

Determinación de la efectividad de un tambor rotatorio para el secado de café
basado en un colector solar y energizado por paneles solares

Josué Samir Bravo Coral

Isabella Suarez López

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto

2026

Determinación de la efectividad de un tambor rotatorio para el secado de café
basado en un colector solar y energizado por paneles solares

Josué Samir Bravo Coral

Isabella Suarez López

Proyecto de trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería
Electrónica en la Modalidad Estancia en Línea

Asesor

Camilo Arturo Lagos Mora

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto

2026

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este proyecto. En primer lugar, a nuestras familias, por su apoyo constante, paciencia y confianza durante todo el proceso de formación. A nuestro director de tesis y docentes, quienes con su guía y exigencia nos brindaron las herramientas necesarias para crecer académica y personalmente. A nuestros compañeros y amigos, por compartir experiencias, conocimientos y momentos que enriquecieron este camino. De manera especial, agradecemos a la Universidad CESMAG, por brindarnos el espacio académico, los recursos y el acompañamiento que hicieron posible nuestra formación profesional y la realización de este trabajo. Finalmente, agradecemos a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a que este trabajo llegara a buen término.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, quienes han sido el pilar fundamental en nuestra formación. Su amor, paciencia y apoyo incondicional nos dieron la fuerza necesaria para superar cada reto y continuar adelante, incluso en los momentos más difíciles. A nuestros padres, por enseñarnos el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad, y por ser ejemplo constante de dedicación y entrega. A nuestros hermanos y seres queridos, por acompañarnos con palabras de aliento y gestos de cariño que hicieron más llevadero este camino. A nuestros profesores y compañeros, quienes compartieron con nosotros conocimientos, experiencias y aprendizajes que enriquecieron nuestra vida académica y personal. También dedicamos este logro a todas las personas que creyeron en nosotros, que nos motivaron a no rendirnos y que nos recordaron que cada paso, por pequeño que fuera, nos acercaba a la meta. Este trabajo es fruto de un esfuerzo compartido, y lo ofrecemos con gratitud y orgullo a quienes han sido parte de nuestra historia y de este proceso de crecimiento.

Contenido

Introducción	17
1. El problema de investigación.....	19
1.1 Objeto o tema de investigación.....	19
1.2 Línea Investigación.....	19
1.3 Sub-línea de investigación	19
1.4 Planteamiento o Descripción del Problema	19
1.5 Formulación del Problema.....	21
1.6 Objetivos.....	21
1.6.1 Objetivo General	21
1.6.2 Objetivos Específicos	21
1.7 Justificación	21
1.8 Delimitación.....	23
2. Tópicos del Marco Teórico	25
2.1 Antecedentes	25
2.1.1 Sistema automatizado para el control de la temperatura y humedad relativa de un secador solar de café.	25
2.1.2 Prototipo secador rotatorio de café especial alimentado con energía solar, aplicado a una finca cafetera en el municipio Arboleda del corregimiento de Santa Marta-Nariño	26
2.1.3 Secadores solares modulares de café: una alternativa sostenible, automatizada y de mayor durabilidad	27
2.1.4 Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de café en un secador solar activo tipo invernadero.....	28
2.1.5 Acelerando el secado del café con innovación: Evaluación del rendimiento de un secador híbrido alimentado con energía solar y biomasa controlado por sensores para el secado de café en Uganda 29	29
2.2 Enunciados de los supuestos teóricos	30
2.2.1 Humedad del grano de café	30

2.2.2	Proceso de secado.....	30
2.2.3	Transferencia de calor y de masa en el proceso de secado.....	31
2.2.4	Secado solar.....	32
2.2.5	Mecánica del tambor rotatorio.....	33
2.2.6	Instrumentación electrónica y adquisición de datos.....	33
2.2.7	Control automático del flujo del aire.....	33
2.2.8	Energía basada en fuentes renovables.....	34
2.3	Definición de variables.....	34
2.3.1	Variables independientes.....	35
2.3.2	Variables dependientes.....	35
2.3.3	Variables de control.....	36
2.3.4	Instrumentación y procedimiento de medición.....	37
2.4	Hipótesis de investigación.....	38
2.5	Modelos matemáticos de secado.....	38
2.5.1	Cinética de secado del café.....	41
2.5.2	Justificación de la selección del modelo de Newton-Lewis.....	42
3.	Metodología.....	44
3.1	Secuencia Metodológica.....	44
3.1.1	Desarrollar un sistema para la circulación de aire y la recolección de energía solar. 45	
3.1.2	Crear una plataforma integrada que registre datos en tiempo real y monitore el control del proceso de secado para mejorar eficiencia.....	47
3.1.3	Realizar pruebas para medir el rendimiento del secador y llevar a cabo un análisis de costo-beneficio que demuestre su viabilidad a largo plazo.....	48
3.1.4	Universo.....	50
3.1.5	Muestra.....	50
3.2	Técnicas de recolección de información.....	51

3.2.1	Validez de la técnica	52
3.2.2	Confiabilidad de la técnica	52
3.3	Instrumentos de recolección de información	53
3.4	Procesamiento de información.....	54
4.	Resultados	56
4.1	Descripción general del prototipo.....	56
4.1.1	Requerimientos del sistema	57
4.2	Subsistema mecánico	58
4.2.1	Sistema de transmisión y accionamiento.....	58
4.2.2	Cálculo del torque del sistema de accionamiento.....	62
4.2.3	Verificación del torque requerido para mover el tambor con carga.....	66
4.2.4	Construcción mecánica del tambor rotatorio.....	70
4.3	Subsistema térmico de captación solar	73
4.3.1	Cálculos térmicos	73
4.3.2	Construcción colector solar	77
4.4	Subsistema fotovoltaico	79
4.4.1	Cálculos energéticos	79
4.5	Subsistema electrónico y de control	83
4.5.1	Selección de hardware para el sistema electrónico.....	83
4.5.2	Calibración de los sensores	91
4.5.3	Placa de control	95
4.5.4	Placa de Potencia.....	98
4.5.5	Diseño y construcción de carcasa.....	102
4.5.6	Programación ESP32.....	105
4.5.7	Plataforma de visualización y registro de datos en Python	107
4.5.8	Plataforma de visualización y registro de datos en Python	109

4.6	Pruebas individuales de los subsistemas.....	110
4.6.1	Prueba del colector solar	110
4.6.2	Pruebas del sistema electrónico y de control.....	117
4.6.3	Pruebas tambor rotatorio	131
4.6.4	Pruebas del sistema fotovoltaico	135
4.7	Pruebas experimentales del sistema del secado	139
4.7.1	Procedimiento experimental.....	140
4.7.2	Organización de las pruebas experimentales	140
4.7.3	Resultados experimentales	141
4.7.4	Representación gráfica de los resultados.....	141
4.7.5	Curva de secado del sistema.....	144
4.7.6	Análisis de regresión	145
4.7.7	Modelo exponencial ajustado	145
4.7.8	Cálculo de la constante de secado	148
4.7.9	Modelo matemático final del proceso de secado.....	152
4.7.10	Modelo matemático del proceso de secado	156
4.7.11	Validación del modelo matemático.....	161
4.8	Evaluación del modelo y análisis del error	164
4.8.1	Cálculo del error del modelo	164
4.8.2	Determinación de la eficacia del modelo.....	166
5.	Análisis de resultados	168
5.1	Introducción	168
5.2	Métodos tradicionales de secado de café.....	168
5.2.1	Secado en patio.....	168
5.2.2	Secado mecánico a gas	169
5.3	Resultados del sistema de secado propuesto.....	169

5.4	Análisis de los cálculos del proceso.....	170
5.4.1	Velocidad de secado	170
5.4.2	Energía consumida en cada método	172
5.5	Comparación entre métodos de secado.....	175
5.5.1	Tiempo de secado	175
5.5.2	Consumo energético	176
5.5.3	Control del proceso.....	177
5.5.4	Uniformidad del secado.....	178
5.6	Determinación de la efectividad del sistema	179
5.6.1	Evaluación de la eficacia del sistema	180
5.7	Limitaciones del estudio	183
5.8	Conclusión del análisis	184
5.9	Resultado final de efectividad del sistema.....	185
5.10	Análisis costo beneficio respecto al secado en patio y secado a gas	187
5.10.1	Costo operativo de los sistemas de secado	187
A)	Costo operativo del secado a gas	187
B)	Costo operativo del prototipo de tambor rotatorio solar	188
C)	Costo operativo del secado en patio.....	189
5.10.2	Inversión inicial de los sistemas de secado.....	189
A)	Inversión inicial del secado a gas.....	190
B)	Inversión inicial del secado en patio	190
C)	Inversión inicial del prototipo	190
5.10.3	Análisis de Costo Beneficio	191
5.10.4	Conclusión del análisis.....	192
6.	Conclusiones	193
7.	Recomendaciones	195

7.1	Recomendaciones para la mejora del sistema.....	195
7.1.1	Recomendaciones de mejora en el tambor rotatorio.....	195
7.1.2	Recomendaciones de mejora en el colector solar	196
7.1.3	Recomendaciones en el sistema de control y monitoreo	197
7.1.4	Recomendaciones en el sistema energético.....	197
7.1.5	Recomendaciones para trabajos futuros	198
	Referencias.....	199
	Anexos	202
	Anexo A - Código programación ESP32	202
	Anexo B - Código interfaz Python.....	208
	Anexo C - Modelo Ajustado Python.....	213
	Anexo D - Planos y diseño mecánico del tambor rotatorio	216
	D.1 Diseño mecánico	216
	D.2 Planos diseño mecánico para el tambor en Solid Works	216
	D.3 Placa lateral del tambor	219
	D.4 Cilindro perforado del tambor.....	220
	D.5 Aletas internas del tambor	220
	D.6 Cruceta estructural del eje.....	221
	D.7 Eje de rotación del tambor.....	222
	D.8 Escotilla de descarga del tambor	223
	D.9 Bandeja deslizante de recolección.....	223
	D.10 Compuerta de carga y descarga del café	224
	D.11 Estructura del soporte del sistema	225
	Anexo E - Diseño y planos del colector solar.....	226
	E.1 Diseño colector solar	226
	E.2 Planos del colector solar	226

E.3 Estructura de madera	229
E.4 Lamina de zinc.....	232
E.5 Vidrio	233
Anexo F - Diseño del subsistema fotovoltaico	234
F.1 Diseño fotovoltaico	234
F.2 Paneles solares.....	235
F.3 Baterías.....	236
F.4 Inversor	237

Lista de Figuras

Figura 1. Prototipo	26
Figura 2. Curva de secado para granos de café en secador solar	28
Figura 3. Prototipo base primer boceto	47
Figura 4. Esquema prototipo	57
Figura 5. Planos tambor rotatorio	217
Figura 6. Planos tambor rotatorio	217
Figura 7. Planos tambor rotatorio	218
Figura 8. Planos tambor rotatorio	218
Figura 9. Placa lateral del tambor frontal.....	219
Figura 10. Placa lateral del tambor posterior	219
Figura 11. Cilindro interno perforado	220
Figura 12. Aletas internas del tambor	221
Figura 13. Crucetas estructurales para el eje	221
Figura 14. Eje de rotación.....	222
Figura 15. Escotilla en el cilindro perforado	223
Figura 16. Bandeja para la recolección de café	224
Figura 17. Compuerta para carga del café	224
Figura 18. Soporte del sistema.....	225
Figura 19. Sistema de transmisión del tambor.....	61
Figura 20. Diagrama del flujo de torque en el sistema de accionamiento del tambor rotatorio.....	66
Figura 21. Fabricación de la estructura metálica del prototipo.....	70
Figura 22. Construcción del cilindro perforado del tambor.....	71
Figura 23. Fabricación de la cruceta estructural del tambor.....	71
Figura 24. Instalación de las aletas internas.....	71
Figura 25. Integración del tambor con la estructura	72
Figura 26. Tambor rotatorio ensamblado	72
Figura 27. Plano del colector solar	227
Figura 28. Plano de la base y estructura del colector solar.....	228
Figura 29. Plano de la salida, entrada y tapa del colector solar	228

Figura 30. Plano de la lamina de zinc del colector solar	228
Figura 31. Lamina mdf	229
Figura 32. Lateral colector.....	230
Figura 33. Salida de aire colector solar.....	230
Figura 34. Entrada aire colector solar.....	231
Figura 35. Liston soporte vidrio.....	231
Figura 36. Tabla para dirigir el aire.....	232
Figura 37. Lamina de zinc	233
Figura 38. Vidrio	233
Figura 39. Base de madera colector.....	78
Figura 40. Base con lamina de zinc pintados de negro mas el ventilador	78
Figura 41. Base, lamina de zinc y vidrio	79
Figura 42. Diagrama sistema fotovoltaico	235
Figura 43. Datos de los paneles	236
Figura 44. Paneles solares Rampa	236
Figura 45. Baterías utilizadas en el sistema fotovoltaico.....	237
Figura 46. Inversor utilizado en el sistema fotovoltaico.....	238
Figura 47. Diagrama del sistema electrónico.....	84
Figura 48. Microcontrolador Esp32.....	86
Figura 49. Modulo MAX31861 – Sonda PT100	87
Figura 50. Modulo SHT31	88
Figura 51. Pantalla TFT	90
Figura 52. Ventilador PWM 4 pines	91
Figura 53. Curvas de calibración y análisis del error de los sensores PT100 y SHT31 utilizados en el sistema experimental de secado.....	94
Figura 54. Esquemático circuito electrónico	95
Figura 55. Diseño PCB placa de control.....	96
Figura 56. Visualización 3d placa control en Proteus.....	97
Figura 57. Diseño PCB de placa de control en baquelita	97
Figura 58. Montaje de componentes en baquelita	98
Figura 59. Diagrama circuito de potencia.....	99

Figura 60. Modulo lm2596	100
Figura 61. Esquemático circuito de potencia.....	100
Figura 62. Vista PCB circuito de potencia Proteus.....	101
Figura 63. Circuito de potencia en baquelita	101
Figura 64. Montaje lm2596 en placa de potencia.....	102
Figura 65. Diseño caja para placas de potencia y control en Tinkercad.....	103
Figura 66. Montaje placas de potencia y control en caja en impresión 3d.....	104
Figura 67. Módulos y placas en caja impresión 3d.....	104
Figura 68. Visualización de los datos en pantalla tft código esp32	106
Figura 69. Diagrama de flujo programación esp32	106
Figura 70. Visualización de los datos en plataforma Python	108
Figura 71. Datos recolectados a través de la plataforma Python	108
Figura 72. Diagrama de flujo de interfaz en Python.....	108
Figura 73. Montaje experimental del colector solar durante las pruebas de funcionamiento	112
Figura 74. Visualización de variables térmicas y de humedad durante la prueba	112
Figura 75. Variación de la temperatura del aire en el colector solar.....	113
Figura 76. Variación de la humedad del aire en la entrada y salida durante la prueba del colector.....	114
Figura 77. Verificación de voltajes de 5.2V y 12V LM2596	118
Figura 78. Compilación de código al ESP32 mediante cable usb-c	119
Figura 79. Asignación de IP para protocolo HTTP.....	119
Figura 80. Verificación de visualización de datos	119
Figura 81. Inmersión en agua calentada progresivamente.....	122
Figura 82. Respuesta de Temperatura con valores definidos del PID	122
Figura 83. Diagrama de flujo control PID	123
Figura 84. Respuesta sensor SHT31-1 a prueba de agua hervida.....	124
Figura 85. Respuesta sensor SHT31-1 a prueba de hielo	124
Figura 86. Respuesta sensor SHT31-2 a prueba de agua hervida.....	125
Figura 87. Respuesta sensor SHT31-2 a prueba de hielo	125
Figura 88. Visualización correcta de los datos de los sensores en la pantalla TFT	126

Figura 89. PWM cuando temperatura PT100 está por debajo de 45°C	127
Figura 90. PWM cuando temperatura PT100 está en 50°C calculado con PID	127
Figura 91. Conexión Python con la red mediante IP	128
Figura 92. Correcta visualización de los datos en la interfaz	128
Figura 93. Correcto almacenamiento de datos de la interfaz.....	129
Figura 94. Humedad inicial y final del café por prueba	142
Figura 95. Relación entre el tiempo de secado y la humedad final	142
Figura 96. Relación entre la temperatura promedio y el tiempo de secado	143
Figura 97. Curva de secado representativa del sistema	144
Figura 98. Estimación del contenido de humedad del café en función del tiempo	157
Figura 99. Comparación entre la curva experimental y la curva estimada por el modelo matemático.....	162
Figura 100. Diagrama de flujo modelo ajustado.....	167

Lista de tablas

Tabla 1 Sensores y variables	38
Tabla 2 Características técnicas del motorreductor utilizado en el sistema de accionamiento	59
Tabla 3. Consumo energético del sistema	80
Tabla 4. Comparación entre temperatura de referencia y mediciones de los sensores PT100 y SHT31	94
Tabla 5. Resultados experimentales del colector solar	112
Tabla 6. Registro de pruebas preliminares del tambor rotatorio	131
Tabla 7. Registro de pruebas del sistema fotovoltaico.....	135
Tabla 8. Resumen general de las pruebas	141
Tabla 9. Comparación entre la humedad experimental y la humedad estimada por el modelo de Newton-Lewis	162
Tabla 10. Error porcentual entre valores experimentales y valores estimados por el modelo.....	165
Tabla 11. Comparativa de energía externa	174
Tabla 12. Comparativa de tiempo de secado	176
Tabla 13. Comparación energética.....	176
Tabla 14. Datos de los sistemas de secado.....	177
Tabla 15. Costos componentes para el prototipo.	191

Introducción

El café constituye uno de los principales productos agrícolas del departamento de Nariño y representa una fuente fundamental de ingresos para numerosas comunidades rurales de la región. Dentro de su cadena productiva, el proceso de secado del grano de café para la obtención de café pergamino seco (CPS) es una etapa crítica, ya que influye directamente en la calidad física y sensorial del grano, en su estabilidad durante el almacenamiento y en su valor comercial.

En diversas investigaciones se han abordado el mejoramiento del secado de café mediante la incorporación de energía solar, ventilación forzada, instrumentación electrónica y estrategias de control automático. Estudios previos han demostrado que la automatización permite aumentar la estabilidad del proceso y mejorar la uniformidad del secado. Otros trabajos han resaltado que los secadores solares modulares y los sistemas activos con ventilación forzada contribuyen a disminuir el tiempo de secado, mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Investigaciones más recientes sobre secadores híbridos controlados por sensores evidencian que el monitoreo en tiempo real de las variables del proceso permite mantener condiciones internas más estables y obtener un producto final de mejor calidad. En conjunto, estos antecedentes muestran una tendencia clara hacia el desarrollo de sistemas de secado más eficientes, sostenibles y técnicamente controlables, lo cual fundamenta la pertinencia del presente proyecto.

Tradicionalmente, el secado del café se realiza en patios, marquesinas o mediante secadores mecánicos alimentados con gas, métodos que dependen de las condiciones climáticas o de fuentes energéticas externas y que presentan limitaciones en cuanto al control de variables como temperatura, humedad y flujo de aire. Estas condiciones pueden generar tiempos prolongados de secado, pérdidas por sobre fermentación o crecimiento microbiano, y una variabilidad considerable en la humedad final del producto.

