como en la parte central. Esto permitió obtener un promedio de la humedad para cada muestra utilizando el medidor de humedad KETT PM-450, que cuenta con una función integrada para calcular promedios. En este caso, se promediaron las tres mediciones realizadas en diferentes puntos de cada muestra. Este enfoque permitió evaluar la uniformidad del secado en cada sección y comparar los resultados obtenidos entre el mezclador automático y el método manual, con el objetivo de identificar diferencias en la eficiencia del secado y validar la eficacia del dispositivo propuesto.

De esta manera, las muestras se ubicaron en tres secciones tanto para el prototipo de mezclado automático como para el método tradicional, lo que permitió observar, a lo largo de los días, las diferencias en la humedad de cada tipo de grano bajo ambos métodos (Figura 52).



Figura 51. Muestras de café para las pruebas.

Fuente: Elaboración propia.

En este estudio, cada muestra de café presenta inicialmente un alto nivel de humedad, variando según el tipo de procesamiento del grano. La muestra de café Suave Lavado, que posee el menor contenido de humedad inicial, presenta valores entre el 50% y el 53%. Por otro lado, el grano tipo Honey, con mayor cantidad de mucílago, registra niveles de humedad iniciales entre el 60% y el 65%. Finalmente, el grano tipo cereza, al conservar la cáscara, presenta el nivel de humedad más alto, oscilando entre el 70% y el 75%.

El objetivo principal de esta investigación es reducir los niveles de humedad de cada muestra a un rango óptimo de entre el 10% y el 12%, garantizando al mismo tiempo la uniformidad en el secado del grano. Alcanzar este rango de humedad es fundamental, ya que garantiza la calidad final del café. Para lograrlo, es crucial mantener una alta frecuencia de mezclado a lo largo del día, lo que permite una distribución uniforme del calor y la circulación del aire en las muestras. Si los niveles de humedad se desvían de este rango, ya sea por debajo o por encima, se corre el riesgo de comprometer la calidad y el sabor del grano, afectando negativamente a su valor comercial y a su aceptación en el mercado.

4.2 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

El primer día del experimento fue clave para observar y evaluar el movimiento del dispositivo, identificar posibles problemas y resolverlos a tiempo. Como era de esperar, surgieron varios problemas iniciales que impidieron un movimiento suave y limpio del sistema; sin embargo, se resolvieron rápidamente sin afectar al proceso de validación.

Tabla 3. Humedades día 1 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	50% - 53%	60% - 65%	70% - 75%
2	50% - 53%	60% - 65%	70% - 75%

En cuanto a las mediciones iniciales de humedad (Tabla 3), se comprobó que los valores eran muy elevados, superando el rango máximo de medición del medidor de humedad KETT PM-450, que sólo puede registrar niveles inferiores al 40%. Por esta razón, sólo fue posible obtener un valor preciso para el grano suave lavado o pergamino. En el caso de las muestras de Honey y Cereza, cuyos niveles iniciales de humedad superaban este límite, se realizó una estimación aproximada de sus valores para continuar con el análisis. Esto permitió continuar con el experimento sin comprometer los objetivos de la investigación.

Al final del primer día, los niveles de humedad de las muestras de Honey y Cereza seguían siendo superiores al 40%, lo que impedía obtener mediciones precisas debido a las limitaciones del equipo utilizado. Sin embargo, en la muestra suave lavado fue posible registrar un valor concreto, ya que su humedad se encontraba dentro del intervalo medible. En el caso de las muestras de miel y cereza, se decidió posponer las mediciones unos días, para permitir que sus niveles de humedad descendieran lo suficiente como para realizar un análisis más preciso y controlar los cambios de forma eficaz.

Tabla 4. Humedades día 2 de las muestras	
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO
1	33.3%
2	35.6%

El segundo día de observaciones, se registraron diferencias en los niveles de humedad entre la sección mezclada automáticamente y la sección mezclada manualmente (Tabla 4). Aunque sólo fue posible medir la humedad de la muestra de Suave Lavado, porque las otras dos muestras estaban aún fuera del rango de medición, los resultados obtenidos fueron alentadores. En el caso del Suave Lavado, se observó un menor nivel de humedad en la sección mezclada

automáticamente en comparación con el método manual. Este resultado es un indicador positivo para la validación del dispositivo, ya que sugiere una mayor eficacia en el proceso de secado con el mezclador automático.

Durante el funcionamiento, se observó que el sistema era capaz de mezclar adecuadamente las muestras de Suave Lavado y Cereza, formando una capa de café más uniforme y fina. Esto evitó la formación de cúmulos de granos y permitió una mejor expansión de las muestras, favoreciendo un secado uniforme. Sin embargo, con la muestra de tipo Honey, los resultados no fueron tan favorables. Este tipo de grano, al estar cubierto de mucílago, una capa gelatinosa, tiende a ser más pegajoso, lo que complica su manipulación, incluso manual. En el caso de la mezcladora automática, esta característica dificultaba el movimiento, provocando acumulaciones en un extremo y generando problemas en el desplazamiento del sistema (Figura 52). Para mitigar este inconveniente, la muestra se redistribuyó manualmente, asegurando que no afectara al funcionamiento general del prototipo y permitiendo continuar con el proceso de validación.

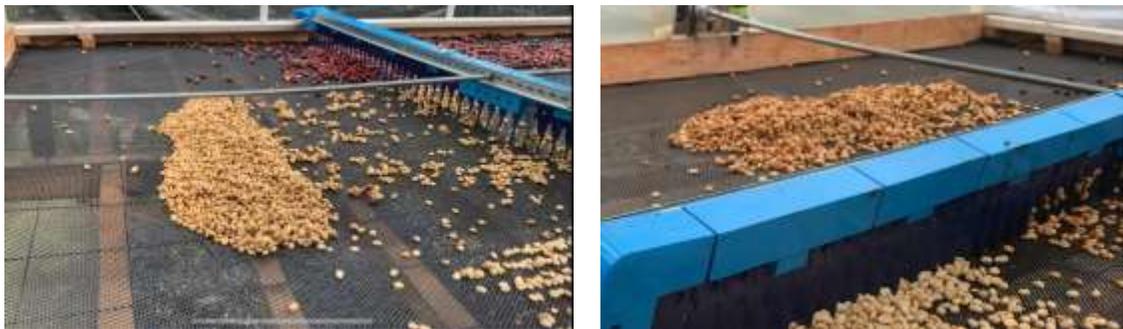


Figura 52. Problema en la muestra tipo Honey.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Humedades día 3 de las muestras	
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO
1	20.1%
2	20.8%

El día 3, se decidió medir únicamente la humedad de la muestra de Suave Lavado, ya que las otras dos muestras seguían presentando niveles de humedad demasiado

elevados (Tabla 5). Se consideró oportuno esperar unos días más antes de medirlas para obtener datos más representativos. Al analizar la muestra de Suave Lavado, se observó que en la sección de mezcla automática se registró un nivel de humedad del 20,1 %, mientras que en la sección de mezcla manual el valor fue del 20,8 %. Aunque la diferencia entre los dos métodos era pequeña, los resultados sugieren una ligera ventaja de la mezcla automática en el proceso de secado.