En este contexto, el aprovechamiento de la energía solar mediante colectores térmicos, combinado con sistemas mecánicos como tambores rotatorios, surge como una alternativa sostenible para mejorar la eficiencia del proceso. La incorporación de tecnologías de instrumentación y control basadas en sistemas embebidos permite supervisar y regular de manera automática las variables críticas del secado, facilitando la obtención de un producto homogéneo y de mejor calidad.

A diferencia de estudios previos, el presente trabajo integra de manera conjunta el aprovechamiento de la energía solar mediante un colector térmico, el uso de un tambor rotatorio para mejorar la uniformidad del secado, la implementación de instrumentación electrónica para el monitoreo en tiempo real de variables críticas, y el análisis del proceso mediante modelamiento matemático y validación experimental. Esta integración permite no solo evaluar el desempeño del sistema, sino también comprender su comportamiento desde un enfoque ingenieril basado en la transferencia de calor y masa.

El presente proyecto tiene como objetivo la instrumentación electrónica y evaluación experimental de un secador solar de café basado en un tambor rotatorio, integrando sensores de temperatura y humedad, así como un sistema de control automático del flujo de aire. De esta manera, se busca determinar su efectividad frente a métodos tradicionales, evaluando parámetros como el tiempo de secado, la uniformidad del producto y la estabilidad térmica del sistema.

1. El problema de investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

El presente trabajo de grado tiene como objeto la evaluación experimental para determinar la efectividad de un secador solar con tambor rotatorio instrumentado electrónicamente para el secado de café, mediante la medición y control de variables como temperatura, humedad relativa y flujo de aire, con el fin de determinar su efectividad en comparación con métodos convencionales como el secado en patio y el secado a gas.

1.2 Línea Investigación

sistemas de automatización y control: La línea de sistemas de automatización y control de la Universidad CESMAG desarrolla procesos investigativos orientados al modelamiento, simulación, diseño, desarrollo y evaluación de algoritmos de control, sistemas de control, sistemas inteligentes, control de procesos industriales, sistemas embebidos, acondicionamiento y procesamiento de señales, robótica, domótica e inteligencia artificial. (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015)

1.3 Sub-línea de investigación

Control de procesos: Estudia el diseño e implementación de controladores que permitan regular las variables de un sistema o proceso con el fin de lograr un funcionamiento deseado, buscando mejorar la productividad y la eficiencia de los procesos, como también la reducción de costos de implementación y el impacto ambiental del mismo. Entre las temáticas que aborda la línea se encuentran el control en procesos industriales, sistemas inteligentes y control visual. (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015).

1.4 Planteamiento o Descripción del Problema

En muchas regiones cafeteras, el secado del grano continúa realizándose mediante métodos artesanales o semi tecnificados que dependen de la radiación solar directa y de condiciones ambientales variables. Esta dependencia genera procesos prolongados e impredecibles, que pueden afectar la calidad final del café y ocasionar pérdidas económicas para

los productores [1]. En particular, el control inadecuado de la humedad durante el secado puede favorecer deterioro microbiológico y afectar las propiedades sensoriales del grano [2].

La falta de control preciso sobre variables como la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del flujo dentro de los sistemas de secado contribuye a una transferencia de calor y masa poco eficiente, así como a una distribución no uniforme de la humedad entre los granos. Desde el punto de vista ingenieril, el secado es un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa, donde la eficiencia depende del gradiente térmico y del gradiente de concentración de humedad [3]. Una regulación inadecuada puede derivar en sobre secado de algunas zonas del lote y en humedad residual elevada en otras, incrementando el riesgo de deterioro durante el almacenamiento [2].

Aunque existen secadores mecánicos comerciales, muchos de ellos requieren combustibles fósiles o biomasa como fuente energética, lo que implica mayores costos operativos y emisiones contaminantes [1]. Además, los sistemas industriales de secado suelen representar inversiones elevadas, lo que limita su adopción por pequeños y medianos productores [4].

En este contexto, resulta necesario investigar alternativas tecnológicas que combinen el aprovechamiento de energías renovables con sistemas de instrumentación y control accesibles. El uso de colectores solares térmicos para el calentamiento del aire, junto con mecanismos de agitación como tambores rotatorios, ha sido identificado como una estrategia viable para mejorar la uniformidad del secado y reducir tiempos de proceso [1], [4].

Por tanto, surge la necesidad de evaluar experimentalmente la efectividad de un secador solar con tambor rotatorio instrumentado electrónicamente, que permita regular de forma automática las condiciones internas del proceso mediante sensores de temperatura y humedad y control del flujo de aire. Se busca determinar si este sistema es capaz de reducir el tiempo de secado, mejorar la uniformidad del producto y garantizar una humedad final adecuada para su almacenamiento seguro, en concordancia con los principios de transferencia de calor y masa aplicados al secado agrícola [3].

1.5 Formulación del Problema

¿Cuál es la efectividad de un tambor rotatorio para el secado de café basado en un colector solar y energizado por paneles solares con respecto a los métodos actualmente utilizados por los productores de café?

1.6 Objetivos

1.6.1 *Objetivo General*

Determinar la efectividad de un tambor rotatorio para el secado de café basado en un colector solar y energizado por paneles solares con respecto a los métodos actualmente utilizados por los productores de café.

1.6.2 *Objetivos Específicos*

- Desarrollar un sistema para la circulación de aire y la recolección de energía solar.
- Crear una plataforma integrada que registre datos en tiempo real y monitoree el control del proceso de secado para mejorar la eficiencia.
- Realizar pruebas para medir el rendimiento del secador y llevar a cabo un análisis de costo-beneficio que demuestre su viabilidad a largo plazo.

1.7 Justificación

El sector cafetero constituye uno de los pilares económicos y sociales del departamento de Nariño, donde una proporción significativa de la población rural depende de esta actividad productiva. La etapa de secado del grano para la obtención de café pergamino seco (CPS) es determinante para garantizar la estabilidad del producto durante el almacenamiento y preservar sus características sensoriales [2]. Investigaciones desarrolladas en el ámbito del procesamiento del café han resaltado que el manejo adecuado del secado influye directamente en la calidad final del grano y en su valor comercial, debido a su impacto sobre propiedades físicas y organolépticas [5].

En la región, muchos pequeños y medianos productores continúan empleando métodos tradicionales como el secado en patio, el cual depende de las condiciones climáticas y puede presentar tiempos prolongados e inconsistencias en la humedad final del grano [7]. Desde el

punto de vista técnico, el secado es un proceso de transferencia simultánea de calor y masa cuya eficiencia depende del control de variables como temperatura y flujo de aire [1]. La falta de regulación adecuada puede ocasionar sobre secado localizado o humedad residual elevada, afectando la calidad del café y aumentando el riesgo de deterioro durante el almacenamiento [2].

Por otra parte, los secadores mecánicos convencionales alimentados con combustibles fósiles permiten mayor estabilidad térmica, pero implican mayores costos operativos y emisiones contaminantes [1]. Estudios en procesos agroindustriales han demostrado que la tecnificación del secado permite mejorar la eficiencia del proceso, reducir pérdidas y aumentar la calidad del producto final, lo cual repercute directamente en su valor en el mercado [21].

En este contexto regional, la presente investigación se justifica tecnológicamente al proponer la implementación de un secador solar con tambor rotatorio instrumentado electrónicamente, capaz de monitorear y regular variables críticas como temperatura, humedad relativa y flujo de aire. El uso de energía solar como fuente térmica representa una alternativa sostenible para pequeños productores, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir el impacto ambiental del proceso, manteniendo condiciones adecuadas para el secado del café [20], [23].

Desde el punto de vista económico regional, el café constituye uno de los productos agrícolas más relevantes dentro de la economía colombiana, generando empleo y aportando al desarrollo de las zonas rurales. Diversos estudios han señalado que la caficultura tiene un impacto significativo en la dinámica económica regional, al involucrar una amplia cadena productiva que abarca producción, transformación y comercialización del grano [20], [22]. En particular, el cultivo de café representa una fuente de ingresos fundamental para pequeños productores, quienes dependen de la calidad del producto para acceder a mejores condiciones de mercado.

Asimismo, la calidad del café colombiano ha permitido su posicionamiento en mercados internacionales de alto valor, donde factores como el perfil sensorial, la uniformidad del grano y las condiciones del proceso influyen directamente en su competitividad. Investigaciones recientes han demostrado que la competitividad del café depende en gran medida de la calidad final del producto, la cual está estrechamente relacionada con las etapas de procesamiento postcosecha, especialmente el secado [23].

En este sentido, la mejora en la uniformidad del secado y la reducción del tiempo de proceso pueden traducirse en menor pérdida postcosecha, mayor calidad del producto final y mejores oportunidades de comercialización. La literatura indica que un adecuado control del proceso de secado permite disminuir defectos físicos, mejorar la estabilidad del grano y aumentar su valor comercial, factores determinantes en la competitividad del café en mercados especializados [21]. Por lo tanto, la implementación de tecnologías que optimicen esta etapa del proceso productivo contribuye directamente al fortalecimiento del sector cafetero regional.

Finalmente, el proyecto integra energías renovables y automatización como una alternativa tecnológica viable para contribuir a la modernización del proceso de secado en el sector cafetero del departamento de Nariño, promoviendo soluciones sostenibles que mejoren la eficiencia del proceso, reduzcan costos operativos y fortalezcan la competitividad del producto en el mercado.

1.8 Delimitación

El presente proyecto se enfocó en evaluar experimentalmente la efectividad de un sistema de secado de café basado en un tambor rotatorio acoplado a un colector solar térmico como fuente principal de calor, complementado con un sistema fotovoltaico destinado a suministrar la energía eléctrica requerida por la instrumentación y los elementos de control electrónico.

El estudio se desarrolló en el laboratorio de la Universidad CESMAG, en un entorno controlado, utilizando muestras de café con un rango de humedad inicial previamente determinado y homogéneo, con el fin de garantizar consistencia en los resultados experimentales. El sistema contó con instrumentación electrónica para la medición en tiempo real de variables como temperatura, humedad relativa y condiciones de ventilación, mediante sensores PT100 con módulo de acondicionamiento MAX31865 y sensores digitales SHT31, integrados a un sistema de control basado en ESP32.

La evaluación del desempeño del sistema se centró en:

- La reducción del contenido de humedad del grano hasta niveles adecuados para almacenamiento.
- La uniformidad de la humedad final.

- El tiempo requerido para alcanzar el nivel objetivo.
- El comportamiento térmico interno del tambor.
- El consumo energético asociado al sistema electrónico y de ventilación.

Adicionalmente, se realizó un análisis de costo-beneficio a escala experimental, basado en la estimación de costos operativos y de inversión del prototipo, así como su comparación con métodos tradicionales de secado en patio y secado mecánico a gas, con el fin de evaluar su viabilidad técnica y económica en condiciones controladas.

El alcance del proyecto se limitó a la validación experimental del prototipo a escala de laboratorio en las instalaciones de la Universidad CESMAG, sin contemplar su implementación directa en entornos industriales o en condiciones climáticas extremas. No se incluyó el rediseño estructural del tambor rotatorio ni del colector solar, sino la evaluación de su desempeño bajo especificaciones técnicas previamente definidas.

Asimismo, no se consideró la integración con sistemas híbridos de secado (gas o biomasa). El análisis económico realizado no correspondió a una evaluación financiera a escala comercial o industrial, sino a una aproximación comparativa basada en los datos obtenidos del prototipo y en información referencial de los métodos tradicionales. El estudio abarcó un número determinado de ciclos de secado que permitieron obtener datos suficientes para realizar análisis comparativos y determinar la efectividad del sistema dentro de las condiciones establecidas.

2. Tópicos del Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 *Sistema automatizado para el control de la temperatura y humedad relativa de un secador solar de café.*

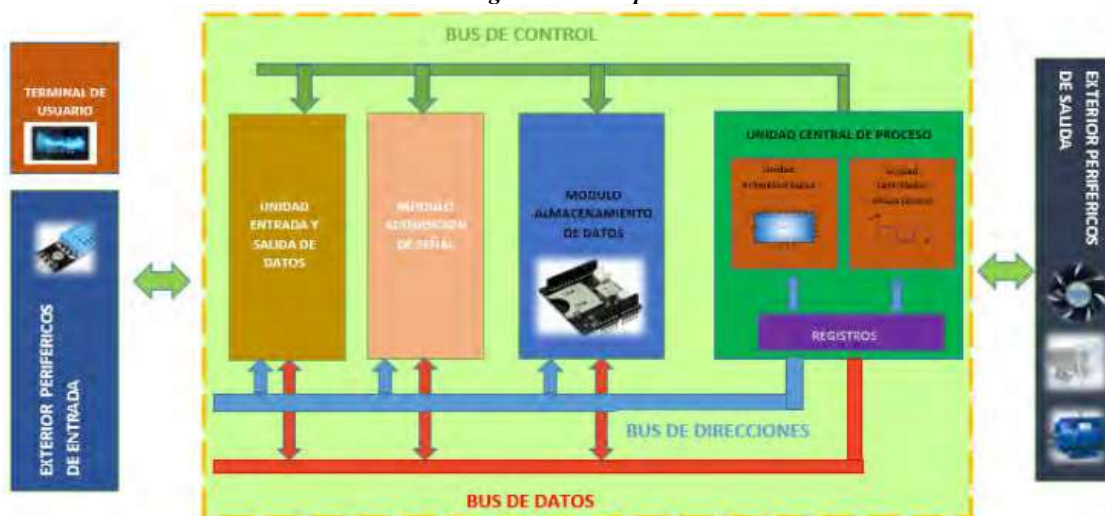
Escobar Moreno y Pantoja de la Cruz desarrollaron un sistema automatizado para el control de temperatura y humedad relativa en un secador solar de café, con el objetivo de optimizar el proceso de secado y mejorar la calidad final del grano [8]. El estudio se fundamenta en la problemática del secado tradicional en patio, caracterizado por alta dependencia de las condiciones climáticas, baja estabilidad térmica y escaso control de variables críticas del proceso.

Desde el punto de vista metodológico, los autores implementaron un sistema de adquisición de datos basado en sensores electrónicos, junto con un esquema de control que regulaba la ventilación y las condiciones internas del secador en función de las variables medidas. Los resultados evidenciaron una mejora en la estabilidad térmica, reducción de fluctuaciones de humedad relativa y mayor uniformidad del producto final.

No obstante, este trabajo se enfoca principalmente en el control de variables dentro de un sistema de secado estático sin considerar mecanismos de mezcla del producto. En este tipo de configuraciones es común la presencia de gradientes de humedad dentro del material debido a la ausencia de movimiento lo que puede limitar la uniformidad del secado.

En este sentido el antecedente demuestra la importancia de la instrumentación y el control automático, no integra soluciones mecánicas que mejoren la distribución del calor y la humedad dentro del producto. A partir de esta limitación el presente proyecto propone complementar el control electrónico con un tambor rotatorio, el cual introduce movimiento continuo del grano, favoreciendo una exposición homogénea al aire caliente y mejorando la uniformidad del secado.

Figura 1. Prototipo



Como se observa en la figura 1, el sistema automatizado propuesto se estructura en bloques funcionales que permiten la integración de adquisición de datos, procesamiento y control de actuadores. El diagrama muestra claramente la interacción entre los sensores de temperatura y humedad relativa, el módulo central de control y la etapa de potencia encargada de accionar los dispositivos de ventilación y regulación térmica.

2.1.2 Prototipo secador rotatorio de café especial alimentado con energía solar, aplicado a una finca cafetera en el municipio Arboleda del corregimiento de Santa Marta-Nariño

Insuasty y Bastidas desarrollaron un prototipo de secador rotatorio alimentado con energía solar, aplicado a una finca cafetera en el departamento de Nariño [9]. El estudio tuvo como objetivo diseñar, modelar y evaluar un sistema que integrara captación solar térmica con un mecanismo rotatorio para mejorar la uniformidad del secado.

El trabajo incluyó evaluación experimental de variables como temperatura interna, tiempo de secado y contenido de humedad final. Los resultados mostraron que el uso del tambor rotatorio permitió una mejor distribución del calor y una reducción de gradientes de humedad dentro del producto.

Si bien este antecedente es altamente relevante ya que valida el uso del tambor rotatorio como estrategia para mejorar la uniformidad del secado, presenta una limitación importante: no incorpora un sistema avanzado de instrumentación y control en tiempo real que permita regular de forma dinámica las condiciones del proceso.

En contraste, el presente proyecto no solo retoma el concepto de tambor rotatorio, sino que lo complementa mediante la integración de sensores PT100 y SHT31, un sistema de adquisición de datos basado en ESP32 y control del flujo de aire mediante PWM, lo que permite un monitoreo continuo y una regulación más precisa del proceso. De esta manera, el aporte no radica únicamente en el componente mecánico, sino en la integración de sistemas mecánicos, térmicos y electrónicos en una sola plataforma experimental.

2.1.3 Secadores solares modulares de café: una alternativa sostenible, automatizada y de mayor durabilidad

Duque-Dussán et al. desarrollaron secadores solares modulares orientados a pequeños y medianos caficultores, en los cuales se incorporan mejoras en el diseño estructural, el aprovechamiento de la energía solar y la protección del producto frente a condiciones ambientales adversas [10]. El estudio analiza el desempeño térmico del sistema, la reducción del tiempo de secado y la capacidad de alcanzar niveles de humedad adecuados para almacenamiento, evidenciando que este tipo de soluciones permite una mayor eficiencia energética en comparación con métodos tradicionales como el secado en patio. Asimismo, se destaca el uso de materiales que incrementan la durabilidad del sistema y la implementación de ventilación optimizada para favorecer la transferencia de calor y masa durante el proceso.

No obstante, a pesar de los avances en términos de diseño térmico y estructural, el enfoque de estos sistemas se centra principalmente en la captación y aprovechamiento de la energía solar, dejando en un segundo plano la instrumentación electrónica y el monitoreo en tiempo real de las variables del proceso. Esto implica que, aunque se logran mejoras en eficiencia, el control de las condiciones internas del secado sigue siendo limitado y dependiente de configuraciones operativas fijas. Adicionalmente al tratarse de sistemas mayormente estáticos, no se incorpora un mecanismo que permita la mezcla continua del producto lo que puede generar gradientes de humedad dentro del material y afectar la uniformidad del secado.

En contraste, el presente proyecto propone un enfoque más integral al combinar el aprovechamiento de la energía solar con la incorporación de un tambor rotatorio que introduce movimiento continuo del grano, mejorando la distribución térmica y reduciendo la heterogeneidad del contenido de humedad. A esto se suma la integración de un sistema de instrumentación electrónica basado en sensores de temperatura y humedad permitiendo

monitorear en tiempo real el comportamiento del proceso. De esta manera, el aporte del proyecto no se limita únicamente a la eficiencia térmica del sistema, como ocurre en los secadores solares modulares, sino que avanza hacia la implementación de un sistema capaz de generar información experimental detallada y controlable, lo cual resulta fundamental para el análisis del proceso y la validación de su efectividad.