Tabla 6. Humedades día 4 de las muestras	
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO
1	15.7%
2	16.5%

El día 4, al igual que en los días anteriores, sólo se realizaron mediciones de humedad en la muestra de Suave Lavado, lo que muestra de nuevo una diferencia entre los dos métodos (Tabla 6). En la sección de mezclado automático, la humedad registrada fue del 15,7%, mientras que en la sección de mezclado manual fue del 16,5%. Esta pequeña diferencia sugiere que ambos métodos de mezcla tienen un rendimiento similar en términos de reducción de la humedad, con una ligera ventaja para el sistema automático. Sin embargo, la diferencia no es lo suficientemente significativa como para extraer conclusiones definitivas, lo que indica que ambos métodos podrían ser eficaces en el proceso de secado, dependiendo de las condiciones específicas del sistema.

Tabla 7. Humedades día 5 de las muestras	
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO
1	12.63%
2	13.53%

El día 5, se observó que la muestra de Suave Lavado se acercaba a la humedad óptima de secado (Tabla 7). Con el uso del dispositivo de mezclado automático, la humedad era del 12,63 %, mientras que con el método de mezclado tradicional, el valor era del 13,53 %. Esta diferencia demuestra que el dispositivo automático pudo acercarse más rápidamente al contenido de humedad deseado, aunque ambos

métodos se aproximan al intervalo óptimo. Esto indica que el sistema automático podría ser una opción más eficaz para alcanzar los niveles de humedad ideales en menos tiempo.

Tabla 8. Humedades día 6 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	14.53%	19.5%	29.5%
2	14.8%	19.8%	34.8%

El día 6, se observó un aumento inesperado de los niveles de humedad debido a las condiciones climáticas, ya que la zona experimentó lluvias, lo que provocó un aumento de la humedad del grano, especialmente durante la noche (Tabla 8). Como resultado, los valores de humedad tanto en la sección de mezcla automática como en la manual fueron del 14,53% y del 14,8%, respectivamente. Este aumento de la humedad refleja cómo los factores externos, como el clima, pueden influir en el proceso de secado. Ese día se decidió medir muestras de los tipos Honey y Cereza, y se observó que los niveles de humedad son relativamente altos, especialmente en el tipo Cereza. En el caso del tipo Honey, los valores de humedad registrados en la sección de mezcla automática y en la sección de mezcla manual son muy similares, con una diferencia mínima de sólo el 0,3%. En cambio, para el tipo Cereza, se identificó una diferencia más notable del 5,3%.

Tabla 9. Humedades día 7 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	11,1%	14,3%	21,9%
2	12,4%	14,4%	26,3%

Al séptimo día de pruebas, se observó una notable reducción de los niveles de humedad de todas las muestras (Tabla 9). En el caso del grano tipo Suave Lavado en la sección uno (mezcla automática), se registró un nivel de humedad cercano al rango óptimo, mostrando un rendimiento superior en comparación con la sección dos (mezcla manual). Sin embargo, no fue posible finalizar el proceso de almacenamiento de la muestra de la sección uno debido a circunstancias externas. En el caso del grano tipo Honey, los resultados entre las dos secciones fueron prácticamente idénticos, con diferencias mínimas cercanas a cero. Esto se atribuye

a la falta de mezclado frecuente en ambas secciones, lo que limitó el progreso en la reducción de humedad para esta muestra específica. En cuanto al grano tipo Cereza, se observó una disminución significativa de los niveles de humedad en ambas secciones. En la sección uno (mezclado automático), la humedad se redujo a una media del 21,9 %, mientras que en la sección dos (mezclado manual) alcanzó una media del 26,3 %. Esto representa una diferencia del 4,4 % entre ambos métodos.

Tabla 10. Humedades día 8 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	12,8%	16,1%	24,1%
2	14,6%	16,3%	28,5%

En el octavo día de pruebas, se produjo un aumento general de los niveles de humedad de las muestras (Tabla 10), atribuido a las adversas condiciones climáticas de la zona, estos factores demoraron el proceso de secado. En el caso de las muestras de café Pergamino, la sección uno (mezcla automática) presentó un incremento del 1,7% de humedad, mientras que en la sección dos (mezcla manual) el incremento fue del 2,2%. En el caso de las muestras de tipo Honey, también se observaron incrementos similares, la humedad en la sección uno aumentó un 1,8%, mientras que en la sección dos el incremento fue del 1,9%. Por último, las muestras de Cereza mostraron un aumento uniforme en ambas secciones, con un incremento del 2,2 % en los niveles de humedad, tanto para el método de mezcla automática como para el manual.

Tabla 11. Humedades día 9 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	10,5%	14,4%	23,8%
2	12,5%	14,9%	27,1%

En el noveno día de pruebas de validación, la muestra de Suave Lavado alcanzó un nivel de humedad óptimo, registrando una media del 10,5% en la sección con mezcla automática (Tabla 11). En comparación, la muestra de la sección con mezcla manual presentó un nivel de humedad de 12,5%, evidenciando una diferencia de 2% entre ambos métodos. Cabe señalar que durante las pruebas se presentaron

diversas complicaciones climáticas, principalmente debido a las lluvias que aumentaron repetidamente la humedad del grano, lo que prolongó el tiempo de secado más allá de lo previsto.

En cuanto al tipo de Honey, en el noveno día, la sección mezclada automáticamente tenía un contenido medio de humedad del 14,4%, mientras que la sección mezclada manualmente tenía un valor del 14,9%, lo que muestra una diferencia del 0,5%. Esta variación puede atribuirse a la mayor frecuencia de mezclado en el método automático, que favorece una mejor distribución del calor y la ventilación. Por último, en el caso de la muestra de Cereza, los resultados mostraron mayores diferencias. En la sección de mezclado automático, el contenido medio de humedad fue del 23,8%, mientras que en la sección de mezclado manual alcanzó el 27,1%, con una diferencia significativa del 3,3%. Este resultado refuerza la ventaja de la mezcla automática para la manipulación de granos más complejos, como la cereza, al evitar la acumulación de humedad y mejorar el proceso de secado.

Tabla 12. Humedades día 10 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	10,5% (LISTO)	15,2%	23,7%
2	13%	17,25%	26,7%

En el día 10 de las pruebas, se registraron los niveles de humedad de dos muestras en la sección de mezclado automático con el dispositivo, dado que el proceso de validación para el café tipo Lavado había concluido exitosamente (Tabla 12). Por otro lado, en la sección de mezclado manual, el proceso de secado continuaba sin haber alcanzado aún los niveles óptimos para todas las muestras. En cuanto al tipo pergamino de la sección dos, donde se empleó el método de mezclado manual, se obtuvo un promedio de humedad del 13 %, un valor ligeramente superior al de la misma muestra en la sección de mezclado automático, con una diferencia de 2,5 %. Respecto al café tipo Honey, la muestra de la sección uno (mezclado automático) presentó un promedio de humedad del 15,2 %, mientras que la muestra de la sección dos (mezclado manual) mostró un promedio del 17,25 %, evidenciando una diferencia significativa de 2,05 %.

Finalmente, para el café tipo Cereza, los resultados reflejaron una mayor discrepancia: la muestra de la sección uno registró un promedio de humedad del 23,7 %, mientras que la muestra de la sección dos alcanzó un 26,8 %. Esto

representa una diferencia de 3,1 %, destacando nuevamente la ventaja del mezclado automático para acelerar el secado de este tipo de grano.