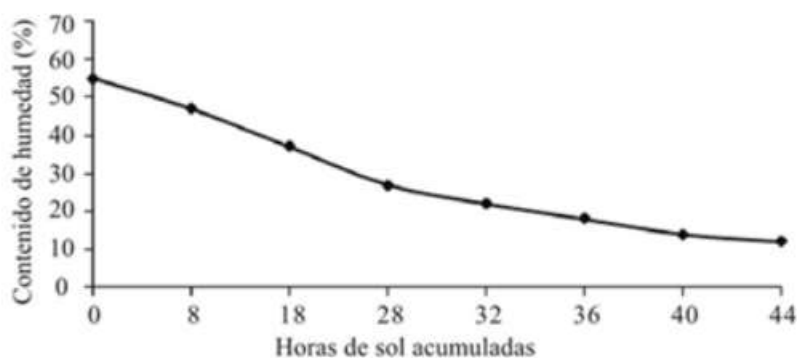


Figura 2. Curva de secado para granos de café en secador solar

Como se observa en la figura 2, esta curva representa la variación del contenido de humedad del grano en función del tiempo de exposición al proceso en el secador solar, evidenciando una reducción de humedad más acelerada respecto a los procesos tradicionales de secado en patio

2.1.4 Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de café en un secador solar activo tipo invernadero

Quintanar Olgúin y Roa Durán realizaron una evaluación térmica y financiera de un secador solar activo tipo invernadero con ventilación forzada [11]. El estudio analizó variables como temperatura del aire, humedad relativa, contenido de humedad del grano y tiempo de secado, además de incluir un análisis económico del sistema.

Los resultados demostraron que la ventilación forzada mejora significativamente la tasa de secado al facilitar la remoción de humedad del producto y que el sistema puede ser viable económicamente a mediano plazo.

Este antecedente aporta evidencia importante sobre el impacto del flujo de aire en la eficiencia del secado; sin embargo, el sistema evaluado presenta limitaciones en términos de control dinámico del flujo de aire, ya que no se implementan estrategias de regulación electrónica en función de condiciones internas del proceso.

En este contexto, el presente proyecto incorpora un sistema de control del ventilador mediante modulación PWM lo que permite ajustar la velocidad del flujo de aire en función de la temperatura medida, integrando principios de control automático. Este enfoque representa un avance frente a sistemas de ventilación fija al permitir una mayor estabilidad térmica y una optimización del proceso.

2.1.5 Acelerando el secado del café con innovación: Evaluación del rendimiento de un secador híbrido alimentado con energía solar y biomasa controlado por sensores para el secado de café en Uganda

Zziwa et al. evaluaron el desempeño de un secador híbrido que combina energía solar y biomasa, incorporando un sistema de monitoreo basado en sensores para regular las condiciones internas del proceso de secado del café [12]. El estudio se centra en el análisis de la cinética de secado, la estabilidad térmica y la calidad final del grano, evidenciando que el uso de sensores permite mantener condiciones más controladas en comparación con sistemas tradicionales. Los resultados muestran que la integración de control automático contribuye a reducir el tiempo de secado y mejorar la uniformidad del producto lo que confirma la importancia de la instrumentación en procesos agroindustriales.

Sin embargo, el sistema propuesto presenta una dependencia significativa de fuentes energéticas adicionales en este caso la biomasa lo que implica costos operativos y la generación de emisiones asociadas al proceso de combustión. Esta característica si bien mejora la disponibilidad energética del sistema reduce su sostenibilidad en comparación con soluciones basadas exclusivamente en energías renovables. Asimismo, el enfoque del estudio se orienta principalmente al control de variables térmicas sin considerar la incorporación de mecanismos mecánicos que favorezcan la homogenización del producto durante el secado lo cual puede limitar la distribución uniforme de la humedad en el interior del material.

En este contexto, el presente proyecto plantea una alternativa que mantiene las ventajas del monitoreo en tiempo real mediante sensores, pero elimina la dependencia de fuentes de combustión al emplear energía solar como fuente térmica y energía fotovoltaica para la alimentación del sistema electrónico. Adicionalmente, se introduce un tambor rotatorio que permite la mezcla continua del café mejorando la uniformidad del secado aspecto que no es abordado en el antecedente. De esta manera, el aporte del proyecto radica en la integración de sostenibilidad energética, control electrónico y mejora mecánica del proceso en un solo sistema, lo cual representa una evolución frente a soluciones híbridas que, aunque eficientes, no logran una integración completa de estos elementos.

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 *Humedad del grano de café*

El contenido de humedad del grano de café constituye la variable principal del proceso de secado, ya que determina la estabilidad del producto durante su almacenamiento y su calidad comercial. Después del proceso de despulpado y lavado, el café presenta un contenido de humedad aproximado entre 50 % y 60 % en base húmeda, el cual debe reducirse hasta valores cercanos al 10 % –12 % para garantizar su conservación y evitar el desarrollo de microorganismos que deterioren sus propiedades físicas y sensoriales [2].

En este trabajo se asume que el control de las condiciones térmicas y de humedad del aire dentro del sistema de secado permite influir directamente en la reducción progresiva del contenido de humedad del grano, facilitando la obtención de valores finales adecuados para almacenamiento seguro.

2.2.2 *Proceso de secado*

El proceso de secado del café depende fundamentalmente del suministro de energía térmica que permita la evaporación del agua contenida en el grano. Desde el punto de vista físico, el calor es transferido principalmente por convección desde el aire caliente hacia la superficie del producto, elevando su temperatura y facilitando el cambio de fase del agua [3].

La eficiencia del proceso está directamente relacionada con la capacidad del sistema para mantener condiciones térmicas adecuadas sin afectar la calidad del grano. En el secado de café, se recomienda operar en rangos de temperatura inferiores a 50 °C para evitar daños estructurales y sensoriales en el producto [2].

En este trabajo se asume que el control del suministro de energía térmica mediante aire caliente proveniente de un colector solar permite favorecer la evaporación del agua del grano, manteniendo condiciones adecuadas para preservar la calidad del café durante el proceso de secado.

2.2.3 Transferencia de calor y de masa en el proceso de secado

El proceso de secado del café involucra fenómenos simultáneos de transferencia de calor y transferencia de masa, los cuales determinan la velocidad con la que se elimina la humedad del producto durante el proceso de secado. Estos fenómenos son fundamentales para comprender la dinámica del secado de productos agrícolas y han sido ampliamente estudiados en la literatura de transferencia de calor y masa aplicada a procesos térmicos [1], [3].

La transferencia de calor corresponde al flujo de energía térmica desde el aire caliente hacia el café. En sistemas de secado convectivo, como el utilizado en este trabajo, el calor es transferido principalmente por convección desde el aire caliente hacia la superficie del grano. Este intercambio de energía aumenta la temperatura del producto y facilita la evaporación del agua contenida en su interior, permitiendo que el proceso de secado se lleve a cabo de manera progresiva [3], [4].

Además de la convección, en el proceso de secado también pueden presentarse mecanismos de conducción y radiación. La conducción ocurre cuando el calor se transfiere a través del material del grano, mientras que la radiación corresponde a la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas provenientes de la radiación solar. Estos mecanismos contribuyen al calentamiento del producto y al mantenimiento de las condiciones térmicas necesarias para el proceso de evaporación [3], [4].

Simultáneamente al proceso de transferencia de calor ocurre la transferencia de masa, la cual corresponde al movimiento de la humedad desde el interior del grano hacia su superficie. Este fenómeno se produce debido a un gradiente de humedad entre el interior del material y el aire circundante, lo que genera el desplazamiento del agua hacia el exterior del grano [1].

El transporte de humedad dentro del grano puede describirse mediante principios de difusión asociados a la Ley de Fick, la cual establece que el flujo de masa es proporcional al gradiente de concentración. En el contexto del secado, esto significa que el agua contenida en el interior del grano se desplaza hacia la superficie donde posteriormente se evapora y es removida por el flujo de aire de secado [3], [4].

La velocidad de secado depende de varios factores, entre los cuales se destacan:

- la temperatura del aire de secado
- la humedad relativa del aire
- la velocidad del flujo de aire
- las propiedades físicas del producto

El control adecuado de estas variables permite optimizar el proceso de secado y mejorar la eficiencia del sistema, favoreciendo una mayor tasa de evaporación de la humedad y una reducción del tiempo necesario para alcanzar los niveles de humedad adecuados para el almacenamiento del café [1], [3].

2.2.4 *Secado solar*

El secado solar constituye una alternativa sostenible para realizar este proceso, ya que utiliza la radiación solar como fuente principal de energía térmica. En este tipo de sistemas, la energía proveniente del sol es captada mediante colectores o superficies absorbentes que permiten calentar el aire utilizado para el secado. Este aire caliente se pone en contacto con el producto agrícola, provocando la evaporación del agua contenida en su interior y facilitando la reducción progresiva del contenido de humedad del grano [3], [4].

En comparación con los métodos tradicionales de secado en patio, los secadores solares permiten reducir el tiempo de secado, mejorar la estabilidad térmica del proceso y disminuir la dependencia de combustibles fósiles, lo cual contribuye a la sostenibilidad del sistema [5], [10].

En el presente trabajo se emplea un sistema de secado solar indirecto, en el cual el aire es calentado mediante un colector solar y posteriormente conducido hacia un tambor rotatorio que contiene el café. Se asume que esta configuración permite mejorar el control de las condiciones del proceso, incrementar la uniformidad del secado y reducir la variabilidad en la humedad final del producto, en comparación con métodos tradicionales.

2.2.5 *Mecánica del tambor rotatorio*

El movimiento del producto dentro del sistema de secado influye directamente en la uniformidad térmica y en la distribución de la humedad durante el proceso. En secadores estáticos es común encontrar gradientes de temperatura y humedad debido a la falta de mezcla del material. Por esta razón, se asume que la incorporación de un tambor rotatorio permitió generar un movimiento continuo del grano, favoreciendo una exposición más homogénea al flujo de aire caliente y reduciendo zonas de acumulación de humedad. Este comportamiento mejora la uniformidad del secado y disminuye la probabilidad de sobre secado localizado, lo cual ha sido reportado en sistemas rotatorios aplicados a procesos de secado de productos agrícolas [1].

2.2.6 *Instrumentación electrónica y adquisición de datos*

La instrumentación electrónica aplicada al proceso de secado permite monitorear en tiempo real las variables físicas que influyen en el comportamiento del sistema. En el presente proyecto se integran sensores de temperatura tipo PT100 con módulo de acondicionamiento MAX31865 y sensores digitales SHT31 para la medición de temperatura y humedad relativa del aire. Se asume que la adquisición continua de datos mediante el microcontrolador ESP32 permitió registrar el comportamiento térmico y ambiental del sistema durante los ciclos de secado, facilitando el análisis experimental del proceso. La implementación de sistemas de monitoreo en procesos agroindustriales ha demostrado mejorar la estabilidad operativa y la repetibilidad de los resultados, permitiendo además establecer relaciones entre variables térmicas y reducción de humedad [1].

2.2.7 *Control automático del flujo del aire*

El flujo de aire constituye uno de los factores más influyentes en la eficiencia del proceso de secado, ya que afecta directamente la transferencia de calor y masa entre el aire y el producto. En el sistema propuesto se implementa un ventilador controlado mediante modulación por ancho de pulso (PWM), lo que permite regular electrónicamente la velocidad del aire dentro del tambor. Se asume que el control automático del flujo permitió estabilizar las condiciones internas del secador, reducir fluctuaciones térmicas y optimizar la remoción de humedad del grano. Este

enfoque representa una ventaja frente a los métodos tradicionales de secado, donde la ventilación depende únicamente de condiciones ambientales no controladas [3].

2.2.8 *Energía basada en fuentes renovables*

El uso de energía solar térmica y energía solar fotovoltaica representa una alternativa sostenible para la implementación de sistemas de secado agrícola, especialmente en regiones cafeteras con alta disponibilidad de radiación solar. En el sistema propuesto, el colector solar térmico suministra la energía necesaria para el calentamiento del aire, mientras que el sistema fotovoltaico alimenta los componentes electrónicos de monitoreo y control. Se asume que esta integración energética permitirá reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir el impacto ambiental del proceso, manteniendo al mismo tiempo condiciones adecuadas para el secado del café [1].

2.3 Definición de variables

Para el desarrollo de la investigación, se definieron las variables principales que intervienen en el proceso de secado del café, clasificándolas en variables independientes, dependientes y de control, con el fin de analizar su influencia en el desempeño del sistema propuesto.

Como variable dependiente se consideró el contenido de humedad del café (%), el cual representa el indicador principal del proceso de secado. Esta variable fue determinada mediante mediciones realizadas con un medidor de humedad tipo DH-200X, permitiendo evaluar la evolución del secado en función del tiempo.

Dentro de las variables independientes se incluyeron aquellas asociadas a las condiciones térmicas y ambientales del sistema, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa y el flujo de aire. La temperatura del sistema fue medida mediante un sensor PT100 acoplado a un módulo MAX31865, mientras que la temperatura y la humedad relativa del aire fueron registradas mediante sensores SHT31 ubicados en puntos estratégicos del sistema.

En cuanto a las variables de control, se consideraron aquellas condiciones que se mantuvieron constantes durante las pruebas experimentales con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados. Entre estas se incluyen la masa de café utilizada en cada

ensayo (aproximadamente 6 kg), la configuración del sistema de ventilación, la estructura del colector solar y las condiciones generales de operación del prototipo.

El registro de las variables se realizó de manera continua durante las pruebas experimentales mediante un sistema de adquisición de datos basado en un microcontrolador ESP32, lo que permitió analizar el comportamiento del proceso de secado en función del tiempo bajo condiciones controladas.

2.3.1 Variables independientes

Las variables independientes corresponden a aquellas que influyen directamente en el proceso de secado y pueden ser monitoreadas o controladas mediante el sistema electrónico implementado.

Temperatura del aire de secado: La temperatura del aire es una de las variables más influyentes en la velocidad de evaporación del agua contenida en el grano. En el sistema propuesto, esta variable se monitorea mediante sensores de temperatura tipo PT100 conectados al módulo MAX31865. Se espera que el sistema opere dentro de un rango de temperatura típico para procesos de secado de café (30 °C a 50 °C); sin embargo, las condiciones reales de operación dependen de la radiación solar disponible y del diseño del sistema. [3].

Humedad relativa del aire: La humedad relativa del aire determina la capacidad del aire para absorber vapor de agua durante el proceso de secado. Esta variable se midió mediante sensores digitales SHT31 ubicados dentro del sistema. Se asume que valores bajos de humedad relativa favorecerán una mayor tasa de secado al incrementar el gradiente de humedad entre el grano y el aire circundante [1].

Velocidad del flujo de aire: El flujo de aire influye directamente en la transferencia de calor y masa. En el prototipo propuesto, esta variable se regula mediante ventilación forzada controlada por modulación PWM a través del microcontrolador ESP32, permitiendo evaluar su efecto sobre la uniformidad del secado.

2.3.2 Variables dependientes

Las variables dependientes corresponden a los resultados del proceso de secado y permiten determinar la efectividad del sistema.

Contenido de humedad del grano: El contenido de humedad final del café es el principal indicador del proceso de secado. Este valor fue medido mediante un medidor de humedad de grano o mediante métodos indirectos basados en el tiempo de secado y condiciones térmicas. Para lograr alcanzar valores entre 10 % y 12 % base húmeda, adecuados para almacenamiento seguro [2].

Tiempo de secado: El tiempo requerido para alcanzar el contenido de humedad objetivo fue registrado durante los ciclos experimentales. Esta variable permitió comparar el desempeño del sistema frente a métodos tradicionales de secado.

Uniformidad térmica del sistema: La uniformidad térmica se evaluará mediante el análisis de las mediciones de temperatura en distintos puntos del sistema, permitiendo determinar la estabilidad del proceso.

2.3.3 *Variables de control*

Las variables de control corresponden a aquellas condiciones experimentales que se mantuvieron constantes durante las pruebas, con el propósito de garantizar la repetibilidad del experimento y permitir la comparación adecuada de los resultados obtenidos.

En este proceso se realizaron cuatro pruebas experimentales utilizando una carga aproximada de 6 kg de café pergamino húmedo introducida en el tambor rotatorio en cada ensayo. Mantener constante esta cantidad de café permitió analizar el comportamiento térmico del sistema y la evolución del proceso de secado bajo condiciones operativas similares, facilitando la comparación de los resultados obtenidos en cada jornada experimental.

Para asegurar la validez experimental, el resto de las condiciones del proceso se mantuvieron constantes en todas las pruebas. En particular, se utilizaron muestras de café con un contenido de humedad inicial similar, se conservaron las dimensiones estructurales del prototipo, el diseño del colector solar y la configuración del sistema de ventilación, de manera que las variaciones observadas en los resultados pudieran asociarse principalmente a las condiciones térmicas y ambientales registradas durante cada ensayo.

Asimismo, se mantuvo constante la ubicación del sistema de secado, las condiciones operativas de los sensores electrónicos, el método de adquisición de datos mediante el microcontrolador ESP32 y los parámetros de control del ventilador. De esta manera, cualquier variación observada en el comportamiento del proceso se podrán asociar principalmente a las

condiciones térmicas y ambientales, dado que la masa de café se mantuvo constante en todas las pruebas. Este enfoque permitió evaluar la estabilidad térmica del sistema, la uniformidad del secado y el tiempo requerido para alcanzar el contenido de humedad objetivo bajo diferentes condiciones de carga.

2.3.4 Instrumentación y procedimiento de medición

El sistema de medición estará basado en la integración de sensores electrónicos conectados a un microcontrolador ESP32, encargado de la adquisición y procesamiento de datos en tiempo real.

La temperatura se midió mediante sensores PT100 con módulo MAX31865, debido a su alta precisión en aplicaciones industriales. La humedad relativa del aire fue medida mediante sensores digitales SHT31, los cuales permiten obtener valores confiables de temperatura y humedad ambiental.

Los datos adquiridos fueron almacenados para su posterior análisis experimental, permitiendo establecer relaciones entre las variables térmicas y la reducción del contenido de humedad del grano.

Para garantizar la confiabilidad de las mediciones, se realizó una calibración inicial de los sensores mediante comparación con instrumentos de referencia. En el caso de los sensores de humedad relativa, se podrá emplear el método de solución salina para generar ambientes de humedad controlada. Para los sensores de temperatura, se realizó la comparación con un termómetro calibrado.

Variable	Sensor	Rango	Tipo	Uso
Temperatura	PT100 + MAX31865	30 – 50 °C	Independiente	Control térmico
Humedad relativa	SHT31	20 – 80%	Independiente	Transferencia de masa
Flujo de aire	PWM ventilador	0 – 100%	Independiente	Convección

Humedad del grano	Medidor humedad	10 – 12%	Dependiente	Resultado
-------------------	-----------------	----------	-------------	-----------

Tabla 1 Sensores y variables

La tabla 1 presenta las principales variables consideradas en el proceso experimental de secado del café, junto con los sensores o instrumentos utilizados para su medición y su función dentro del sistema propuesto.

2.4 Hipótesis de investigación

El uso de un sistema de secado de café basado en un tambor rotatorio acoplado a un colector solar y controlado mediante instrumentación electrónica permite reducir significativamente el tiempo de secado y mejorar la uniformidad y el control del contenido de humedad final del grano, en comparación con los métodos tradicionales de secado en patio y secado mecánico a gas, bajo condiciones experimentales controladas.

Adicionalmente, se plantea que el sistema permite reducir el consumo de energía externa mediante el aprovechamiento de la energía solar, manteniendo un desempeño competitivo frente al secado mecánico convencional.

2.5 Modelos matemáticos de secado

El análisis del proceso de secado de productos agrícolas suele realizarse mediante modelos matemáticos que permiten describir la variación del contenido de humedad del material en función del tiempo. Estos modelos facilitan la comprensión del comportamiento del proceso y permiten estimar parámetros característicos del secado, tales como la constante de secado y la velocidad de eliminación de humedad del producto [1], [13].

Los modelos matemáticos de secado pueden clasificarse en modelos teóricos, semi empíricos y empíricos. Los modelos teóricos se basan en principios fundamentales de transferencia de calor y masa, mientras que los modelos empíricos y semi empíricos se desarrollan a partir del ajuste de datos experimentales obtenidos durante el proceso de secado. Este tipo de modelos es ampliamente utilizado en estudios de secado agrícola debido a su capacidad para describir el comportamiento del proceso con una formulación matemática relativamente sencilla [1], [3].

Entre los modelos más utilizados para describir la cinética de secado de productos agrícolas se encuentran los modelos de Newton, Page y Henderson-Pabis, los cuales han sido ampliamente aplicados en el estudio del secado de granos, frutas y diversos productos alimenticios [13].

Uno de los modelos más simples y utilizados es el modelo de Newton-Lewis, el cual describe la disminución del contenido de humedad mediante una función exponencial. Este modelo se expresa mediante la ecuación:

$$MR = e^{-kt}$$

Donde:

MR : razón de humedad

k : constante de secado (min^{-1})

t : tiempo de secado (min)

Definición de la razón de la humedad

La razón de humedad se define como:

$$MR = \frac{M(t) - M_{ref}}{M_0 - M_{ref}}$$

Donde:

$M(t)$: humedad en el tiempo t

M_0 : humedad inicial del café

M_{ref} : humedad de referencia adoptada en el modelo

La razón de humedad representa una forma adimensional de expresar la disminución del contenido de agua del producto durante el proceso de secado. Esta normalización permite comparar el comportamiento del secado independientemente de las condiciones iniciales.

El uso de una humedad de referencia M_{ref} distinta de la humedad objetivo del proceso es fundamental para evitar indeterminaciones matemáticas. Si se tomara la humedad objetivo (por ejemplo, 12%) como referencia, la razón de humedad tendería a cero al final del proceso, lo que generaría problemas al aplicar transformaciones logarítmicas en el cálculo de la constante de secado.

Por esta razón, en el presente trabajo se adopta un valor de humedad de referencia inferior a la humedad objetivo, permitiendo garantizar estabilidad matemática en el modelo.

Sustituyendo la definición de la razón de humedad en el modelo de Newton–Lewis, se obtiene la expresión completa del contenido de humedad en función del tiempo:

$$M(t) = M_{ref} + (M_0 - M_{ref})e^{-kt}$$

Esta ecuación describe el comportamiento real del proceso de secado del café:

Al inicio ($t = 0$), el contenido de humedad del café corresponde a la humedad inicial M_0 . A medida que transcurre el tiempo, la humedad disminuye de forma exponencial, aproximándose progresivamente al valor de referencia M_{ref}

$$M(t) = 0$$

El contenido de humedad del café disminuye progresivamente con el tiempo, siguiendo un comportamiento exponencial decreciente. Para tiempos grandes:

$$M(t) \rightarrow M_{ref}$$

El sistema se aproxima a su valor límite

Significado de la constante de secado k

La constante de secado k es un parámetro que representa la velocidad del proceso de secado.

- Valores altos de $k \rightarrow$ secado rápido
- Valores bajos de $k \rightarrow$ secado lento

Este parámetro depende de:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Flujo de aire
- Condiciones del sistema

Forma linealizada del modelo

Para estimar la constante de secado a partir de datos experimentales, el modelo puede expresarse en forma lineal aplicando logaritmo natural:

$$\ln(MR) = -kt$$

Esta forma permite ajustar los datos experimentales mediante regresión lineal y obtener el valor de k a partir de la pendiente de la recta.

Este modelo permite representar el comportamiento típico de los procesos de secado, en los cuales el contenido de humedad disminuye de manera exponencial con el tiempo. Debido a su simplicidad y a su buena capacidad para describir el comportamiento de muchos procesos de secado convectivo, el modelo de Newton-Lewis ha sido ampliamente utilizado en estudios de secado de productos agrícolas [1], [13].

En el presente trabajo, el modelo de Newton-Lewis se emplea como base para el análisis matemático del proceso de secado del café en el sistema experimental desarrollado. A partir de los datos obtenidos durante las pruebas experimentales se estimarán los parámetros del modelo con el fin de describir el comportamiento del proceso y analizar la relación entre las condiciones térmicas del sistema y la reducción del contenido de humedad del café.

2.5.1 *Cinética de secado del café*

La cinética de secado describe la forma en que el contenido de humedad de un material disminuye con el tiempo durante el proceso de secado. En el caso del café, el estudio de la cinética de secado permite analizar la rapidez con la que el grano pierde humedad bajo determinadas condiciones térmicas y ambientales, así como establecer relaciones entre las variables del proceso y la reducción del contenido de agua del producto [1], [13].

El secado del café es un fenómeno complejo que depende simultáneamente de la transferencia de calor hacia el grano y de la transferencia de masa desde el interior del producto hacia la superficie. Como resultado de estos fenómenos, la velocidad de secado no permanece

constante durante todo el proceso, sino que varía con el tiempo a medida que disminuye el contenido de humedad del material [1], [3].

En términos generales, la cinética de secado de productos agrícolas puede representarse mediante curvas que relacionan el contenido de humedad del producto con el tiempo de secado. Estas curvas permiten identificar el comportamiento del proceso y reconocer las etapas en las cuales el secado ocurre con mayor o menor rapidez [13].

2.5.2 *Justificación de la selección del modelo de Newton-Lewis*

La selección del modelo de Newton–Lewis se fundamenta en su simplicidad matemática, su amplia aplicación en el secado de productos agrícolas y su capacidad para describir adecuadamente procesos dominados por difusión interna de humedad.

Este modelo resulta apropiado para el sistema experimental desarrollado, ya que el proceso de secado del café ocurre principalmente en el periodo de velocidad decreciente, donde la transferencia de masa es el fenómeno predominante.

$$MR = e^{-kt}$$

Donde:

MR : representa la razón de humedad del producto,

k : corresponde a la constante de secado,

t : es el tiempo de secado.

La selección de este modelo para el presente trabajo se fundamenta en varios aspectos. En primer lugar, el modelo de Newton-Lewis permite describir de manera sencilla el comportamiento del proceso de secado sin requerir un número elevado de parámetros, lo cual facilita su implementación y análisis. En segundo lugar, este modelo ha sido ampliamente utilizado en el estudio del secado de productos agrícolas, mostrando resultados satisfactorios en la representación de la cinética de secado bajo condiciones de convección de aire caliente [1], [13].

Adicionalmente, el modelo resulta adecuado para el análisis del sistema experimental desarrollado en este proyecto, debido a que el proceso de secado del café ocurre principalmente en el periodo de velocidad decreciente, en el cual la transferencia de humedad está dominada por

mecanismos de difusión interna dentro del material. Bajo estas condiciones, el comportamiento del contenido de humedad puede aproximarse mediante una función exponencial decreciente en función del tiempo.

Por estas razones, el modelo de Newton-Lewis fue seleccionado como base para el desarrollo del modelamiento matemático del proceso de secado del café en el sistema de tambor rotatorio con colector solar desarrollado en este trabajo.

3. Metodología

3.1 Secuencia Metodológica

El presente trabajo se enmarca dentro de una investigación de tipo experimental, aplicada y de enfoque cuantitativo.

Se considera experimental debido a que se manipulan de manera controlada variables del proceso de secado, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa y el flujo de aire, con el fin de analizar su efecto sobre la reducción del contenido de humedad del grano de café bajo condiciones específicas de operación.

Asimismo, corresponde a una investigación aplicada, ya que está orientada a la solución de un problema concreto del sector cafetero, mediante el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de secado que integra un tambor rotatorio, un colector solar y un sistema de control electrónico.

Finalmente, el estudio adopta un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamenta en la medición, registro y análisis de variables físicas del proceso, tales como temperatura, humedad relativa, contenido de humedad del grano y tiempo de secado, permitiendo evaluar el desempeño del sistema a partir de datos experimentales y establecer comparaciones con métodos tradicionales de secado.

El diseño de la investigación corresponde a un diseño experimental de tipo comparativo, en el cual se evaluó el desempeño del sistema de secado propuesto bajo condiciones controladas y se compararon sus resultados con los métodos tradicionales de secado en patio y secado mecánico a gas, a partir de variables como tiempo de secado, contenido de humedad y consumo energético.

El desarrollo metodológico se estructuró en fases que incluyeron el diseño e implementación del sistema, la integración de los subsistemas mecánico, térmico, electrónico y energético, la ejecución de pruebas experimentales y el análisis de los datos obtenidos durante el proceso de secado.

Se realizaron ensayos experimentales controlados utilizando muestras homogéneas de café pergamino húmedo con una masa aproximada de 6 kg por ensayo. Durante cada prueba se mantuvieron constantes las condiciones estructurales del sistema, el diseño del colector solar, la

configuración del sistema de ventilación y los parámetros de control, con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados.

Durante las pruebas se registraron de forma continua variables como la temperatura, la humedad relativa, el flujo de aire y el contenido de humedad del grano, mediante sensores electrónicos integrados a un microcontrolador ESP32. Los datos obtenidos permitieron analizar la evolución del proceso de secado en función del tiempo y evaluar el desempeño del sistema propuesto.

Este enfoque permitió establecer relaciones entre las condiciones de operación del sistema y los resultados del proceso, permitiendo establecer comparaciones técnicas con métodos tradicionales de secado como el secado en patio y el secado mecánico a gas.

3.1.1 Desarrollar un sistema para la circulación de aire y la recolección de energía solar.

El desarrollo del sistema térmico constituye una de las etapas fundamentales del proyecto, ya que permite generar las condiciones necesarias para el proceso de secado del café mediante el aprovechamiento de la energía solar. Esta fase abarca el diseño, construcción e integración del colector solar térmico y del tambor rotatorio, los cuales trabajan de forma conjunta para garantizar una transferencia eficiente de calor y una adecuada circulación del aire caliente dentro del sistema.

Inicialmente, se realizó el diseño conceptual del colector solar de aire considerando parámetros como el área de captación, el tipo de material absorbente, el aislamiento térmico y el flujo de aire requerido para el secado. El colector fue diseñado con una cubierta transparente que permite el ingreso de radiación solar y reduce las pérdidas térmicas por convección. En su interior se incorporó una placa absorbente metálica pintada de color negro mate para maximizar la absorción de energía térmica. Asimismo, se emplearon materiales aislantes en la estructura para minimizar pérdidas de calor hacia el ambiente.

El aire ambiente ingresa al colector y, al entrar en contacto con la superficie absorbente calentada por la radiación solar, incrementa su temperatura. Posteriormente, este aire caliente es conducido hacia la cámara de secado mediante un sistema de ventilación forzada, permitiendo mejorar la eficiencia del proceso al mantener un flujo continuo y controlado.

De manera complementaria, se diseñó y construyó un tambor rotatorio con el propósito de mejorar la uniformidad del secado del grano. Para las pruebas experimentales realizadas en

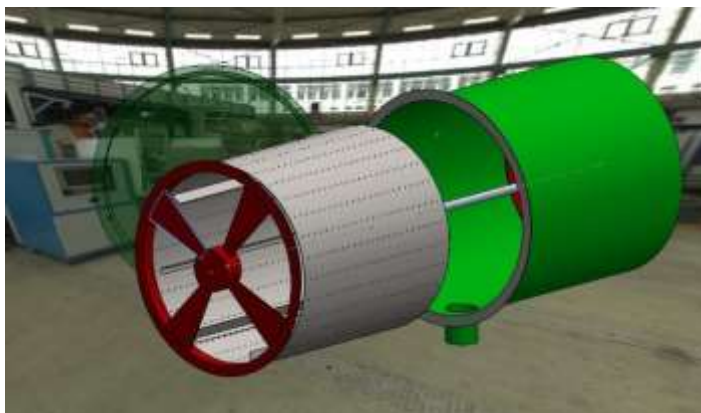
este proyecto se utilizaron cargas aproximadas de 6 kg de café, lo que permitió evaluar el comportamiento térmico del sistema bajo condiciones controladas. La estructura fue fabricada con materiales metálicos livianos y resistentes a la temperatura, incorporando perforaciones laterales que facilitan la circulación del aire caliente a través de la masa de café.

El movimiento rotatorio del tambor permite que el grano se mezcle continuamente, reduciendo gradientes de humedad y evitando acumulaciones térmicas localizadas dentro del sistema de secado. Este movimiento se genera mediante un sistema motriz basado en un motor DC, seleccionado a partir del cálculo del torque requerido para la rotación del tambor y la masa de café contenida en su interior. Dicho cálculo permitió determinar las características adecuadas del motor para garantizar un funcionamiento estable del sistema durante el proceso de secado. De esta manera, el tambor mantiene una rotación constante que favorece la exposición homogénea del grano al flujo de aire caliente, contribuyendo a mejorar la uniformidad del proceso de secado. Adicionalmente, el sistema incorpora paneles solares fotovoltaicos como fuente de energía eléctrica para alimentar la instrumentación electrónica, el sistema de control, los elementos de ventilación y el sistema motriz del tambor rotatorio. La energía generada por los paneles solares es regulada mediante un sistema de acondicionamiento eléctrico que permite suministrar voltajes estables al microcontrolador, sensores y actuadores. Esta integración permite que el prototipo funcione de manera autónoma y sostenible, reduciendo la dependencia de fuentes externas de energía y fortaleciendo el enfoque de energías renovables aplicado al proceso de secado del café.

Durante la fase de construcción se integraron los subsistemas térmico, mecánico y eléctrico (colector solar, tambor rotatorio y sistema fotovoltaico), asegurando la correcta conexión del flujo de aire caliente desde la salida del colector hacia la cámara del tambor y la adecuada alimentación energética de los componentes electrónicos. Se verificó además la estabilidad estructural del prototipo y la correcta circulación interna del aire.

El desarrollo de este sistema de captación solar, circulación de aire y suministro energético fotovoltaico permite establecer las condiciones térmicas y operativas necesarias para las pruebas experimentales, constituyendo la base física sobre la cual se implementó posteriormente la instrumentación electrónica y el análisis del desempeño del proceso de secado.

Figura 3. Prototipo base primer boceto



3.1.2 Crear una plataforma integrada que registre datos en tiempo real y monitoree el control del proceso de secado para mejorar eficiencia.

En esta etapa se desarrolló una plataforma electrónica integrada orientada al monitoreo y control automático de las variables principales del proceso de secado del café. El propósito es mejorar la estabilidad de las condiciones internas del sistema, optimizar el comportamiento térmico del tambor rotatorio y facilitar la evaluación experimental del desempeño del secador solar.

El sistema estará basado en un microcontrolador ESP32, el cual actuará como unidad central de procesamiento para la adquisición de datos y la generación de señales de control. Este dispositivo permitió realizar la lectura de diferentes sensores asociados al proceso de secado, así como el procesamiento de la información en tiempo real para apoyar la regulación de las condiciones operativas.

Se implementó un conjunto de sensores electrónicos (por definir según disponibilidad y requerimientos experimentales) destinados a medir variables relevantes como temperatura, humedad y condiciones de operación del sistema. La información recolectada permitió analizar el comportamiento del proceso durante los diferentes ciclos de secado.

Los datos obtenidos fueron registrados para su posterior procesamiento y análisis, con el fin de identificar tendencias, comparar resultados entre pruebas y evaluar la efectividad del sistema de secado propuesto.

Adicionalmente, el microcontrolador permitió automatizar ciertas funciones del prototipo, como el control del flujo de aire y el accionamiento del tambor rotatorio, mediante señales de control generadas de acuerdo con las condiciones registradas durante el proceso.

Esta plataforma integrada permitió relacionar las variables medidas con la reducción del contenido de humedad del café, facilitando la validación experimental del sistema basado en energía solar térmica y control electrónico.

Finalmente, la implementación del sistema electrónico contribuirá a integrar los subsistemas térmico, mecánico y electrónico dentro de un mismo esquema de funcionamiento, fortaleciendo el enfoque de instrumentación aplicado al proceso de secado del café.

3.1.3 Realizar pruebas para medir el rendimiento del secador y llevar a cabo un análisis de costo-beneficio que demuestre su viabilidad a largo plazo.

En esta fase del proyecto se realizaron pruebas experimentales controladas con el propósito de evaluar el rendimiento térmico y operativo del sistema de secado de café basado en un tambor rotatorio acoplado a un colector solar y alimentado energéticamente mediante paneles solares.

Las variables de control corresponden a aquellas condiciones experimentales que se mantuvieron constantes durante las pruebas, con el propósito de garantizar la repetibilidad del experimento y permitir una comparación adecuada de los resultados obtenidos. En el presente proyecto las pruebas experimentales se realizaron utilizando una carga aproximada de 6 kg de café pergamino húmedo introducida en el tambor rotatorio. Esta cantidad se mantuvo constante durante los diferentes con el fin de analizar el comportamiento térmico del sistema bajo condiciones operativas similares.

Para asegurar la validez experimental, el resto de las condiciones del proceso también se mantuvieron constantes en todas las pruebas. En particular, se utilizaron muestras de café con un contenido de humedad inicial similar, se conservaron las dimensiones estructurales del prototipo, el diseño del colector solar y la configuración del sistema de ventilación.

Asimismo, se mantuvo constante la ubicación del sistema de secado, las condiciones operativas de los sensores electrónicos, el método de adquisición de datos mediante el microcontrolador ESP32 y los parámetros de funcionamiento del ventilador. De esta manera,

cualquier variación observada en el comportamiento del proceso puede asociarse principalmente a las condiciones térmicas y ambientales registradas durante cada ensayo.

Este enfoque permitió evaluar la estabilidad térmica del sistema, la uniformidad del secado y el tiempo requerido para alcanzar el contenido de humedad objetivo del café.

Durante cada ciclo experimental se registraron variables asociadas al proceso de secado, principalmente:

- Temperatura interna del sistema
- Humedad relativa del aire
- Tiempo total de secado
- Humedad final del grano
- Comportamiento térmico del tambor rotatorio

Los datos recolectados permitieron determinar la eficiencia del proceso en términos de reducción de humedad y estabilidad térmica, así como analizar el comportamiento del sistema durante los diferentes ciclos experimentales.

Adicionalmente, con el fin de analizar el comportamiento del proceso de secado desde un enfoque teórico, se empleó un modelo matemático de cinética de secado basado en el modelo de Newton–Lewis, ampliamente utilizado en estudios de secado de productos agrícolas. Este modelo permite describir la variación del contenido de humedad del producto en función del tiempo mediante una relación exponencial decreciente, expresada como:

$$MR = e^{-kt}$$

donde **MR** representa la razón de humedad del producto, **k** corresponde a la constante de secado característica del proceso y **t** es el tiempo de secado.

La razón de humedad se define como:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

donde M_0 corresponde a la humedad inicial del café, M_t es la humedad en el tiempo t .

Los datos experimentales obtenidos durante las pruebas fueron posteriormente procesados mediante herramientas computacionales, lo que permitió construir las curvas de

secado, estimar la constante de secado del sistema y comparar el comportamiento experimental con las estimaciones del modelo matemático.

Posteriormente, se realizó un análisis técnico de los resultados experimentales para identificar la capacidad operativa del prototipo y su comportamiento frente a métodos tradicionales de secado.