Tabla 13. Humedades día 11 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	10,5% (LISTO)	14,3%	29%
2	15,1	15,7%	32%

En el día 11 de pruebas de mezclado, en la muestra de café Pergamino correspondiente a la sección dos, donde se empleó el método manual, se obtuvo un promedio de humedad del 15,1%, indicando que este grano aún está lejos de alcanzar el rango de humedad óptimo. En el caso del tipo Honey, los resultados mostraron valores cercanos entre ambas secciones. La sección uno, procesada con el dispositivo de mezclado automático, registró una humedad de 14,3%, mientras que la sección dos, con el método manual, alcanzó un 15,7%. La diferencia entre ambos métodos fue mínima, sugiriendo que ambos pueden ser efectivos dependiendo de las condiciones de operación. Para la muestra de grano Natural, las diferencias entre los métodos fueron más evidentes. La sección uno, donde se utilizó el dispositivo automático, presentó un nivel de humedad del 29%, mientras que la sección dos, con el método manual, registró un 32%.

Tabla 14. Humedades día 12 de las muestras			
SECCIÓN	SUAVE LAVADO O PERGAMINO	HONEY	CEREZA
1	10,5% (LISTO)	10,9% (LISTO)	21,3%
2	10,5% (LISTO)	10,9% (LISTO)	24,5%

En el día 12 de mezclado, la muestra tipo Pergamino de la sección dos alcanzó la humedad óptima del 10,5%, igualando a la muestra de la sección uno, sin embargo, lograr este valor tomó tres días más en comparación con la muestra procesada con el dispositivo de mezclado automático, lo que permitió su retiro y almacenamiento en ese momento. En el caso de la muestra tipo Honey, la sección 1 alcanzó una humedad óptima de 10,9% en la mañana del día 12, por lo que fue retirada y

almacenada. Por su parte, la muestra de la sección dos registró un 11,4% en el mismo horario, pero tras seis horas adicionales también alcanzó el 10,9%, permitiendo su almacenamiento junto con las demás muestras. Finalmente, para la muestra tipo Cereza, en el día 12, la sección 1 (con mezclado automático) registró un nivel de humedad del 21,3%, mientras que la sección 2 (mezclado manual) presentó un 24,5%, evidenciando una diferencia de 3,2%. Estos resultados reflejan las particularidades de cada método en función del tiempo y las condiciones climáticas durante el secado.

PROCESO DE SECADO DURANTE UN PERIODO DE TIEMPO DE 12 DÍAS

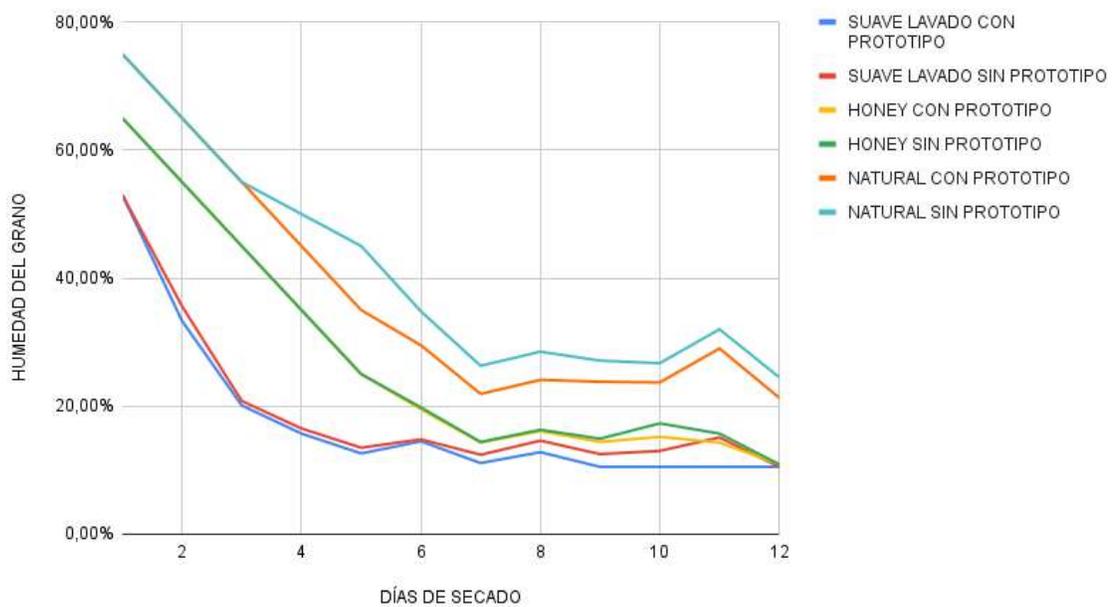


Figura 53. Evolución del proceso de secado del grano de café, comparando las muestras tratadas con el prototipo de mezclado automático y aquellas procesadas sin su uso.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de mezclado, tanto con el dispositivo automatizado como con el método manual mediante un rastrillo, se evidenció una diferencia significativa en los tiempos y la calidad del secado. El sistema automatizado demostró ser más eficiente al reducir los tiempos de secado

y garantizar una mayor uniformidad en el proceso. Esto se atribuye a la alta frecuencia de mezclado que permite el dispositivo, lo cual facilita la formación de capas delgadas y bien dispersas de grano, optimizando así la exposición al aire y promoviendo un secado más homogéneo. No obstante, las condiciones climáticas jugaron un papel determinante, ya que influyen directamente en los resultados del proceso. Debido a las intensas lluvias registradas durante el periodo de pruebas, la validación del sistema tuvo que limitarse a un lapso de 12 días, lo que impidió que algunas muestras alcanzaran el nivel óptimo de humedad. Por ejemplo, el tipo Cereza, que típicamente requiere aproximadamente 30 días para tener la humedad requerida, pero mostró retrasos adicionales en su proceso debido al alto nivel de humedad ambiental.

A pesar de estas limitaciones climáticas, el dispositivo automatizado demostró una ventaja significativa frente al método manual tradicional, especialmente en el secado del tipo Cereza. Esto resalta la capacidad del sistema automatizado para mantener su eficacia incluso bajo condiciones ambientales adversas, consolidándose como una herramienta prometedora para optimizar el proceso de secado de café.