De manera complementaria, se desarrolló un análisis básico de costo–beneficio orientado a evaluar la viabilidad del sistema a largo plazo. Este análisis consideró aspectos como:

- Uso de energía solar como fuente principal de calor
- Reducción del consumo de combustibles fósiles
- Disminución del tiempo de secado frente a métodos tradicionales
- Costos aproximados de implementación del sistema electrónico y mecánico

El análisis no tuvo un enfoque comercial detallado, sino una evaluación comparativa que permitió evidenciar el potencial del sistema como alternativa tecnológica sostenible para café.

Finalmente, los resultados obtenidos permitieron validar experimentalmente la efectividad del sistema propuesto y analizar la capacidad del modelo matemático para describir el comportamiento real del proceso de secado, estableciendo además recomendaciones para futuras mejoras o escalamiento del prototipo

3.1.4 Universo

El universo de estudio corresponde al conjunto de procesos de secado de café pergamino que se desarrollan bajo diferentes condiciones térmicas y operativas, incluyendo tanto métodos tradicionales como el secado en patio y el secado mecánico a gas, así como sistemas tecnificados de secado.

3.1.5 Muestra

La muestra está constituida por los ensayos experimentales realizados en el prototipo de secado basado en tambor rotatorio acoplado a un colector solar, en los cuales se evaluaron lotes de café pergamino húmedo bajo condiciones controladas.

En total, se realizaron cuatro ensayos experimentales, cada uno con una carga aproximada de 6 kg de café, durante los cuales se registraron variables como temperatura, humedad relativa, contenido de humedad del grano y tiempo de secado, con el fin de analizar el comportamiento del sistema propuesto.

3.2 Técnicas de recolección de información

Observación directa: La recolección de información se realizó mediante la observación directa y el registro sistemático del comportamiento del sistema de secado durante su operación experimental. Este proceso incluirá el monitoreo del funcionamiento del tambor rotatorio, el desempeño térmico del colector solar y la variación de las condiciones internas del secador, principalmente temperatura y humedad relativa, variables que influyen directamente en la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado de productos agrícolas [1], [3].

Para la medición de las variables del proceso se empleó instrumentación electrónica integrada al prototipo. La temperatura del aire dentro del sistema fue medida mediante sensores PT100 acoplados al módulo de acondicionamiento MAX31865, los cuales ofrecen alta precisión y estabilidad para aplicaciones térmicas. La humedad relativa se registró mediante sensores digitales SHT31, adecuados para monitoreo ambiental en sistemas de secado agrícola. Todos los datos fueron adquiridos y procesados mediante un microcontrolador ESP32, que permitió el control básico del sistema y el almacenamiento de las mediciones para su posterior análisis.

Adicionalmente, el contenido de humedad del grano de café se verificó utilizando un medidor de humedad para café en diferentes etapas del proceso, con el fin de evaluar la evolución del secado hasta alcanzar niveles adecuados para almacenamiento, considerando que la reducción controlada de humedad es un factor determinante en la calidad final del grano [1].

Durante cada prueba se documentó el comportamiento del prototipo en distintas fases del proceso, analizando la estabilidad del giro del tambor, la distribución térmica interna y la relación entre las condiciones ambientales medidas y la reducción del contenido de humedad del grano. Esta información permitió realizar la caracterización experimental del sistema y evaluar su desempeño frente a los objetivos planteados.

3.2.1 Validez de la técnica

La validez de la técnica se fundamentó en la capacidad del sistema experimental para medir de forma confiable y con bajo margen de error las variables críticas del proceso de secado del café, principalmente la temperatura del aire y la humedad relativa dentro del prototipo. Estas variables fueron registradas mediante sensores electrónicos previamente calibrados, lo que permitió garantizar la precisión y consistencia de los datos obtenidos durante las pruebas.

El proceso de calibración se realizó mediante la comparación con instrumentos de referencia y condiciones controladas, asegurando que las mediciones representen adecuadamente el comportamiento real del sistema térmico y de secado. De esta manera, se buscó minimizar errores sistemáticos que puedan afectar la interpretación de los resultados experimentales.

Adicionalmente, la validez del estudio se reforzó mediante la comparación del desempeño del sistema propuesto con un método convencional de secado en patio, utilizado como referencia práctica. Esta comparación permitió determinar si el secador solar con tambor rotatorio instrumentado electrónicamente presenta mejoras en términos de tiempo de secado, estabilidad térmica y uniformidad de la humedad final del grano, aportando evidencia experimental sobre la efectividad del prototipo desarrollado.

3.2.2 Confiabilidad de la técnica

La confiabilidad técnica del estudio se garantizó mediante la repetición de múltiples pruebas experimentales utilizando el mismo prototipo de tambor rotatorio y los mismos instrumentos de medición previamente calibrados. Este procedimiento permitió verificar que, al mantener condiciones operativas similares (carga de café, configuración del sistema, condiciones ambientales controladas y parámetros de operación), los resultados obtenidos presenten un comportamiento consistente.

Asimismo, la recolección continua de datos de temperatura y humedad durante cada ciclo de secado permitió identificar posibles variaciones del sistema y evaluar la estabilidad de las mediciones. La repetibilidad de los días de secado contribuirá a reducir la influencia de errores aleatorios y a fortalecer la confiabilidad de los resultados experimentales, asegurando que las conclusiones sobre el desempeño del secador solar con tambor rotatorio sean técnicamente válidas y reproducibles.

3.3 Instrumentos de recolección de información

La recolección de información del proceso de secado se realizó mediante un sistema de instrumentación electrónica que permitió medir y registrar en tiempo real las variables térmicas y ambientales del sistema. Este sistema estuvo compuesto por un sensor de temperatura tipo PT100 acoplado a un módulo MAX31865, dos sensores digitales de temperatura y humedad relativa SHT31, un sistema de adquisición basado en microcontrolador ESP32 y un medidor de humedad de grano modelo DH-200X para la determinación del contenido de humedad final del café.

La medición de la temperatura interna del tambor rotatorio se efectuó mediante un sensor PT100, seleccionado por su estabilidad y precisión en aplicaciones de control térmico. Este sensor presenta una precisión nominal de $\pm 0,3$ °C. Para verificar su correcto funcionamiento, se realizaron pruebas experimentales consistentes en cambios controlados de temperatura, mediante inmersión progresiva en agua caliente observando la respuesta del sensor ante variaciones térmicas. Estas pruebas se repitieron en cinco (5) ocasiones, permitiendo comprobar la consistencia y repetibilidad de las mediciones.

Por su parte, la medición de la temperatura y la humedad relativa del aire se realizó mediante dos sensores SHT31, ubicados estratégicamente para registrar condiciones ambientales y del sistema. Estos sensores presentan una precisión de $\pm 0,3$ °C en temperatura y ± 2 % en humedad relativa. Su verificación experimental se llevó a cabo mediante pruebas de exposición a condiciones extremas, incluyendo ambientes de alta temperatura (agua caliente) y baja temperatura (hielo) igualmente realizando cinco (5) mediciones por condición para cada sensor. Los resultados evidenciaron un comportamiento estable y coherente frente a las variaciones ambientales.

Durante las pruebas experimentales del sistema de secado, los datos fueron adquiridos de manera continua mediante el microcontrolador ESP32, el cual registró las variables con un intervalo de muestreo constante cada segundo. Este proceso permitió obtener múltiples mediciones por cada variable a lo largo del tiempo mejorando la confiabilidad del análisis.

El contenido de humedad del grano de café como variable dependiente principal fue medido utilizando un medidor de humedad de grano modelo DH-200X con una precisión aproximada de $\pm 0,5$ % en base húmeda. Para cada ensayo experimental se realizaron tres (3) mediciones de la humedad del café, calculando posteriormente el valor promedio con el fin de garantizar mayor exactitud en los resultados obtenidos.

La incertidumbre de las mediciones se estimó a partir de las especificaciones técnicas de los instrumentos y del análisis de repetibilidad obtenido durante las pruebas de verificación. En este sentido, se consideraron incertidumbres de $\pm 0,3$ °C para el sensor PT100, $\pm 0,3$ °C y ± 2 % para los sensores SHT31 en temperatura y humedad relativa respectivamente, y $\pm 0,5$ % para el medidor de humedad del grano. Estas incertidumbres fueron tenidas en cuenta en el análisis de los datos experimentales, permitiendo establecer un nivel adecuado de confiabilidad en los resultados.

Adicionalmente, las variables ambientales externas, como la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la humedad relativa, fueron obtenidas a partir de registros de la estación meteorológica de la Universidad CESMAG. Esta estación realiza mediciones automáticas a intervalos de cinco minutos, generando una base de datos continua de las condiciones climáticas.

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron los datos correspondientes a los días en los cuales se llevaron a cabo las pruebas experimentales, permitiendo correlacionar las condiciones ambientales con el comportamiento del sistema de secado. El uso de esta información permitió contar con datos confiables y representativos de las condiciones reales durante cada ensayo.

En conjunto el sistema de instrumentación implementado permitió obtener datos consistentes, repetibles y confiables, adecuados para el análisis del proceso de secado y la evaluación de la efectividad del sistema propuesto.

3.4 Procesamiento de información

Los datos de temperatura, humedad relativa, contenido de humedad del grano, velocidad de secado y tiempo fueron organizados en hojas de cálculo, donde se realizó su depuración y validación.

Posteriormente, se aplicó un análisis estadístico descriptivo mediante el cálculo de medidas como el valor promedio, los valores mínimos y máximos, así como la desviación estándar, con el fin de caracterizar el comportamiento del proceso y evaluar la variabilidad de los resultados entre los diferentes ensayos experimentales.

El análisis de la variabilidad permitió identificar que las diferencias entre ensayos se mantienen dentro de rangos controlados, lo cual respalda la consistencia y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Adicionalmente, se realizaron representaciones gráficas de las variables en función del tiempo, lo que permitió analizar tendencias y establecer comparaciones con métodos tradicionales de secado.

4. Resultados

4.1 Descripción general del prototipo

El prototipo se realizó con el objetivo de desarrollar un sistema experimental que permitiera evaluar la efectividad de un tambor rotatorio en el proceso de secado de café utilizando energía solar como fuente principal de energía. El diseño del sistema se llevó a cabo integrando diferentes componentes mecánicos, térmicos, energéticos y electrónicos, los cuales permiten generar las condiciones necesarias para el proceso de secado y el monitoreo de las variables involucradas.

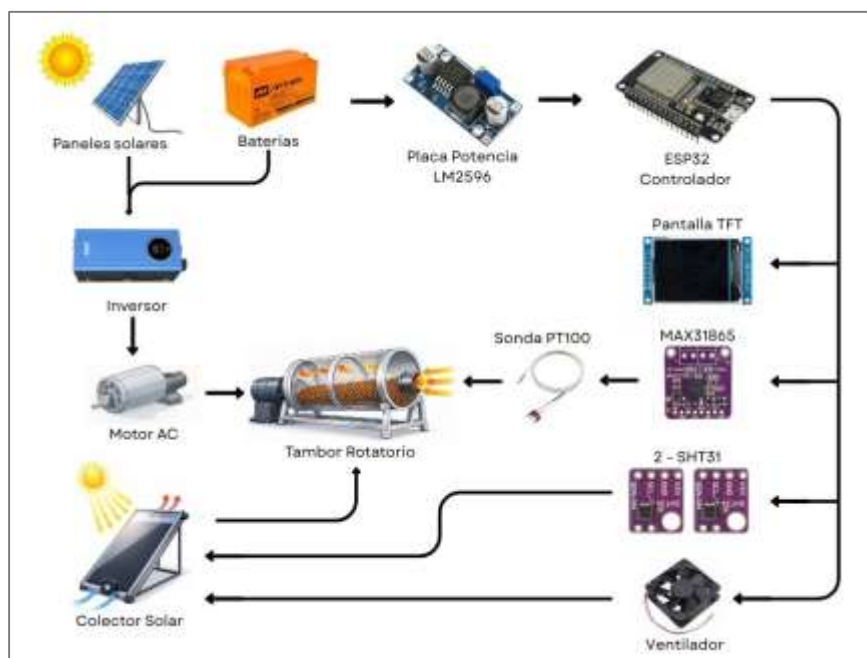
El prototipo está conformado principalmente por un tambor rotatorio, destinado a contener el café durante el proceso de secado, y un colector solar de aire, encargado de calentar el aire que posteriormente es utilizado para reducir el contenido de humedad del grano. El aire calentado en el colector es conducido hacia el tambor rotatorio, donde entra en contacto con el café y facilita la evaporación de la humedad presente en el producto.

Para el suministro de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los diferentes componentes del sistema, se incorporó un sistema fotovoltaico compuesto por paneles solares, baterías y un inversor. Este sistema permite alimentar los elementos eléctricos del prototipo, garantizando su operación de manera autónoma mediante el aprovechamiento de la energía solar.

Adicionalmente, el sistema incluye un sistema electrónico de monitoreo basado en un microcontrolador ESP32 y sensores de temperatura y humedad. Estos dispositivos permiten registrar las condiciones térmicas y ambientales presentes durante el proceso de secado, proporcionando información en tiempo real sobre el comportamiento del sistema.

La integración de estos componentes dio como resultado un sistema experimental funcional que permite realizar pruebas de secado de café bajo condiciones controladas, facilitando el análisis del comportamiento del proceso y la evaluación del desempeño del tambor rotatorio como alternativa para el secado utilizando energía solar.

Figura 4. Esquema prototipo



4.1.1 Requerimientos del sistema

Para el desarrollo del prototipo de secado de café se establecieron una serie de requerimientos técnicos que permitieran garantizar el correcto funcionamiento del sistema y facilitar la evaluación experimental del proceso de secado.

En primer lugar, el sistema debía ser capaz de generar un flujo continuo de aire caliente que permitiera favorecer la evaporación de la humedad presente en el grano de café. Para ello, se incorporó un colector solar térmico encargado de captar la radiación solar y transferir energía térmica al aire que circula dentro del sistema.

Asimismo, se estableció como requerimiento la incorporación de un mecanismo que permitiera el movimiento continuo del café durante el secado, con el fin de mejorar la uniformidad térmica del proceso. Este requerimiento fue satisfecho mediante la implementación de un tambor rotatorio con aletas internas y que a su vez es accionado por un sistema motriz.

Otro requerimiento fundamental fue la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de las variables principales del proceso, particularmente la temperatura y la humedad relativa del aire dentro del secador. Para ello se integraron sensores PT100 con módulo MAX31865 y sensores digitales SHT31 conectados a un microcontrolador ESP32.

Adicionalmente, el sistema debía operar utilizando fuentes de energía renovables, por lo que se incorporó un sistema fotovoltaico compuesto por paneles solares, baterías de almacenamiento y un inversor, encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los componentes electrónicos y mecánicos del prototipo.

Finalmente, se estableció como requerimiento la capacidad de registrar los datos experimentales durante el proceso de secado, permitiendo su posterior análisis para evaluar la efectividad del sistema desarrollado.

4.2 Subsistema mecánico

El subsistema mecánico del prototipo está encargado de permitir el movimiento controlado del tambor rotatorio, así como de garantizar la adecuada contención, mezcla y descarga del café durante el proceso de secado. Este subsistema constituye una parte fundamental del sistema, ya que influye directamente en la uniformidad del secado y en la eficiencia del proceso.

El diseño mecánico se desarrolló considerando criterios de resistencia estructural, funcionalidad operativa y facilidad de fabricación, permitiendo la correcta integración con los subsistemas térmico, electrónico y energético. En términos generales, el sistema está compuesto por un tambor rotatorio perforado, un sistema de soporte estructural y un mecanismo de transmisión que permite generar el movimiento continuo del tambor.

Con el fin de mejorar la organización del documento y evitar la sobrecarga de información técnica, los aspectos detallados del diseño mecánico y los planos constructivos del tambor rotatorio se presentan en el Anexo D.

A partir de esta configuración general, en las siguientes secciones se presenta el análisis del sistema de transmisión y accionamiento del tambor rotatorio, incluyendo el cálculo del torque, la verificación del funcionamiento bajo carga y la construcción mecánica del sistema.

4.2.1 Sistema de transmisión y accionamiento

El movimiento del tambor es generado mediante un sistema de transmisión acoplado a un motor, el cual permite mantener una rotación constante durante la operación del sistema. Este sistema fue diseñado considerando la carga del tambor y las condiciones de operación del prototipo.

4.2.1.1 Motorreductor

El movimiento del tambor es generado mediante un motorreductor eléctrico, el cual combina un motor de inducción con un sistema de reducción mecánica de velocidad. Este tipo de dispositivo permite disminuir la velocidad de rotación del motor y aumentar el torque disponible en el eje de salida, lo cual resulta adecuado para aplicaciones donde se requiere mover cargas a baja velocidad, como en el caso del tambor rotatorio utilizado en el proceso de secado del café.

En el sistema desarrollado se empleó un motorreductor modelo 4IK30GN-AF, acoplado a un reductor 4GN120K con relación de transmisión 120:1. Este conjunto permite obtener una velocidad de salida aproximada de 14 rpm, adecuada para generar una rotación controlada del tambor y favorecer el movimiento uniforme del café durante el proceso de secado.

El uso de un motorreductor en este tipo de sistemas resulta conveniente debido a que proporciona el torque necesario para vencer la inercia del tambor y de las distintas muestras de 6kg de café contenidas en su interior, permitiendo un movimiento estable y continuo durante la operación del secador.

Parámetro	Especificación
Tipo de motor	Motor de inducción AC con reductor
Modelo del motor	4IK30GN-AF
Modelo del reductor	4GN120K
Potencia nominal	30 W
Voltaje de alimentación	110-220V AC
Frecuencia	50/60 Hz
Velocidad nominal del motor	1700 rpm
Relación de reducción	120:1
Velocidad de salida aproximada	14 rpm
Tipo de transmisión al tambor	Sistema de poleas y correa
Aplicación en el sistema	Accionamiento del tambor rotatorio

Tabla 2 Características técnicas del motorreductor utilizado en el sistema de accionamiento

4.2.1.2 Sistema de poleas

El movimiento generado por el motorreductor se transmite al eje del tambor mediante un sistema de poleas y correa de transmisión. Este sistema está compuesto por una polea motriz, acoplada al eje de salida del motorreductor, y una polea conducida, conectada al eje de rotación del tambor.

En el sistema desarrollado se empleó una polea superior de 2.5 pulgadas de diámetro, instalada en el eje del motorreductor, y una polea inferior de 2 pulgadas de diámetro, conectada al eje del tambor. La diferencia de diámetros entre ambas poleas permite modificar ligeramente la relación de transmisión del sistema, ajustando la velocidad de rotación transmitida al tambor.

La relación de transmisión entre las poleas puede expresarse como:

$$i_p = \frac{D_{conducida}}{D_{motriz}}$$

Donde:

$D_{conducida}$: diámetro de la polea instalada en el eje del motor

D_{motriz} : diámetro de la polea instalada en el eje del motor

Sustituyendo los valores del sistema:

$$i_p = \frac{2.5}{2}$$

$$i_p = 1.25$$

Esta relación permite transmitir el movimiento del motorreductor hacia el tambor manteniendo una velocidad de rotación adecuada para el proceso de secado. El uso de poleas y correa también permite una transmisión suave del movimiento y ayuda a absorber pequeñas desalineaciones entre los ejes del sistema.