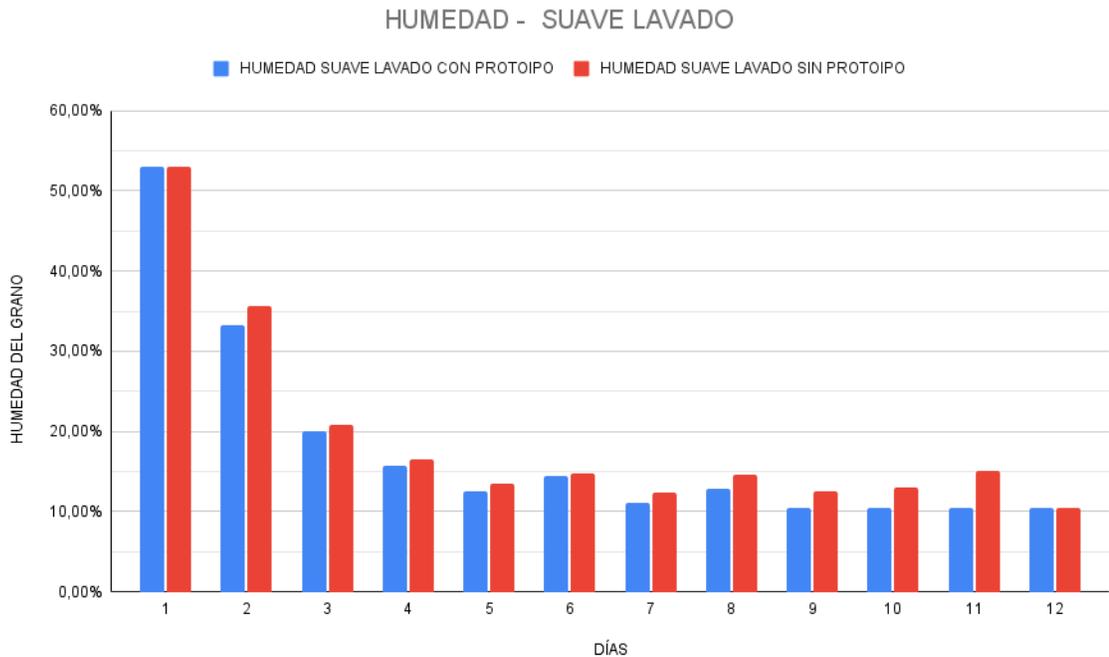


Figura 54. Niveles de humedad de la muestra Suave Lavado o Pergamino en los dos métodos.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 54 se observa la variación de la humedad a lo largo de los días en la muestra suave lavado o pergamino. La gráfica presenta dos tipos de barras: las barras azules corresponden a la muestra de grano suave lavado que fue procesada con el dispositivo de mezclado automático, mientras que las barras de color rojo representan la muestra de suave lavado que trabajó con el método manual mediante rastrillo. Ambas muestras comienzan con el mismo nivel de humedad, pero a medida que avanza el proceso, se evidencia que suave lavado con prototipo logra una mayor rapidez y eficiencia en el secado, alcanzando una humedad óptima del 10,5% en el día 9, a pesar de las condiciones climáticas desfavorables entre los días 6 y 8. En contraste, suave lavado sin prototipo tardó tres días más en llegar al mismo nivel. Estos resultados confirman la eficacia del dispositivo para procesar este tipo de muestra, logrando no solo un secado más rápido, sino también una uniformidad superior, con valores consistentes a lo largo del proceso.

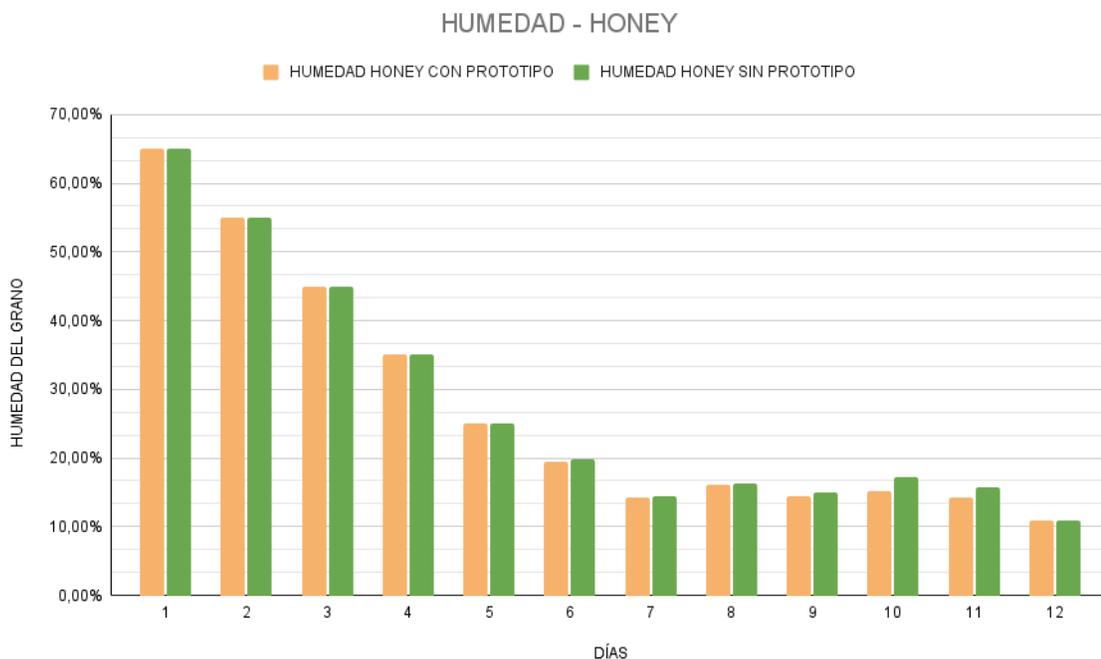


Figura 55. Niveles de humedad de la muestra Tipo Honey en los dos métodos.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 55 se presenta un análisis similar al de la gráfica anterior, donde se observan dos muestras de la variedad tipo Honey. La barra de color naranja corresponde a la muestra tipo Honey procesada con el dispositivo de mezclado automático, mientras que la barra verde representa la muestra tipo Honey que

trabajó con el método manual mediante rastrillo. En este caso, la variedad Honey presentó dificultades durante el proceso de secado debido a la naturaleza gelatinosa y pegajosa del mucílago, lo que ocasionó que se formaran cúmulos de granos que dificultaron el movimiento efectivo tanto en el dispositivo automático como con el rastrillo manual. Esto impidió una correcta disipación de la humedad, alargando el tiempo de secado. Además, una vez que el mucílago se secó, formó una capa pegajosa que hizo que los granos se adhirieran entre sí y a la malla del secadero, dificultando aún más el movimiento. Como resultado, la gráfica muestra una humedad bastante uniforme, con pequeñas variaciones en algunos días, pero alcanzando la humedad óptima de 10,9% en el día 12. En conclusión, debido a las complicaciones que presenta esta variedad durante el proceso de secado, no es posible adaptar el dispositivo de mezclado automático para trabajar eficazmente con ella.