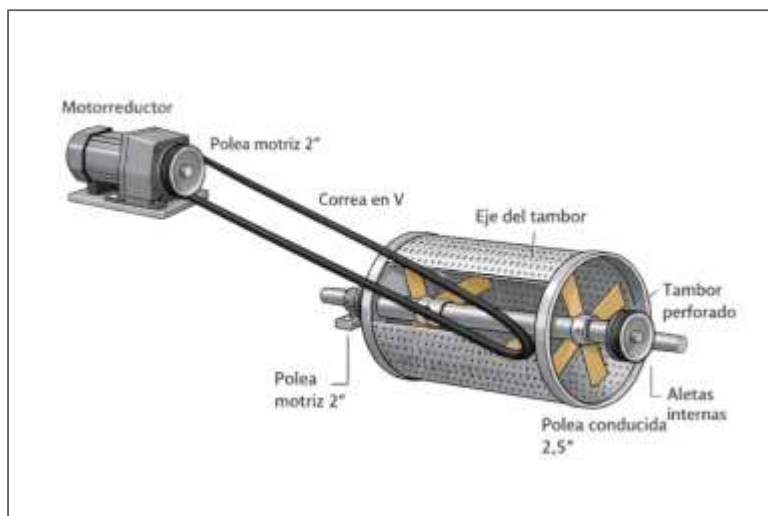


Figura 5. Sistema de transmisión del tambor

4.2.1.3 Correa de transmisión en V

La transmisión del movimiento entre el motorreductor y el eje del tambor se realiza mediante una correa tipo V, que conecta la polea motriz del motor con la polea conducida del tambor. Este tipo de correa, de sección trapezoidal, permite un adecuado acoplamiento con las poleas, garantizando una transmisión eficiente del movimiento.

El uso de este sistema presenta ventajas como la reducción de vibraciones, transmisión suave y capacidad de compensar pequeñas desalineaciones, además de facilitar el montaje y mantenimiento.

Durante la operación, la correa transmite la potencia necesaria para la rotación del tambor. Para asegurar un funcionamiento adecuado, es fundamental mantener una correcta tensión, evitando deslizamientos y garantizando la estabilidad del sistema.

4.2.1.4 Eje de transmisión del tambor

El movimiento proveniente del sistema de transmisión es transferido al eje de rotación del tambor, el cual se encarga de transmitir el movimiento hacia toda la estructura mediante la cruceta interna. Este eje atraviesa el centro del tambor y permite distribuir el movimiento de manera uniforme.

Se empleó un eje de acero de 1 pulgada de diámetro, seleccionado por su resistencia para soportar las cargas del sistema y transmitir el torque generado por el motorreductor de forma estable. El eje está soportado por rodamientos, lo que reduce la fricción y garantiza un giro suave.

Durante la operación, el eje transmite el movimiento a la cruceta estructural, la cual lo distribuye hacia el cilindro del tambor, permitiendo su rotación continua y uniforme.

4.2.1.5 Funcionamiento del sistema de accionamiento

El movimiento del sistema de transmisión es transferido al eje de rotación del tambor, el cual se encarga de distribuir el movimiento hacia toda la estructura mediante la cruceta interna. Este eje atraviesa el centro del tambor y permite una rotación uniforme.

Se empleó un eje de acero de 1 pulgada de diámetro, seleccionado por su capacidad para soportar las cargas del sistema y transmitir el torque de forma estable. El eje está soportado por rodamientos, lo que reduce la fricción y garantiza un giro suave.

Durante la operación, el movimiento es transmitido hacia la cruceta estructural y de allí al cilindro del tambor, permitiendo su rotación continua.

4.2.2 Cálculo del torque del sistema de accionamiento

Con el fin de verificar que el sistema de accionamiento es capaz de generar el movimiento necesario para el tambor rotatorio durante el proceso de secado, se realizó el cálculo del torque disponible a partir de las características del motorreductor y del sistema de transmisión utilizado.

El sistema de accionamiento está compuesto por:

- Motorreductor 4IK30GN-AF
- Reductor 4GN120K (120:1)
- Sistema de poleas 2" – 2.5"
- Transmisión por correa en V
- Eje de transmisión 1 pulgada

4.2.2.1 Torque del motor

El torque generado por el motor puede calcularse a partir de la relación entre potencia y velocidad de rotación:

$$T = \frac{9550P}{n}$$

Donde:

T : torque del motor (N.m)

P : potencia del motor (kW)

n : velocidad del motor (rpm)

Datos del motor:

$$P = 30W = 0.03kW$$

$$n = 1700 \text{ rpm}$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{9550(0.03)}{1700}$$

$$T = 0.168 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, el torque generado por el motor es aproximadamente:

$$T_m \approx 0.17 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4.2.2.2 Torque a la salida del reductor

El motor este acoplado a un reductor 120:1, el cual disminuye la velocidad y aumenta el torque.

$$T_s = T_m \cdot i$$

Donde:

i es la relación de reducción

$$T_s = 0.168 \cdot 120$$

$$T_s = 20.16 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Considerando pérdidas mecánicas en el reductor (eficiencia aproximada):

$$n = 0.75$$

El torque real es:

$$T_{real} = T_m \cdot i \cdot n$$

$$T_{real} = 0.168 \cdot 120 \cdot 0.75$$

$$T_{real} = 15,12 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, el torque disponible a la salida del motorreductor es aproximadamente:

$$T_{salida} \approx 15.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4.2.2.3 Relación de transmisión del sistema de poleas

El sistema de transmisión utiliza:

Polea motriz = 2 pulgadas

Polea conducida = 2.5 pulgadas

La relación de transmisión entre poleas es:

$$i_p = \frac{D_{conducida}}{D_{motriz}}$$

$$i_p = \frac{2.5}{2}$$

$$i_p = 1.25$$

Esto significa que la velocidad del tambor se reduce 1.25 veces y el torque aumenta en la misma proporción.

4.2.2.4 Torque transmitido al tambor

El torque transmitido al tambor se calcula mediante:

$$T_{tambor} = T_{salida} \cdot i_p$$

$$T_{tambor} = 15.12 \cdot 1.25$$

$$T_{tambor} = 18.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Considerando pérdidas en la transmisión por correa ($\approx 95\%$ eficiencia):

$$n_c = 0.95$$

$$T_{tamborreal} = 18.9 \cdot 0.95$$

$$T_{tamborreal} \approx 17.9 N \cdot m$$

4.2.2.5 *Velocidad final del tambor*

La velocidad final se calcula considerando la reducción del reductor y la relación de poleas.

Velocidad salida reductor:

$$n_{salida} = \frac{1700}{120}$$

$$n_{salida} \approx 14 \text{ rpm}$$

Velocidad final del tambor:

$$n_{tambor} = \frac{14}{1.25}$$

$$n_{tambor} \approx 11.2 \text{ rpm}$$

4.2.2.6 *Resultados del análisis*

El sistema de accionamiento proporciona aproximadamente:

Torque disponible en el tambor:

$$T \approx 18 N \cdot m$$

Velocidad de rotación del tambor:

$$n \approx 11 \text{ rpm}$$

Estos valores son adecuados para el funcionamiento del tambor rotatorio, ya que permiten generar una rotación que garantice una buena cantidad de café quede suspendida dentro del tambor de tal forma que el paso del aire caliente arrope de mejor forma el café, así mejorando el proceso de secado.

4.2.2.7 Conclusión técnica

El análisis realizado demuestra que el motorreductor seleccionado, junto con el sistema de transmisión por poleas y correa en V, proporciona el torque suficiente para las distintas pruebas con cargas de 6Kg de café dentro del tambor rotatorio, garantizando un funcionamiento estable del sistema.



Figura 6. Diagrama del flujo de torque en el sistema de accionamiento del tambor rotatorio

La figura 16, muestra la transmisión del torque en el sistema de accionamiento del tambor rotatorio utilizado en el prototipo de secado de café. El movimiento mecánico se genera inicialmente en el motorreductor, donde la energía eléctrica se convierte en movimiento rotacional con un torque inicial. Posteriormente, este torque es transmitido a través del sistema de poleas y la correa de transmisión tipo V hacia el eje del tambor.

El eje de transmisión distribuye el movimiento hacia la estructura interna del tambor mediante la cruceta estructural, permitiendo que el cilindro rotatorio gire de manera uniforme. Durante este proceso, el torque disponible se incrementa debido a la reducción de velocidad generada por el sistema de transmisión, lo cual permite mover la carga de café contenida dentro del tambor.

4.2.3 Verificación del torque requerido para mover el tambor con carga

Con el fin de validar la selección del motorreductor utilizado en el sistema, se realizó una estimación del torque mínimo requerido para poner en movimiento el tambor rotatorio con las cargas ya establecidas de café durante el proceso de secado. Este análisis permite comparar el torque exigido por las cargas de 6Kg con el torque disponible en el eje del tambor.

4.2.3.1 Datos considerados

Con el fin de validar la selección del motorreductor utilizado en el sistema, se realizó una estimación del torque mínimo requerido para poner en movimiento el tambor rotatorio con la carga de café durante el proceso de secado. Este análisis permite comparar el torque exigido por la carga con el torque disponible en el eje del tambor.

Para el cálculo se tomaron los siguientes valores:

- Masa de café cargado en el tambor:

$$m = 6kg$$

- Aceleración de la gravedad:

$$g = 9.81m/s^2$$

- Diámetro interno del tambor:

$$D = 46 \text{ cm} = 0.46 \text{ m}$$

- Radio interno del tambor:

$$r = 0.23 \text{ m}$$

La fuerza ejercida por el peso del café se calcula como:

$$F = m \cdot g$$

Sustituyendo:

$$F = 6 \cdot 9.81$$

$$F = 58.86 \text{ N}$$

4.2.3.2 *Torque requerido por la carga*

De forma conservadora, el torque requerido se puede estimar suponiendo que el peso del café actúa a la distancia máxima respecto al eje de rotación del tambor. Bajo esta condición, el torque se calcula mediante:

$$T_{req} = F \cdot r$$

Sustituyendo los valores:

$$T_{req} = 58.86 \cdot 0.23$$

$$T_{req} = 13.5378 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, el torque requerido aproximado para mover la carga de café es:

$$T_{req} \approx 13.54 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4.2.3.3 *Comparación con el torque disponible*

En la subsección anterior se obtuvo que el torque real aproximado transmitido al tambor es:

$$T_{tambor} \approx 17.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Comparando ambos valores:

$$T_{tambor} > T_{req}$$

$$17.9 > 13.54$$

Esto indica que el torque disponible en el sistema de accionamiento es mayor que el torque requerido para mover la carga de café dentro del tambor.

4.2.3.4 *Margen de seguridad aproximado*

El margen de seguridad mecánico puede estimarse mediante:

$$\text{Margen} = \frac{T_{tambor} - T_{req}}{T_{req}} \times 100$$

Sustituyendo:

$$\text{Margen} = \frac{17.9 - 13.54}{13.54} \times 100$$

$$\text{Margen} \approx 32.2\%$$

Por lo tanto, el sistema presenta un margen de seguridad aproximado de:

$$32.2\%$$

4.2.3.5 Interpretación del resultado

Los resultados muestran que el torque suministrado por el motorreductor y el sistema de transmisión es suficiente para poner en movimiento el tambor con una carga de 6 kg de café. Esto confirma que el sistema de accionamiento seleccionado es adecuado para el funcionamiento del tambor rotatorio durante el proceso de secado.

Debe considerarse además que este cálculo corresponde a una estimación conservadora, ya que supone que toda la carga actúa a la distancia máxima respecto al eje. En la práctica, el café se distribuye dentro del tambor y parte de la carga es soportada por la geometría del sistema y por los rodamientos, por lo que el torque real requerido en operación puede ser menor que el valor calculado.

4.2.3.6 Conclusión

De acuerdo con los cálculos realizados, el torque real disponible en el tambor:

$$T_{\text{tambor}} \approx 17.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

De acuerdo con los cálculos realizados, el torque real disponible en el tambor:

$$T_{\text{req}} \approx 13.54 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, el sistema de accionamiento implementado cuenta con la capacidad suficiente para generar el movimiento rotacional del tambor durante el proceso de secado, garantizando un funcionamiento estable y adecuado del prototipo.

4.2.4 Construcción mecánica del tambor rotatorio

Una vez finalizado el diseño del tambor rotatorio, se procedió a la fabricación del prototipo utilizando lámina metálica perforada, perfiles estructurales y procesos de manufactura como corte, doblado, soldadura y ensamblaje.

Inicialmente se construyó la estructura de soporte, la cual permite sostener el tambor, el eje y el sistema de transmisión, proporcionando estabilidad al conjunto. Posteriormente, se fabricó el cilindro perforado a partir de lámina metálica, permitiendo el paso del aire caliente durante el proceso de secado.

En el interior del tambor se instaló una cruceta estructural conectada al eje de rotación, encargada de transmitir el movimiento al cilindro. Asimismo, se incorporaron aletas internas que facilitan el movimiento del café durante la rotación.

El tambor se complementa con placas laterales que proporcionan soporte estructural, una compuerta para la carga del café y una escotilla inferior para la descarga, la cual se realiza mediante una bandeja recolectora deslizante.

Finalmente, el tambor fue montado sobre la estructura de soporte y acoplado al sistema de transmisión, permitiendo su operación durante el proceso de secado.



Figura 7. Fabricación de la estructura metálica del prototipo



Figura 8. Construcción del cilindro perforado del tambor



Figura 9. Fabricación de la cruzeta estructural del tambor



Figura 10. Instalación de las aletas internas



Figura 11. Integración del tambor con la estructura



Figura 12. Tambor rotatorio ensamblado

4.3 Subsistema térmico de captación solar

El subsistema térmico de captación solar constituye la fuente principal de energía térmica del sistema de secado, siendo el encargado de elevar la temperatura del aire que posteriormente es conducido hacia el tambor rotatorio. Este subsistema permite aprovechar la radiación solar reduciendo la dependencia de fuentes externas y mejorando la eficiencia del proceso.

El sistema está basado en un colector solar de aire diseñado para captar la radiación solar mediante una superficie absorbente y transferir el calor al flujo de aire que circula en su interior. Este aire caliente es impulsado hacia el tambor mediante ventilación forzada, favoreciendo la transferencia de calor y la evaporación de la humedad contenida en el café.

Con el fin de facilitar la comprensión del documento y evitar la sobrecarga de información técnica en el cuerpo principal, los aspectos relacionados con el diseño detallado y los planos constructivos del colector solar se presentan en el Anexo E.

A partir de esta configuración, en las siguientes secciones se presentan los cálculos térmicos del sistema y el proceso de construcción del colector solar, con el fin de evaluar su desempeño en la captación de energía y su aporte al proceso de secado del café.

4.3.1 Cálculos térmicos

4.3.1.1 Área útil de captación del colector

Para el análisis térmico del colector se considera como área útil de captación la superficie de la lámina absorbente, ya que esta corresponde a la zona donde incide la radiación solar y se produce la transferencia de calor hacia el aire.

El área útil del colector se calcula mediante:

$$A_c = L \cdot W$$

- A_c área útil del colector (m^2)
- L longitud de la lámina absorbente (m)
- W ancho de la lámina absorbente (m)

Sustituyendo las dimensiones del colector:

$$\begin{aligned}L &= 0.98m \\W &= 0.74m \\A_c &= 0.98 \cdot 0.74 \\A_c &= 0.7252m^2\end{aligned}$$

Por lo tanto, el área útil de captación del colector es aproximadamente:

$$A_c \approx 0.73m^2$$

4.3.1.2 Estimación de la potencia térmica del colector

La potencia térmica útil del colector solar puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$Q_u = n \cdot A_c \cdot G$$

Donde:

Q_u : potencia térmica útil del colector (W)

n : eficiencia térmica del colector

A_c : área útil del colector (m^2)

G : irradiancia solar incidente (W/m^2)

Sustituyendo el área útil obtenida:

$$Q_u = n \cdot 0.7252 \cdot G$$

Si se considera una eficiencia térmica aproximada del colector de:

$$n = 0.50$$

Y una irradiancia solar representativa de:

$$G = 800 W/m^2$$

Entonces:

$$Q_u = 0.50 \cdot 0.7252 \cdot 800$$

$$Q_u \approx 290 \text{ W}$$

Este valor corresponde a una estimación de la potencia térmica que el colector puede transferir al aire durante condiciones ideales de operación.

4.3.1.3 Incremento de temperatura del aire en el colector

El funcionamiento del colector solar puede analizarse también a partir del incremento de temperatura que experimenta el aire al circular por el interior del sistema. Este incremento térmico está asociado a la energía útil transferida desde la superficie absorbente hacia el flujo de aire.

La potencia térmica útil del colector puede expresarse mediante la siguiente ecuación de balance de energía:

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_s - T_e)$$

Donde:

- Q_u : potencia térmica útil del colector (W)
- \dot{m} : flujo másico de aire (kg/s)
- c_p : calor específico del aire (J/kg·°C)
- T_s : temperatura de salida del aire del colector (°C)
- T_e : temperatura de entrada del aire del colector (°C)

Despejando el incremento de temperatura del aire:

$$\Delta T = T_s - T_e = \frac{Q_u}{\dot{m} c_p}$$

Este modelo permite estimar el aumento de temperatura del aire a partir de la potencia térmica útil entregada por el colector.

Si se considera, por ejemplo, una potencia térmica útil aproximada de:

$$Q_u = 290W$$

Un calor específico del aire de:

$$c_p = 1005 J/kg \cdot ^\circ C$$

Y un flujo masico de aire de:

$$\dot{m} = 0.02 \frac{kg}{s}$$

Entonces el incremento de temperatura del aire es:

$$\Delta T = \frac{290}{0.02 \cdot 1005}$$

$$\Delta T = \frac{290}{20.1}$$

$$\Delta T \approx 14.43^\circ C$$

Por lo tanto, bajo estas condiciones, el aire que circula por el interior del colector puede experimentar un incremento de temperatura aproximado de:

$$\Delta T \approx 14.4^\circ C$$

4.3.1.4 Interpretación de resultado

El resultado obtenido indica que el colector solar es capaz de elevar de manera significativa la temperatura del aire que atraviesa el sistema. Este incremento térmico permite mejorar las condiciones del proceso de secado, ya que un aire más caliente favorece la

transferencia de calor hacia el café y aumenta la capacidad de evaporación de la humedad contenida en el grano.

En consecuencia, el colector solar no solo actúa como elemento de captación de energía, sino también como un componente fundamental para generar el gradiente térmico requerido en el proceso de secado del café dentro del tambor rotatorio.

4.3.1.5 Interpretación del diseño

Los resultados obtenidos muestran que el colector solar cuenta con un área útil de captación aproximada de 0.73 m², lo cual permite aprovechar la radiación solar para calentar el aire utilizado en el proceso de secado. La configuración de un solo canal de aire facilita la circulación del flujo a través del colector y permite una transferencia de calor eficiente entre la superficie absorbente y el aire.

De esta manera, el colector solar constituye el elemento encargado de proporcionar la energía térmica necesaria para elevar la temperatura del aire que ingresa al tambor rotatorio, contribuyendo al proceso de evaporación de la humedad del café.

4.3.2 Construcción colector solar

La construcción del colector solar se realizó conforme al diseño previamente definido en SolidWorks, respetando las dimensiones y la disposición de los componentes para garantizar su correcto funcionamiento.

Inicialmente se adecuó la base del colector a partir de una lámina de MDF, la cual fue cortada a las dimensiones requeridas. El material sobrante fue utilizado para fabricar las tapas internas encargadas de dirigir el flujo de aire. Posteriormente, se cortaron piezas de madera para conformar los laterales, la entrada y la salida de aire, realizando las perforaciones necesarias para la circulación del flujo y la instalación del ventilador.

La estructura fue ensamblada mediante tornillos y puntillas, asegurando su rigidez. Luego, se aplicó pintura negro mate en el interior del colector para mejorar la absorción de radiación térmica.

La superficie absorbente se fabricó a partir de una lámina de zinc conformada y pintada de negro, la cual fue instalada sobre la base del colector. Posteriormente, se colocó el vidrio superior, fijado con silicona para garantizar el sellado del sistema.

Finalmente, se instalaron las tapas internas para dirigir el flujo de aire y un ventilador de 12 V en la entrada, encargado de impulsar el aire a través del colector hacia el tambor rotatorio



Figura 13. Base de madera colector



Figura 14. Base con lamina de zinc pintados de negro mas el ventilador



Figura 15. Base, lamina de zinc y vidrio

4.4 Subsistema fotovoltaico

El subsistema fotovoltaico tiene como finalidad suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los componentes electrónicos, el sistema de control y los elementos de ventilación del prototipo de secado. Este subsistema permite que el sistema opere de manera autónoma, aprovechando una fuente de energía renovable y reduciendo la dependencia de la red eléctrica convencional.

El sistema está compuesto por paneles solares encargados de la generación de energía, un banco de baterías para el almacenamiento y un inversor que permite la adecuación de la energía eléctrica según los requerimientos de los diferentes dispositivos del sistema. La integración de estos elementos garantiza un suministro energético estable durante el proceso de secado.

los aspectos relacionados con el diseño detallado del sistema fotovoltaico y las especificaciones de sus componentes se presentan en el Anexo F.

En las siguientes secciones se presentan los cálculos energéticos del sistema fotovoltaico, los cuales permiten determinar la capacidad de generación y almacenamiento de energía necesaria para el funcionamiento del prototipo.

4.4.1 Cálculos energéticos

4.4.1.1 Estimación del consumo energético del sistema

La potencia de cada componente se calcula mediante:

$$P = V \cdot I$$

Componente	Voltaje	Corriente	Potencia
ESP32	5V	0.25 A	1.25W
PT100 + MAX31865	5V	0.05 A	0.25W
SHT31	3.3V	0.02 A	0.07W
Ventilador	12V	0.40 A	4.80W
Motor tambor (AC)	110V	0.65 A	30W
Total cargas			36.37W

Tabla 3. Consumo energético del sistema

4.4.1.2 Consideración del inversor

El inversor tiene pérdidas. Se asume una eficiencia de:

$$n = 90\% = 0.9$$

Entonces, la potencia real que debe suministrar el sistema para el motor es:

$$P_{motor,real} = \frac{30}{0.9} = 33.33w$$

Ahora sumamos todo:

$$P_{total} = 1.25 + 0.25 + 0.07 + 4.8 + 33.33$$

$$P_{total} = 39.7W \approx 40W$$

$$P_{total} \approx 40W$$

4.4.1.3 Configuración del sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico está compuesto por cinco paneles solares conectados en serie, cada uno con una potencia nominal de 100 W. La potencia total instalada se calcula como:

$$P_{FV} = 5 \times 100 = 500W$$

Esta capacidad instalada es significativamente mayor que la potencia requerida por el sistema, lo que permite garantizar el suministro energético y la carga simultánea del banco de baterías durante las horas de radiación solar.

4.4.1.4 Energía generada por el sistema fotovoltaico

La energía generada por los paneles depende de la radiación solar disponible. Para el análisis se consideró un valor promedio de 4.5 horas solares pico por día, correspondiente a condiciones típicas de la región.

La energía diaria generada se calcula mediante:

$$E = P \cdot t$$

$$E = 500 \times 4.5 = 2250Wh/día$$

$$E = 2.25 kWh/día$$

Este valor representa la cantidad de energía que el sistema puede producir en un día bajo condiciones promedio de radiación solar.

4.4.1.5 Sistema de almacenamiento de energía

El sistema de almacenamiento está conformado por dos baterías de 12 V y 100 Ah conectadas en serie, lo que permite obtener un sistema de 24 V.

La energía almacenada en el banco de baterías se calcula mediante:

$$E = V \cdot Ah$$

$$E = 24 \times 100 = 2400 Wh$$

$$E = 2.4 kWh$$

Este valor corresponde a la capacidad energética total disponible en el sistema de almacenamiento.

4.4.1.6 *Autonomía del sistema*

La autonomía del sistema se define como el tiempo durante el cual el sistema puede operar utilizando únicamente la energía almacenada en las baterías.

Se calcula mediante la expresión:

$$t = \frac{E}{P}$$

$$t = \frac{2400}{40} = 60h$$

Por lo tanto, el sistema presenta una autonomía teórica de aproximadamente 60 horas.

No obstante, para preservar la vida útil de las baterías, se recomienda no utilizar el 100 % de su capacidad. Considerando una profundidad de descarga del 50 %, la energía útil disponible es de 1200 Wh, lo que conduce a una autonomía real de:

$$t = \frac{1200}{40} = 30h$$

4.4.1.7 *Análisis del dimensionamiento del sistema*

Los resultados obtenidos indican que el sistema fotovoltaico presenta una potencia instalada de 500 W, mientras que la demanda del sistema es aproximadamente de 40 W. Esto demuestra que el sistema cuenta con una capacidad suficiente para alimentar los componentes del prototipo y cargar el banco de baterías.

Asimismo, la energía generada diariamente (2.25 kWh/día) es superior al consumo energético requerido durante las pruebas experimentales, lo que garantiza la sostenibilidad del sistema.

En cuanto al almacenamiento, el banco de baterías proporciona una autonomía teórica de 60 horas y una autonomía útil de aproximadamente 30 horas, lo que permite la operación del sistema incluso en condiciones de baja radiación solar.

En conjunto, estos resultados confirman que el sistema fotovoltaico implementado es adecuado para el funcionamiento del prototipo de secado de café, asegurando un suministro energético continuo y confiable.

4.5 Subsistema electrónico y de control

4.5.1 Selección de hardware para el sistema electrónico

El sistema electrónico del prototipo tiene como función principal monitorear las variables más importantes del proceso de secado y permitir el registro de datos para su posterior análisis.

El núcleo del sistema está basado en un microcontrolador ESP32, el cual actúa como unidad central de procesamiento y se encarga de la adquisición y procesamiento de los datos provenientes de los sensores instalados en el sistema.

Para la medición de la temperatura del aire se utilizan sensores de tipo PT100 conectados a un módulo de acondicionamiento MAX31865, los cuales ofrecen alta precisión en aplicaciones de medición térmica. Asimismo, se emplean sensores digitales SHT31 para medir la temperatura y la humedad relativa del aire dentro del sistema de secado.

Los datos obtenidos por los sensores son procesados por el microcontrolador y pueden ser visualizados en tiempo real mediante una interfaz de monitoreo. Este sistema permite observar el comportamiento de variables como temperatura, humedad relativa y tiempo de operación durante el proceso de secado.

Adicionalmente, el sistema electrónico permite controlar el funcionamiento del ventilador mediante modulación por ancho de pulso (PWM), lo cual facilita la regulación del flujo de aire dentro del sistema y contribuye a mantener condiciones térmicas más estables durante el proceso.

La integración del sistema de monitoreo y control permite registrar información experimental de forma continua, facilitando el análisis del comportamiento del secador y la evaluación de su efectividad en la reducción del contenido de humedad del café.

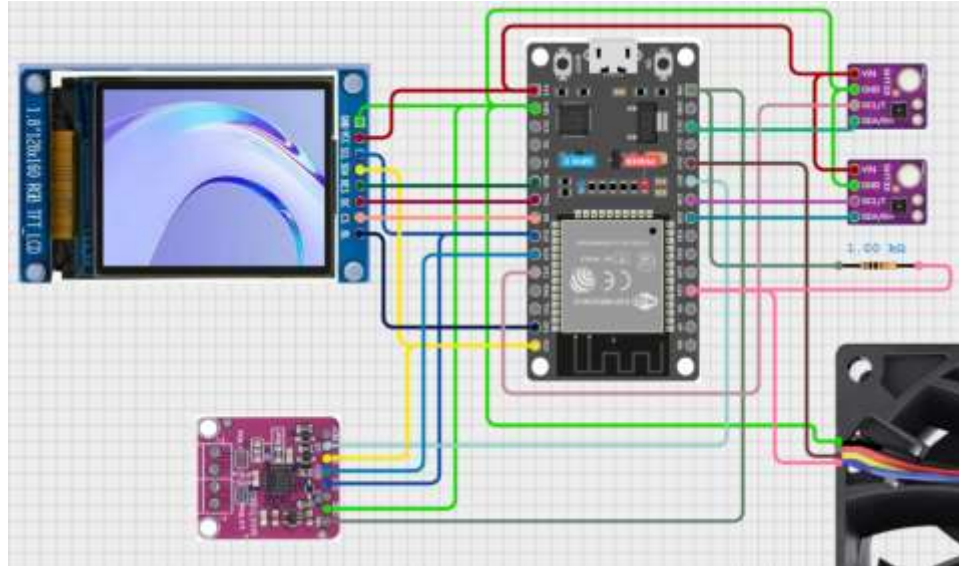


Figura 16. Diagrama del sistema electrónico

4.5.1.1 Microcontrolador ESP32

El módulo ESP32 fue seleccionado como la unidad central de control del sistema electrónico debido a sus altas prestaciones en términos de procesamiento, conectividad y versatilidad en aplicaciones embebidas. Este microcontrolador integra un procesador de doble núcleo, capacidad de comunicación inalámbrica (WiFi y Bluetooth) y múltiples interfaces de comunicación, lo que lo convierte en una solución robusta para sistemas de monitoreo en tiempo real.

Desde el punto de vista de ingeniería electrónica, el ESP32 presenta características relevantes como:

- Frecuencia de operación de hasta 240 MHz.
- Amplia cantidad de pines GPIO configurables.
- Soporte para múltiples protocolos de comunicación (SPI, I2C, UART, PWM).
- Convertidores analógico-digitales (ADC) integrados.
- Bajo consumo energético en modos de operación optimizados.

Estas características permitieron integrar en un solo dispositivo las funciones de adquisición de datos, procesamiento, comunicación y control, reduciendo la complejidad del sistema.

El ESP32 se encarga de adquirir los datos provenientes de los sensores SHT31 mediante comunicación I2C, y del módulo MAX31865 mediante comunicación SPI. La elección de estos protocolos se basa en su eficiencia y confiabilidad en la transmisión de datos digitales, especialmente en entornos donde se requiere inmunidad al ruido eléctrico.

La asignación de pines se realizó considerando criterios de compatibilidad con los periféricos internos del ESP32 y evitando conflictos entre interfaces. En el caso del bus SPI, se emplearon los pines GPIO18 (SCK), GPIO19 (MISO) y GPIO23 (MOSI), los cuales corresponden al bus SPI hardware por defecto del ESP32, garantizando mayor velocidad de comunicación y menor carga de procesamiento. El pin GPIO27 fue utilizado como CS (Chip Select), permitiendo el control del dispositivo esclavo.

Para la comunicación I2C, se utilizaron dos buses independientes con el fin de evitar conflictos de direccionamiento entre sensores SHT31. El primer bus se configuró en los pines GPIO13 (SDA) y GPIO21 (SCL), mientras que el segundo se implementó en GPIO25 (SDA) y GPIO26 (SCL), aprovechando la capacidad del ESP32 de definir buses I2C por software.

Adicionalmente, el ESP32 genera una señal PWM a través del GPIO14 para el control del ventilador. Este pin fue seleccionado por su compatibilidad con los canales de modulación LEDC del microcontrolador, permitiendo un control preciso de la velocidad. La señal de retroalimentación de velocidad (RPM) del ventilador se conectó al GPIO34, un pin de entrada únicamente, adecuado para la lectura de señales digitales sin interferir con otras funciones del sistema.

Finalmente, el ESP32 transmite los datos mediante WiFi hacia un sistema externo, permitiendo el registro y análisis de la información. Esta capacidad de conectividad fue un factor determinante en su selección, ya que facilita la implementación de sistemas de monitoreo remoto sin necesidad de hardware adicional.

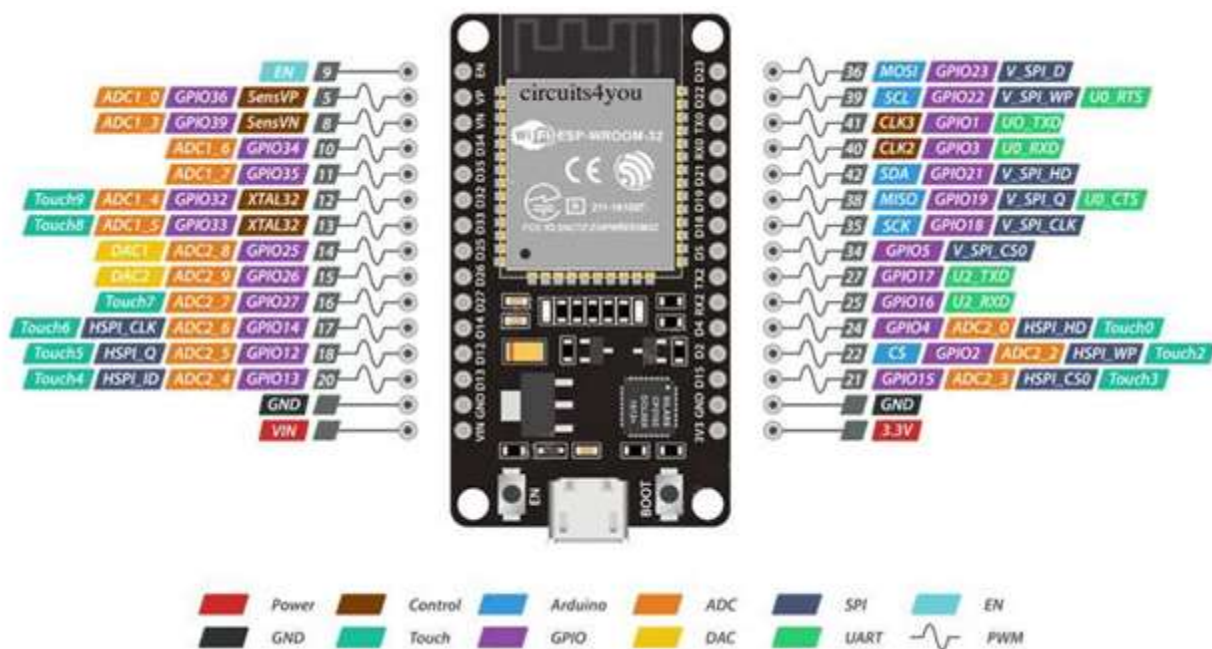


Figura 17. Microcontrolador Esp32

4.5.1.2 Módulo MAX31865 – PT100

El módulo MAX31865 fue seleccionado para la medición de temperatura debido a la necesidad de obtener datos con alta precisión y estabilidad en el proceso de secado de café. Este módulo está diseñado específicamente para trabajar con sensores RTD tipo PT100, los cuales son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales por su exactitud y comportamiento lineal.

El sensor PT100 presenta una resistencia de 100 Ω a 0 $^{\circ}\text{C}$ y una variación prácticamente lineal con la temperatura, lo que permite realizar mediciones confiables en un amplio rango térmico. Sin embargo, debido a que se trata de un sensor resistivo, es necesario un circuito de acondicionamiento que permita convertir esta variación en una señal digital utilizable. En este contexto, el MAX31865 cumple la función de:

- Excitar el sensor RTD mediante una corriente controlada.
- Medir la variación de resistencia con alta resolución.
- Realizar la conversión analógica-digital.
- Entregar el valor de temperatura en formato digital.

Entre sus principales características se destacan:

- Alta resolución en la medición de temperatura.
- Compensación de errores asociados al cableado (configuración de 2, 3 o 4 hilos).

- Interfaz digital SPI.
- Alta inmunidad al ruido eléctrico.

La comunicación con el ESP32 se realiza mediante el protocolo SPI, el cual fue seleccionado por su alta velocidad de transferencia y sincronización precisa mediante señal de reloj. La asignación de pines se realizó utilizando el bus SPI hardware del ESP32 (GPIO18, GPIO19 y GPIO23), garantizando un desempeño óptimo en la adquisición de datos.

El pin CS (GPIO27) permite seleccionar el módulo MAX31865 dentro del bus SPI, asegurando que la comunicación se realice únicamente con este dispositivo cuando sea requerido.

La implementación de este módulo permite obtener mediciones de temperatura con mayor exactitud en comparación con sensores digitales convencionales, lo cual es fundamental para el análisis térmico del proceso de secado.

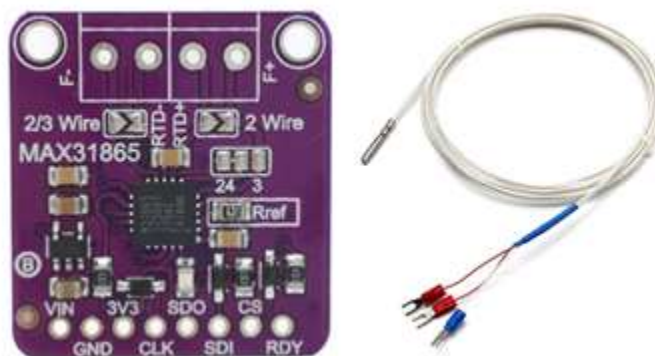


Figura 18. Módulo MAX31861 – Sonda PT100

4.5.1.3 SHT31

Los sensores SHT31 fueron seleccionados para la medición de temperatura y humedad relativa debido a su alta precisión, estabilidad a largo plazo y facilidad de integración en sistemas digitales. Estos sensores están diseñados para aplicaciones ambientales y ofrecen una solución compacta con salida digital calibrada de fábrica.

Entre sus principales características técnicas se encuentran:

- Medición de humedad relativa en el rango de 0% a 100%.
- Precisión típica de $\pm 2\%$ RH.

- Medición de temperatura con precisión aproximada de ± 0.3 °C.
- Salida digital mediante protocolo I2C.
- Bajo consumo energético.

El uso de dos sensores SHT31 permite realizar un análisis comparativo entre las condiciones del aire de proceso y las condiciones ambientales externas. Esta decisión de diseño responde a la necesidad de evaluar el desempeño del colector solar y su impacto en las variables térmicas del sistema.

El primer sensor fue ubicado a la salida del colector solar, donde se requiere conocer el estado del aire calentado. El segundo sensor se instaló para medir las condiciones ambientales, sirviendo como referencia para el análisis del sistema.

Dado que ambos sensores poseen la misma dirección I2C por defecto, se optó por implementar dos buses I2C independientes utilizando la flexibilidad del ESP32. Esta solución evita conflictos de direccionamiento sin necesidad de hardware adicional.

La asignación de pines se realizó considerando disponibilidad y funcionalidad:

- Bus I2C principal: GPIO13 (SDA) y GPIO21 (SCL).
- Bus I2C secundario: GPIO25 (SDA) y GPIO26 (SCL).

Esta configuración permite una adquisición simultánea y confiable de datos, mejorando la robustez del sistema de monitoreo.



Figura 19. Módulo SHT31

4.5.1.4 Pantalla TFT

Para la visualización de las variables del sistema se implementó una pantalla TFT ST7735, la cual permite mostrar en tiempo real la información obtenida por los sensores y el estado de funcionamiento del sistema. Esta interfaz gráfica facilita la supervisión directa del

proceso de secado, presentando datos como temperatura, humedad relativa, señal PWM aplicada al ventilador y velocidad de rotación medida en RPM.