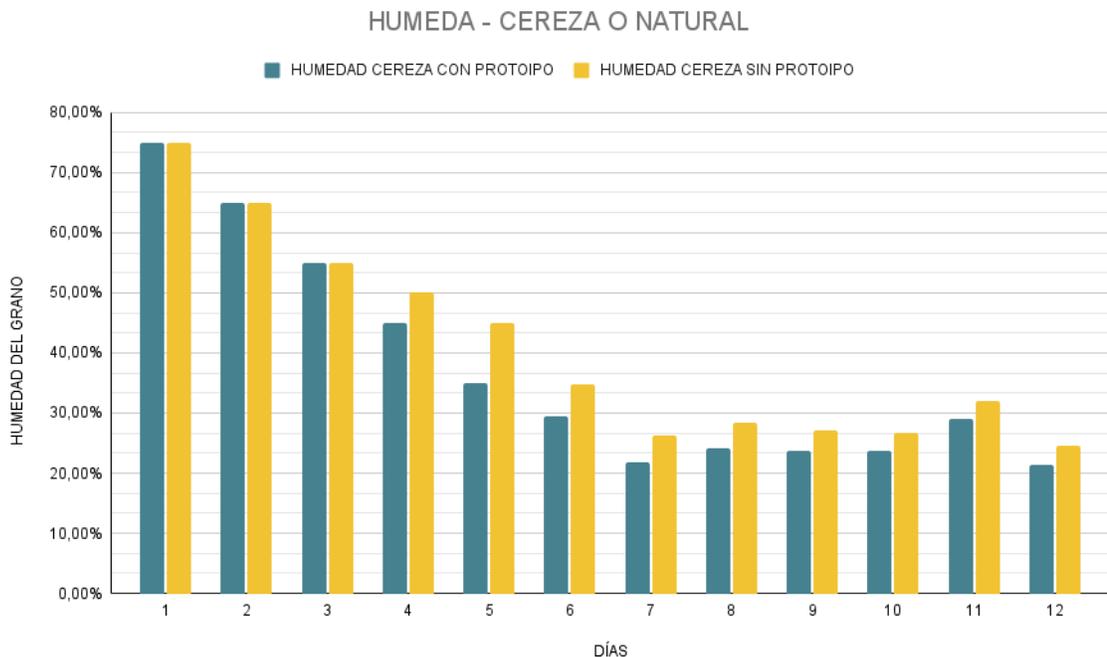


Figura 56. Niveles de humedad de la muestra Cereza o Natural en los dos métodos.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 56 se muestran los datos obtenidos para la muestra de grano tipo Cereza o Natural. Se observa que, a lo largo de los 12 días de medición, no se alcanzó la humedad esperada, ya que esta variedad tiende a tener niveles de humedad más altos, lo que extiende su tiempo de secado. Además, las condiciones

climáticas contribuyeron a alargar aún más este proceso. Sin embargo, se puede notar que la barra verde, correspondiente a la muestra tipo Cereza con prototipo, procesada con el dispositivo automático, muestra reducciones de humedad mucho más rápidas que la muestra tipo Cereza sin prototipo, procesada con el rastrillo manual. La diferencia entre ambas es de un 3%, lo que implica que el secado del Cereza con prototipo puede alcanzar una humedad óptima en tres a cuatro días más rápido que el Cereza sin prototipo. Para el día 12, Cereza con prototipo alcanzó una humedad del 21,3%, mientras que Cereza sin prototipo se encontraba en un 24,5%. Estos resultados permiten concluir que el dispositivo de mezclado automático demuestra una alta eficacia en el proceso de secado de café, incluso para variedades de grano Cereza o Natural.

Durante las pruebas de validación, se detectó un fallo importante en el sistema de movimiento del dispositivo, que provocó el desgaste prematuro de algunas piezas y el sobreesfuerzo del motor. Esta situación afectó al rendimiento previsto del sistema, lo que obligó a realizar ajustes temporales en el diseño para estabilizar el movimiento y garantizar un funcionamiento correcto durante las pruebas. Además, hubo que ajustar el dispositivo para adaptarlo a las condiciones del secadero, que presentaba varias irregularidades en su superficie. Estas no uniformidades representaron un reto considerable para el funcionamiento óptimo del dispositivo, ya que complicaron su funcionamiento y requirieron modificaciones adicionales del sistema. A pesar de estas dificultades, los ajustes realizados permitieron que el dispositivo siguiera realizando pruebas, aunque se identificaron áreas que aún deberán mejorarse en futuras versiones para garantizar un funcionamiento más eficiente y estable.

En conclusión, en relación con el dispositivo y su finalidad, se puede afirmar que este primer prototipo representa una alternativa viable para el proceso de secado del café, especialmente por tratarse de un sistema innovador con pocos precedentes similares en el mercado. Las pruebas realizadas en condiciones reales demostraron que el dispositivo contribuye a mejorar la eficiencia del proceso, especialmente cuando se realizan mezclas frecuentes. El principal objetivo de esta mezcla es garantizar una distribución homogénea y un movimiento constante del grano de café, lo que favorece una mayor uniformidad en el proceso de secado. Además, al aumentar la frecuencia de mezclado, se acelera notablemente el proceso de reducción de humedad del grano, optimizando el tiempo de secado y garantizando una calidad consistente en el producto final.

CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

Esta investigación ha logrado avances significativos en el apoyo al proceso de secado de granos de café. Sin embargo, es importante considerar investigaciones adicionales sobre este prototipo o en diseños similares, para explorar posibles mejoras, especialmente en el aspecto mecánico. Esto permitiría, por ejemplo, rediseñar el sistema de movimiento para hacerlo más eficiente y reducir el esfuerzo sobre el motor, así como el desgaste de las piezas. Dado que el sistema actual cuenta con un solo eje de gran longitud, su movimiento resulta menos eficiente y requiere un esfuerzo considerable por parte del motor, lo que incrementa el desgaste. Una opción a considerar en futuros rediseños sería la incorporación de puntos de apoyo adicionales en los extremos del prototipo. Estos puntos de soporte, situados a mayor altura, permitirían distribuir mejor el peso del sistema, aligerando la carga y facilitando un desplazamiento más fluido y con menor fricción. Esta mejora estructural no solo optimizaría el funcionamiento del prototipo, sino que también prolongaría la vida útil de sus componentes.

La implementación de un sistema de control a través de una aplicación móvil resulta una opción viable y prometedora para optimizar la interacción usuario-prototipo de forma intuitiva y eficiente. Esta solución permitiría al usuario ajustar de manera remota parámetros clave, como los tiempos de mezclado y los periodos de reposo, adaptando el funcionamiento del prototipo a las necesidades específicas del proceso de secado. Para llevar a cabo esta mejora, sería conveniente colocar el microcontrolador fuera de la caja de control, ya que esta puede interferir con la calidad de la conexión Wi-Fi o Bluetooth necesaria para el control remoto. Esto se podría lograr extendiendo el cableado de conexión y asegurando que la instalación sea accesible y sencilla, facilitando futuras configuraciones o ajustes en el sistema.

La implementación de paneles solares para alimentar el circuito eléctrico del prototipo representa una alternativa interesante para hacer uso de energías renovables en el contexto de la caficultura. Esto permitiría no solo aprovechar la energía solar para el secado del grano, sino también para alimentar el sistema de mezclado durante este proceso, promoviendo así una operación más sostenible y eficiente. Integrar fuentes de energía solar reduciría la dependencia de fuentes convencionales de electricidad y contribuiría a disminuir el impacto ambiental asociado al consumo energético en este tipo de actividades.

En situaciones donde la marquesina no se encuentra en condiciones óptimas, especialmente si la cama presenta desniveles o irregularidades, podría ser beneficioso implementar un sistema de aspas retráctiles. Estas aspas tendrían la capacidad de retraerse hacia arriba al detectar un aumento en el esfuerzo durante

el proceso de mezclado, causado por factores como una malla desajustada o una superficie de secado mal nivelada. Este mecanismo ayudaría a reducir el desgaste y prevenir posibles fracturas en las piezas, al tiempo que disminuiría el esfuerzo excesivo en el motor, prolongando la vida útil del sistema y mejorando la eficiencia operativa.

Es recomendable realizar un mantenimiento preventivo en el secadero solar o marquesina, asegurando que la superficie de la cama esté bien nivelada y que la malla se encuentre correctamente tensada. Esto no solo optimizaría el movimiento del prototipo, facilitando un desplazamiento más fluido y sin obstrucciones, sino que también contribuiría a extender la vida útil del dispositivo al reducir el desgaste de sus componentes. De esta manera, se mejorarían tanto la eficiencia del proceso como la durabilidad del equipo, generando mejores resultados en el secado del café.

Para futuras versiones del prototipo, está previsto introducir mejoras significativas en el sistema de movimiento con el fin de optimizar su rendimiento y estabilidad. Una de las principales propuestas es la incorporación de poleas en las esquinas de la marquesina, que estarían conectadas por una correa unida al soporte de la pala. Este diseño permitiría que ambos extremos del dispositivo se movieran simultáneamente, garantizando un desplazamiento más uniforme y coordinado. Además, se considera que el uso de un eje liso en la parte central del soporte proporcionaría mayor estabilidad al sistema, reduciendo el impacto del peso del dispositivo y minimizando posibles desequilibrios durante su funcionamiento. Además, se sugiere sustituir los raíles actuales por raíles lineales ajustados específicamente al diseño del prototipo. Este cambio facilitaría un desplazamiento más preciso y fluido, mejorando la eficiencia y asegurando un movimiento más limpio y controlado. Estas modificaciones no solo aumentarían la robustez del sistema, sino que también contribuirían a un secado más uniforme y eficiente de los granos de café.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. G. García Díaz, S. A. Gordillo Rodríguez, y others, «Impacto de las prácticas sostenibles en la producción de café colombiano y su participación en el mercado mundial», B.S. thesis, Especialización en Gerencia Logística, 2023.
- [2] A.-F. SOLIS-PINO, D.-A. REVELO-LUNA, D.-A. CAMPO-CEBALLOS, y C.-A. GAVIRIA-LÓPEZ, «Correlation of foliar chlorophyll content of the specie Coffea arabica with spectral indices in images», *Biotechnol. En El Sect. Agropecu. Agroindustrial*, vol. 19, n.º 2, pp. 57-68, 2021.
- [3] L. C. C. Fernández y C. A. O. Pulido, «IMPLEMENTAR EN EL SECTOR CAFETERO, PARA MEJORAR LA ECONOMÍA DEL PAÍS.».
- [4] V. Osorio, «La calidad del Café», *Libr. Man.*, 2021.
- [5] P. C. González, «Desplazamiento forzado por conflicto armado: una década de investigación en el Eje Cafetero», *Rev. Análisis Juríd.-Político*, vol. 1, n.º 2, pp. 135-145, 2019.
- [6] O. L. Ocampo-López y L. M. Alvarez-Herrera, «Tendencia de la producción y el consumo del café en Colombia», *Apunt. CENES*, vol. 36, n.º 64, pp. 139-165, 2017.
- [7] J. A. M. Delacruz, «Caracterización económica del sector cafetero en el departamento del Cauca, Colombia, 2009-2014», *Perspectivas*, vol. 6, n.º 1, pp. 79-92, 2014.
- [8] D. X. S. Tróchez, L. B. P. Ordoñez, G. de la Torre Solarte, y F. U. de Popayán, «El sector cafetero en el suroccidente Colombiano, referencia de liderazgo empresarial del Cauca.».
- [9] H. F. Calderón Calderón y others, «La caficultura convencional, tradicional, especial frente a la nueva tendencia “café de alta calidad con enfoque sostenible” en la zona que comprende el nuevo eje de la caficultura en Colombia: Huila, Cauca y Nariño.».
- [10] E. C. Correa Hernando, V. Diaz Barcos, B. Diezma Iglesias, C. Echeverri, J. Hoyos García, y R. Oteros, «Cafés especiales: el caso de Cauca en Colombia», *Fórumcafé Fórum Cult. Café*, n.º 64, pp. 26-29, 2016.
- [11] A. Gaitán, ?«` Una taza de café? Colombia, tierra de café y caficultores», Imprenta Nacional de Colombia, 2018.
- [12] G. I. PUERTA, «Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café», 1999.

- [13] C. Oliveros, C. Ramírez, J. SANZ, A. PEÑUELA, y J. PABON, «Secado solar y secado mecánico del café», Cenicafé, 2013.
- [14] A. VILLEGAS, H. POSADA, C. PEREZ, C. TABARES, y L. SAMPER, «Regionalización de la calidad del café de Colombia: denominaciones de origen como estrategia de valor agregado», Cenicafé, 2013.
- [15] J. Jurado, E. Montoya, C. Oliveros, y J. García, «Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café», 2009.
- [16] C. P. Lara, «Efecto del proceso de secado en las características físico-químicas y sensoriales de café especial (var. Pacamara)», PhD Thesis, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2016., 2016.
- [17] V. de J. Franco Bayona, «Estudio de variables poscosecha que impactan la calidad de cafés naturales variedad Arábica, procesados en Santa Marta, Colombia», PhD Thesis, Bogotá-Ingeniería-Maestría en Ingeniería-Ingeniería Agrícola.
- [18] J. M. Gutiérrez-Flórez y H. Copete-López, «Hacia la mejora del secado mecánico del café en Colombia», *TecnoLógicas*, 2009.
- [19] C. Oliveros, C. Ramirez, J. Sanz, y A. Peñuela, «Secador solar de túnel para café pergamino», Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), 2013.
- [20] G. Roa *et al.*, «Beneficio ecológico del café». 1999.
- [21] L. V. Mendoza y C. G.-M. Aparicio, «Impactos socioeconómicos de la producción de café en Colombia», *Rev. Científica UCSA*, vol. 10, n.º 2, pp. 43-53, 2023.
- [22] G. Puerta, «Calidad en taza de las variedades de coffea arabica L cultivadas en colombia», 1998.
- [23] H. A. Cortina Guerrero, J. R. Acuña Zornosa, M. del P. Moncada Botero, J. C. Herrera Pinilla, y D. M. Molina Vinasco, «Variedades de café : Desarrollo de variedades». 2013.
- [24] N. T. Abad Rios, «APROVECHAMIENTO DEL CAFE EN SUS DIFERENTES ETAPAS PARA DIVERSIFICAR LA OFERTA DE PRODUCTOS A BASE DE CAFE EN LA TIENDA PAPA CAFE DEL CANTON OLMEDO, 2023», PhD Thesis, 2023.

- [25] H. J. Anaya Cabrera y others, «Minimización del impacto ambiental de las aguas mieles del café y aprovechamiento de su potencial energético en la finca la planada en la vereda del pindio del municipio de Almaguer, cauca.».
- [26] C. J. Colqui Aguero y M. E. Escobar Bendezu, «Optimización de la extracción y microencapsulación de compuestos fenólicos de pergamino de café (*Coffea arábica*)», 2023.
- [27] V. Ardila Rivero y others, «Impactos ambientales generados en la producción de café pergamino seco», 2023.
- [28] G. I. Puerta, «Cómo garantizar la buena calidad de la bebida del café y evitar los defectos», Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), 2001.
- [29] L. A. D. Guambi, *Post-cosecha y calidad del café arábigo*. INIAP Archivo Historico, 2004.
- [30] A. L. Acuña, «Sistema automático de secado de granos de café accionado con energía solar», ago. 2019, Accedido: 19 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/91264785/Sistema_autom%C3%A1tico_de_secado_de_granos_de_caf%C3%A9_accionado_con_energ%C3%ADa_solar
- [31] R. Harold y C. Kevin, «Desarrollo de un prototipo secador solar de café tipo parabólico semi automatizado para 50kg: finca Villa Carolina, Buesaco, Nariño».
- [32] J. S. Muñoz Cadena y F. A. Ruales Loayza, «Diseño de un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora en el Ecuador», PhD Thesis, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/57223/1/T-113113%20%20Mu%C3%B1oz%20-%20Ruales.pdf>
- [33] O. P. S. Polania y J. P. G. Benavides, «PROTOTIPO SECADO Y VOLTEO DE CAFÉS ESPECIALES APROVECHANDO LAS ENERGÍAS RENOVABLES».
- [34] M. Bunge, *La ciencia. Su método y su filosofía*. 2013.
- [35] J. H. C. Rojas, «Revisión y análisis de diseño mecatrónico para diseño curricular transdisciplinario de programas de ingeniería multidisciplinares», *Sci. Tech.*, vol. 18, n.º 1, Art. n.º 1, abr. 2013, doi: 10.22517/23447214.8253.
- [36] S. R. Santana, L. Antonelli, y P. Thomas, «Evaluación de metodologías para la validación de requerimientos».

- [37] J. A. Moral-Muñoz, E. Herrera-Viedma, A. Santisteban-Espejo, y M. J. Cobo, «Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review», *Prof. Inf.*, vol. 29, n.º 1, 2020.
- [38] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, y W. M. Lim, «How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines», *J. Bus. Res.*, vol. 133, pp. 285-296, 2021.
- [39] M. Aria y C. Cuccurullo, «bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis», *J. Informetr.*, vol. 11, n.º 4, pp. 959-975, 2017.
- [40] R. A. Rojas Medina y R. A. Muñoz Callejas, «Propuesta para realizar análisis bibliométricos utilizando el paquete bibliometrix».
- [41] H. Derviş, «Bibliometric analysis using bibliometrix an R package», *J. Scientometr. Res.*, vol. 8, n.º 3, pp. 156-160, 2019.
- [42] J. Allaire, «RStudio: integrated development environment for R», *Boston MA*, vol. 770, n.º 394, pp. 165-171, 2012.
- [43] F. Parra, A. Jacobs, y L. L. Trevino, «Shippy Express: Augmenting accounting education with Google Sheets», *J. Account. Educ.*, vol. 56, p. 100740, 2021.
- [44] V. K. Singh, P. Singh, M. Karmakar, J. Leta, y P. Mayr, «The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis», *Scientometrics*, vol. 126, pp. 5113-5142, 2021.
- [45] J. Zhang, Q. Yu, F. Zheng, C. Long, Z. Lu, y Z. Duan, «Comparing keywords plus of WOS and author keywords: A case study of patient adherence research», *J. Assoc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 67, n.º 4, pp. 967-972, 2016.
- [46] A. F. Solis Pino, P. H. Ruiz, V. Agredo-Delgado, A. Mon, y C. A. Collazos, «Análisis bibliométrico del panorama de la investigación de la interacción humano-computadora en Iberoamérica», *TecnoLógicas*, vol. 27, n.º 59, p. e2907, mar. 2024, doi: 10.22430/22565337.2907.
- [47] «Economía-Cafetera-No.-30_Web.pdf». Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2019/12/Econom%C3%ADa-Cafetera-No.-30_Web.pdf
- [48] T. Kufa, A. Ayano, A. Yilma, T. Kumela, y W. Tefera, «The contribution of coffee research for coffee seed development in Ethiopia», *J. Agric. Res. Dev.*, vol. 1, n.º 1, pp. 009-016, 2011.

- [49] S. Krishnan *et al.*, «Vulnerability of coffee (*Coffea* spp.) genetic resources in the United States», *Genet. Resour. Crop Evol.*, vol. 68, n.º 7, pp. 2691-2710, 2021.
- [50] R. Bertoglio, C. Corbo, F. M. Renga, y M. Matteucci, «The digital agricultural revolution: a bibliometric analysis literature review», *Ieee Access*, vol. 9, pp. 134762-134782, 2021.
- [51] L. Georghiou, «Global cooperation in research», *Res. Policy*, vol. 27, n.º 6, pp. 611-626, 1998.
- [52] J. Tello Gamarra, R. Machado Leo, A. M. Silva Avila, y J. Wendland, «Innovation studies in Latin America: a bibliometric analysis», *J. Technol. Manag. Innov.*, vol. 13, n.º 4, pp. 24-36, 2018.
- [53] A. Gómez-Pérez, M. Fernández-López, y O. Corcho, *Ontological Engineering: with examples from the areas of Knowledge Management, e-Commerce and the Semantic Web*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [54] H. Sharma, «A detail chemistry of coffee and its analysis», *Coffee-Prod. Res.*, vol. 10, 2020.
- [55] R. S. Cabrera y M. Á. T. Rodríguez, «Mapas bibliométricos como herramienta en la organización y análisis en ciencia», *Rev. Educ. Bioquímica*, vol. 34, n.º 4, pp. 93-97, 2017.
- [56] R. Alkhamash, «Bibliometric, network, and thematic mapping analyses of metaphor and discourse in COVID-19 publications from 2020 to 2022», *Front. Psychol.*, vol. 13, p. 1062943, 2023.
- [57] F. Kulapichitr, C. Borompichaichartkul, M. Fang, I. Suppavorasatit, y K. R. Cadwallader, «Effect of post-harvest drying process on chlorogenic acids, antioxidant activities and CIE-Lab color of Thai Arabica green coffee beans», *Food Chem.*, vol. 366, p. 130504, 2022.
- [58] A. Jiménez Barrueta, J. E. Pardo Saldaña, y S. Valverde Lara, «Producción de café soluble por el método de liofilización», 2017.
- [59] M. Magnani *et al.*, «Molecular identification of *Aspergillus* spp. isolated from coffee beans», *Sci. Agric.*, vol. 62, pp. 45-49, 2005.
- [60] B. Iamanaka, A. Teixeira, A. Teixeira, M. Copetti, N. Bragagnolo, y M. Taniwaki, «Reprint of “The mycobiota of coffee beans and its influence on the coffee beverage”», *Food Res. Int.*, vol. 61, pp. 33-38, 2014.
- [61] B. Louman, *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*, vol. 46. CATIE, 2001.

- [62] L. S. Torres-Valenzuela, K. G. Martínez, J. A. Serna-Jimenez, y M. C. Hernández, «Secado de pulpa de café: condiciones de proceso, modelación matemática y efecto sobre propiedades fisicoquímicas», *Inf. Tecnológica*, vol. 30, n.º 2, pp. 189-200, 2019.
- [63] J. Nájera, «Integración de pequeños agricultores en cadenas globales de valor: Desafíos y oportunidades dentro de la demanda global actual», *Tec Empres.*, vol. 11, n.º 2, p. ág-7, 2017.
- [64] R. Fabre, D. Egret, J. Schöpfel, y O. Azeroual, «Evaluating the scientific impact of research infrastructures: The role of current research information systems», *Quant. Sci. Stud.*, vol. 2, n.º 1, pp. 42-64, 2021.
- [65] H. F. Leonel, I. A. Delgado-Vargas, A. A. Molina-Moreno, y Á. M. Cadena-Pastrana, «Tipificación de fincas cafeteras para la implementación de tecnologías de adaptación al cambio climático, Municipio de Buesaco (Nariño, Colombia)», *Inf. Tecnológica*, vol. 34, n.º 3, pp. 31-42, 2023.
- [66] C. R. Vidal, *Diseño mecánico con SolidWorks 2015*. Ra-Ma Editorial, 2016.
- [67] C. Bermúdez Rojas y M. Rojas Bedoya, «La tecnificación y sostenibilidad en la finca La Macarena en el municipio de Betulia Antioquia: un estudio de caso», B.S. thesis, Escuela de Economía, Administración y Negocios, 2024.
- [68] O. R. Lazo y L. R. Rojas, «Diseño asistido por computador», *Ind. Data*, vol. 9, n.º 1, pp. 7-15, 2006.
- [69] C. OLIVEROS, U. Lopez, J. SANZ, y C. RAMIREZ, «Nuevo rastrillo para revolver café en el proceso de secado al sol», Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), 2013.
- [70] «Rastrillo 2.0 | Innovakit». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.innovakit.com/product-page/rastrillo-2-0>
- [71] «Home», Innovakit. Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.innovakit.com>
- [72] D. M. Cruz, *Aprender impresión 3D para makers con 100 ejercicios prácticos*. Marcombo, 2019.
- [73] E. Pm, «PM450 - Medidor Avanzado de Humedad en Granos y Semillas».

ANEXOS

ANEXO 1. Código fuente de programación del controlador.

```
// ENTRADAS Y SALIDAS
const int motor1 = 26;
const int motor2 = 27;
const int start = 14;
const int stop = 12;
const int modoAuto = 18;
const int modoManual = 19;
const int motor1Derecha = 32;
const int motor2Izquierda = 33;
const int finalCarrera1 = 23;
const int finalCarrera2 = 22;
const int ledVerde = 5;
const int ledRojo = 4;

// VARIABLES DE ESTADO
bool autoModo = false;
bool manualModo = false;
bool motor1Run = false;
bool motor2Run = false;
bool sistemaRun = false;
bool reposo = false; // Variable para reposo
unsigned long startMillis = 0; // Para almacenar el tiempo de inicio
const unsigned long runTime = 900000; // Movimiento de 15 min
const unsigned long waitTime = 1500000; // Tiempo de espera de 25 min

void setup() {
    // Salida para motores y LEDs
    pinMode(motor1, OUTPUT);
    pinMode(motor2, OUTPUT);
    pinMode(ledVerde, OUTPUT);
    pinMode(ledRojo, OUTPUT);

    // Pines de entrada para pulsadores y finales de carrera
    pinMode(start, INPUT_PULLUP);
    pinMode(stop, INPUT_PULLUP);
    pinMode(modoAuto, INPUT_PULLUP);
    pinMode(modoManual, INPUT_PULLUP);
    pinMode(motor1Derecha, INPUT_PULLUP);
```

```

pinMode(motor2Izquierda, INPUT_PULLUP);
pinMode(finalCarrera1, INPUT_PULLUP);
pinMode(finalCarrera2, INPUT_PULLUP);

// Apagar motores y LEDs al inicio
digitalWrite(motor1, HIGH);
digitalWrite(motor2, HIGH);
digitalWrite(ledVerde, HIGH);
digitalWrite(ledRojo, HIGH);
}

void loop() {
  // Verifica si está en modo manual o modo automático
  if (digitalRead(modosAuto) == LOW) {
    autoModo = true;
    manualModo = false;
  } else if (digitalRead(modosManual) == LOW) {
    autoModo = false;
    manualModo = true;
  }

  // Modo automático
  if (autoModo) {
    if (digitalRead(start) == LOW && !sistemaRun) {
      sistemaRun = true;
      startMillis = millis(); // Captura el tiempo de inicio
      digitalWrite(ledVerde, LOW); // LED inicio indica sistema encendido
      digitalWrite(ledRojo, HIGH); // LED paro indica sistema apagado
      motor1Run = true;
      digitalWrite(motor1, LOW); // Encender motor 1 (giro izq)
    }

    if (digitalRead(stop) == LOW) {
      stopSystem(); // Llamar a la función para detener el sistema
    }

    // Modo automático: funcionalidad durante 15 minutos
    if (sistemaRun) {
      unsigned long currentMillis = millis();

      if (currentMillis - startMillis < runTime) {
        // Control de motores basado en los finales de carrera durante 15 minutos
        if (motor1Run && digitalRead(finalCarrera1) == LOW) {

```

```

        motor1Run = false;
        motor2Run = true;
        digitalWrite(motor1, HIGH); // Apagar motor 1 (giro izq)
        digitalWrite(motor2, LOW); // Encender motor 2 (giro der)
    } else if (motor2Run && digitalRead(finalCarrera2) == LOW) {
        motor2Run = false;
        motor1Run = true;
        digitalWrite(motor2, HIGH); // Apagar motor 2 (giro der)
        digitalWrite(motor1, LOW); // Encender motor 1 (giro izq)
    }
} else if (currentMillis - startMillis >= waitTime) {
    // Reinicia el ciclo cada hora
    startMillis = millis(); // Reinicia el tiempo de inicio
    motor1Run = true;
    motor2Run = false;
    digitalWrite(motor1, LOW); // Encender motor giro izq
    digitalWrite(motor2, HIGH); // Asegurar motor giro der
} else {
    // Apaga los motores y empieza el tiempo de espera si se alcanzan los 15 minutos
    digitalWrite(motor1, HIGH);
    digitalWrite(motor2, HIGH);
}
}
}

// Modo manual
if (manualModo) {
    if (digitalRead(start) == LOW) {
        digitalWrite(ledVerde, LOW); // LED inicio encendido
        digitalWrite(ledRojo, HIGH); // LED paro apagado
        sistemaRun = true;
    }

    if (digitalRead(stop) == LOW) {
        stopSystem(); // Llamar a la función para detener el sistema
    }

    // Control manual de los giros
    if (sistemaRun) {
        if (digitalRead(motor1Derecha) == LOW && digitalRead(finalCarrera1) == HIGH) {
            digitalWrite(motor1, LOW); // Motor gira a la izquierda manualmente
        } else {
            digitalWrite(motor1, HIGH); // Para motor si se suelta el botón
        }
    }
}

```

```

    }

    if (digitalRead(motor2Izquierda) == LOW && digitalRead(finalCarrera2) == HIGH) {
        digitalWrite(motor2, LOW); // Motor gira a la derecha manualmente
    } else {
        digitalWrite(motor2, HIGH); // Parar motor 2 si se suelta el botón
    }
}
}
}

// Función para parar el sistema en cualquier modo
void stopSystem() {
    digitalWrite(motor1, HIGH); // Apagar motor giro izq
    digitalWrite(motor2, HIGH); // Apagar motor giro der
    digitalWrite(ledVerde, HIGH); // Apagar LED inicio
    digitalWrite(ledRojo, LOW); // Encender LED paro
    motor1Run = false;
    motor2Run = false;
    sistemaRun = false;
    reposo = false; // Asegurar que la espera también se detenga
}

```