Entre sus principales características técnicas se destacan:

- Resolución de 128×160 píxeles, suficiente para la representación clara de variables y estados del sistema.
- Interfaz de comunicación SPI, que reduce el número de pines necesarios en comparación con interfaces paralelas.
- Bajo consumo energético, ideal para sistemas alimentados por baterías.
- Controlador gráfico integrado (ST7735), que permite la gestión interna de memoria de video y simplifica el procesamiento en el microcontrolador.
- Compatibilidad con niveles lógicos de 3.3 V, lo cual evita la necesidad de convertidores de nivel al trabajar con el ESP32.

La comunicación entre la pantalla y el ESP32 se realiza mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), el cual fue seleccionado debido a su alta velocidad de transmisión, sincronización mediante señal de reloj y capacidad para manejar dispositivos gráficos de manera eficiente. Esta característica es fundamental para garantizar una actualización fluida de la interfaz sin afectar el rendimiento del sistema principal.

A través de esta interfaz, el microcontrolador envía los datos procesados hacia la pantalla, donde son representados mediante diferentes elementos gráficos como textos, barras de estado, indicadores y valores numéricos. El uso de una interfaz visual local permite reducir la dependencia de sistemas externos de monitoreo, mejorando la autonomía del prototipo.

La asignación de pines se realizó considerando criterios de compatibilidad con el bus SPI del ESP32 y la optimización del uso de recursos del microcontrolador:

- GPIO 5 (CS - Chip Select): permite habilitar la comunicación con la pantalla dentro del bus SPI.
- GPIO 17 (DC - Data/Command): define si la información enviada corresponde a datos o comandos, optimizando la interpretación por parte del controlador gráfico.
- GPIO 16 (RST - Reset): permite reiniciar el controlador de la pantalla, asegurando un correcto arranque del sistema.
- GPIO 22 (Backlight): utilizado para el control de la retroiluminación, permitiendo gestionar el consumo energético y la visibilidad de la pantalla.

Cabe destacar que la selección de estos pines se realizó evitando interferencias con otros periféricos del sistema, como el bus SPI utilizado por el módulo MAX31865 y los buses I2C de los sensores, garantizando una correcta coexistencia de múltiples interfaces de comunicación.

Además, el uso de una pantalla TFT frente a otras alternativas como displays LCD de caracteres o pantallas OLED más pequeñas, se justifica por su mayor capacidad de representación gráfica, lo cual permite una visualización más intuitiva y completa del proceso de secado. Esto resulta especialmente importante en aplicaciones experimentales, donde la interpretación rápida de múltiples variables en tiempo real es fundamental.



Figura 20. Pantalla TFT

4.5.1.5 Ventilador

El sistema incorpora un ventilador encargado de generar el flujo de aire que circula a través del colector solar y del sistema de secado. Este flujo es fundamental para favorecer la transferencia de calor y masa, permitiendo transportar el aire caliente hacia el tambor y facilitar la evaporación de la humedad presente en el café.

El ventilador es controlado por el ESP32 mediante una señal PWM (modulación por ancho de pulso), lo que permite regular su velocidad de funcionamiento y, por lo tanto, la cantidad de aire que circula dentro del sistema. Esta señal se genera desde el GPIO 14 del microcontrolador, permitiendo ajustar dinámicamente la ventilación según las condiciones de temperatura registradas durante el proceso.

Adicionalmente, el ventilador cuenta con una salida de retroalimentación de velocidad (RPM) que permite medir su velocidad real de rotación. Esta señal es leída por el GPIO 34 del

ESP32, permitiendo calcular las revoluciones por minuto del ventilador y verificar su correcto funcionamiento.

Gracias a esta configuración, el sistema puede controlar y monitorear el flujo de aire de forma automática, contribuyendo a mantener condiciones térmicas adecuadas dentro del proceso de secado.



Figura 21. Ventilador PWM 4 pines

4.5.2 Calibración de los sensores

Antes de iniciar la construcción de la placa electrónica, se llevó a cabo una etapa de validación instrumental de los sensores utilizados en el sistema de monitoreo. Este procedimiento tuvo como objetivo verificar la precisión y confiabilidad de las mediciones de temperatura y humedad, garantizando la calidad de los datos que fueron utilizados durante el proceso de secado.

El sistema de adquisición de datos emplea sensores SHT31 para la medición de temperatura y humedad relativa del aire, así como un sensor PT100 conectado a un microcontrolador MAX31865 para la medición de la temperatura dentro del tambor rotatorio. La calibración de estos dispositivos permitió asegurar un adecuado desempeño del sistema de monitoreo antes de su integración en la placa electrónica.

4.5.2.1 Calibración del sensor PT100

La temperatura dentro del tambor rotatorio fue medida mediante un sensor de resistencia tipo PT100, el cual es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a su alta precisión, estabilidad y buena repetibilidad en mediciones de temperatura. Este tipo de sensor basa su funcionamiento en la variación de la resistencia eléctrica del platino en función de la temperatura, lo que permite obtener mediciones confiables en sistemas de monitoreo térmico.

En el sistema desarrollado, el sensor PT100 fue conectado a un módulo MAX31865, el cual permite acondicionar la señal del sensor y realizar la lectura digital de la temperatura mediante el microcontrolador ESP32.

Previo a la realización de las pruebas experimentales del secado, se llevó a cabo una verificación del funcionamiento del sensor, con el objetivo de comprobar la correcta respuesta del dispositivo ante variaciones de temperatura dentro del sistema. Para ello, se realizaron mediciones en diferentes condiciones térmicas, observando que las lecturas registradas por el sensor variaban de manera consistente con los cambios de temperatura del aire en el interior del tambor rotatorio.

Adicionalmente, las mediciones obtenidas fueron comparadas con las lecturas de un instrumento de referencia, permitiendo verificar que las diferencias observadas se encontraban dentro del rango de precisión especificado para este tipo de sensores.

El sensor PT100 presenta una precisión aproximada de $\pm 0.5^{\circ}C$

lo cual resulta adecuado para el análisis térmico del sistema de secado, ya que permite registrar con suficiente exactitud las variaciones de temperatura que ocurren dentro del tambor durante el proceso de secado del café.

De esta manera, la verificación realizada permitió confirmar que el sensor PT100 proporciona mediciones confiables para el monitoreo de la temperatura en el interior del tambor rotatorio.

4.5.2.2 Calibración de los sensores SHT31

Las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire dentro del sistema de secado fueron medidas mediante sensores SHT31, los cuales integran en un solo dispositivo un sensor digital de temperatura y humedad relativa. Estos sensores se caracterizan por su alta precisión, bajo consumo de energía y buena estabilidad en aplicaciones de monitoreo ambiental.

En el sistema desarrollado, los sensores SHT31 se conectaron al microcontrolador **ESP32** mediante comunicación I²C, permitiendo registrar de forma continua las condiciones térmicas y de humedad del aire durante el proceso de secado.

Previo a la realización de las pruebas experimentales, se llevó a cabo una verificación del funcionamiento de los sensores, con el fin de evaluar la confiabilidad de las mediciones registradas por el sistema. Para ello, se compararon las lecturas obtenidas por los sensores SHT31 con las mediciones de un termohigrómetro de referencia, registrando simultáneamente los valores de temperatura y humedad relativa del aire.

Durante las pruebas de verificación se observó que las mediciones de los sensores respondían de forma estable y coherente ante las variaciones de las condiciones ambientales. Las diferencias observadas entre las lecturas del sensor y el instrumento de referencia se encontraron dentro de los rangos de precisión especificados por el fabricante.

El sensor SHT31 presenta una precisión aproximada en cuanto a Temperatura una precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ y una precisión para la humedad relativa de $\pm 2\%$

Estos niveles de precisión resultan adecuados para el monitoreo de las condiciones del aire en sistemas de secado solar, ya que permiten evaluar de manera confiable las variaciones de temperatura y humedad relativa que influyen directamente en el proceso de evaporación de la humedad del café.

De esta manera, la verificación realizada permitió confirmar que los sensores SHT31 proporcionan mediciones confiables para el monitoreo de las condiciones ambientales durante las pruebas experimentales del sistema de secado.

4.5.2.3 Cálculo de errores en la ca

4.5.2.4 libración

Temperatura de referencia (°C)	PT100 (°C)	SHT31 (°C)	Error PT100 (°C)	Error SHT31 (°C)
25	25.3	25.1	0.3	0.1
30	30.4	30.2	0.4	0.2
35	35.4	35.2	0.4	0.2
40	40.2	40.3	0.2	0.3

450	45.3	45.2	0.3	0.2
-----	------	------	-----	-----

Tabla 4. Comparación entre temperatura de referencia y mediciones de los sensores PT100 y SHT31

El error de medición se calculó mediante:

$$Error = T_{sensor} - T_{referencia}$$

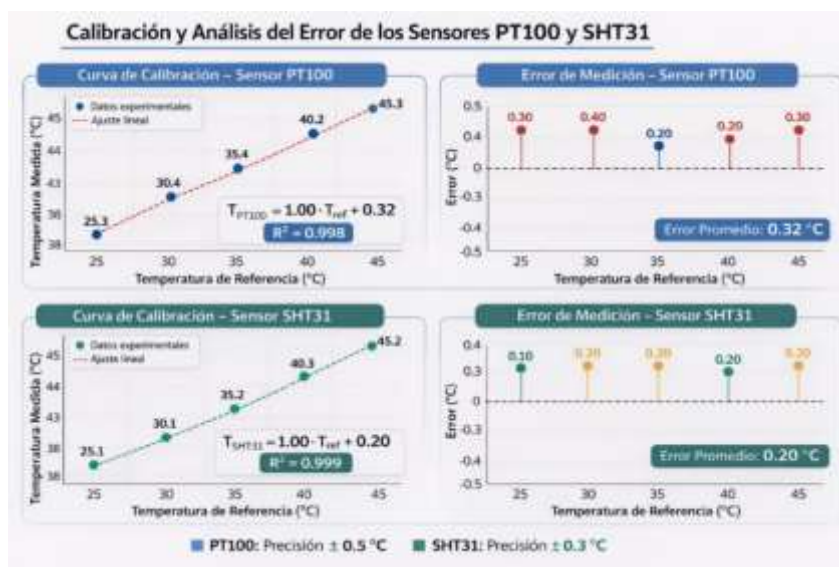


Figura 22. Curvas de calibración y análisis del error de los sensores PT100 y SHT31 utilizados en el sistema experimental de secado

La Figura 53, presenta las curvas de calibración y el análisis del error para los sensores PT100 y SHT31 utilizados en el sistema experimental. En ambos casos se observa una relación lineal entre la temperatura de referencia y la temperatura medida por los sensores, lo que evidencia un comportamiento adecuado del sistema de medición.

El análisis del error muestra que las desviaciones se mantienen dentro de un rango aproximado de ± 0.4 °C para el sensor PT100 y ± 0.3 °C para el sensor SHT31. Estos valores se encuentran dentro de la precisión especificada por los fabricantes, lo que confirma que los sensores son adecuados para el monitoreo de las condiciones térmicas durante el proceso de secado del café.

4.5.3 Placa de control

El sistema de control constituye el núcleo del prototipo de secado de café, ya que es el encargado de la adquisición, procesamiento y gestión de las variables del proceso, así como del control de los actuadores involucrados. Este sistema permite integrar los diferentes sensores, módulos de medición y dispositivos de salida, garantizando una operación coordinada y confiable.

El sistema está basado en el microcontrolador ESP32, el cual centraliza la lectura de variables como temperatura y humedad, procesa la información en tiempo real y ejecuta las acciones de control correspondientes, como la regulación de la velocidad del ventilador mediante señal PWM.

Adicionalmente, el sistema de control permite la comunicación con dispositivos externos mediante conectividad WiFi, facilitando el monitoreo remoto y el registro de datos para su posterior análisis. De esta manera, se logra una integración completa entre medición, control y supervisión del proceso de secado.

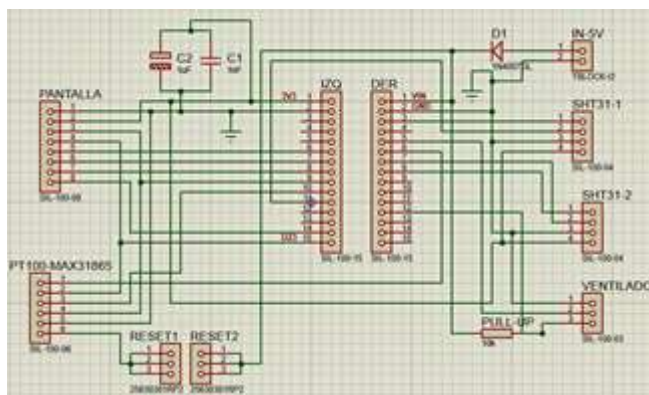


Figura 23. Esquemático circuito electrónico

4.5.3.1 Diseño y construcción placa de control

Una vez definidos los pines de conexión del microcontrolador ESP32 para cada uno de los dispositivos del sistema, se procedió al diseño y construcción de la placa electrónica encargada de integrar todos los componentes del sistema de monitoreo y control.

En primer lugar, se estableció el esquema de conexiones considerando los pines previamente asignados para las interfaces de comunicación SPI e I2C, así como los pines

utilizados para el control del ventilador mediante señal PWM y la lectura de la señal de retroalimentación de velocidad (RPM). Este esquema permitió organizar de manera adecuada las conexiones entre el ESP32 y los diferentes módulos electrónicos, garantizando una comunicación confiable entre los dispositivos.

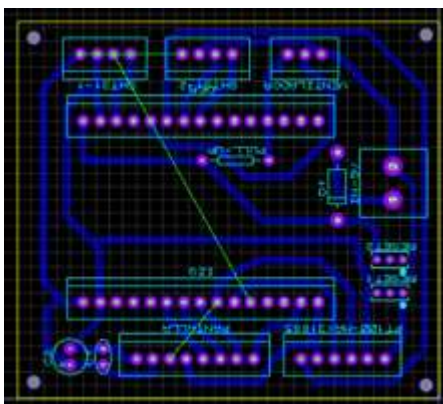


Figura 24. Diseño PCB placa de control

Con el objetivo de mejorar la estabilidad eléctrica del sistema, se incorporaron dos capacitores conectados en paralelo entre las líneas de alimentación de 3.3 V (3V3) y GND del ESP32. El primero corresponde a un capacitor cerámico de 100 nF, el cual actúa como des acoplador de alta frecuencia, ayudando a filtrar ruido eléctrico presente en la línea de alimentación. El segundo es un capacitor electrolítico de 1000 μ F, cuya función es estabilizar la tensión de alimentación ante posibles variaciones de carga dentro del sistema.

Adicionalmente, se incluyó un diodo en la entrada de alimentación de la placa, el cual cumple una función de protección frente a posibles conexiones de polaridad inversa, evitando daños en los componentes electrónicos del sistema.

Para facilitar la operación y mantenimiento del módulo de medición de temperatura, también se incorporó un pulsador de dos estados conectado al sistema, cuya función es permitir el reinicio manual del módulo MAX31865 en caso de ser necesario durante las pruebas o la operación del sistema.

Una vez definido el circuito electrónico, se realizó la simulación y el diseño del esquema en el software Proteus, donde se verificaron las conexiones entre los distintos componentes y se generó posteriormente el diseño del circuito impreso (PCB).

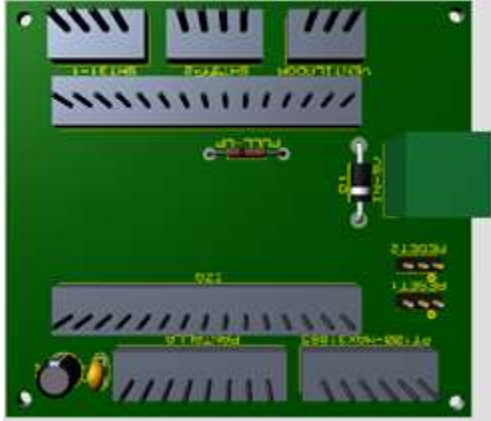


Figura 25. Visualización 3d placa control en Proteus

Finalmente, la placa fue fabricada utilizando el método de transferencia térmica o planchado, el cual consiste en transferir el diseño del PCB previamente impreso sobre papel especial hacia una placa de baquelita cobreada mediante calor. Posteriormente, se realizó el proceso de ataque químico para eliminar el cobre sobrante y dejar únicamente las pistas del circuito. Una vez obtenida la placa, se procedió a perforar los puntos de montaje y a soldar los diferentes componentes electrónicos, obteniendo así la placa de control final utilizada en el sistema de monitoreo y control del secador de café.

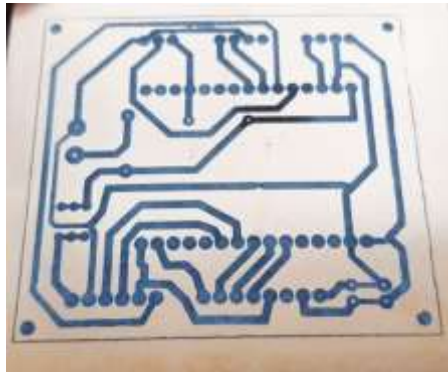


Figura 26. Diseño PCB de placa de control en baquelita

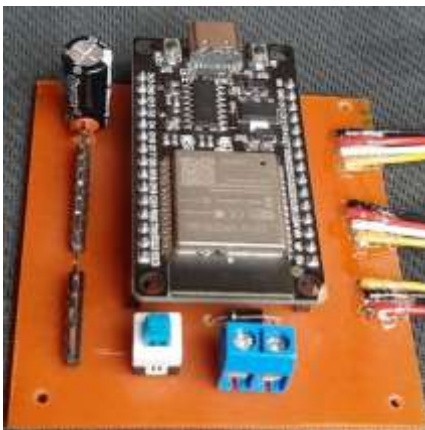


Figura 27. Montaje de componentes en baquelita

4.5.4 Placa de Potencia

El sistema de potencia constituye una parte fundamental dentro del prototipo de secado de café, ya que es el encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de todos los dispositivos electrónicos y actuadores del sistema. Un diseño adecuado de esta etapa garantiza una alimentación estable, segura y eficiente, lo cual es esencial para el correcto desempeño del sistema de monitoreo y control.

En este contexto, se implementó una placa de potencia cuya función principal es acondicionar y distribuir la energía proveniente de las baterías hacia los diferentes elementos del sistema. La correcta regulación del voltaje es especialmente importante en dispositivos electrónicos sensibles como el ESP32, el cual requiere niveles de tensión estables para evitar fallos en la adquisición de datos, reinicios inesperados o comportamientos erráticos.

Para cumplir con este propósito, se utilizó un módulo convertidor DC-DC basado en el LM2596, el cual es un regulador de voltaje tipo *buck* (reductor). Este dispositivo permite convertir un voltaje de entrada mayor a uno menor de forma eficiente, utilizando técnicas de conmutación en lugar de disipación de energía como calor, lo que lo hace considerablemente más eficiente que los reguladores lineales.

El módulo LM2596 presenta características adecuadas para este tipo de aplicación, entre las que se destacan:

- Capacidad de entrada de voltaje típicamente entre 4 V y 40 V.
- Voltaje de salida ajustable, lo que permite calibrarlo según los requerimientos del sistema.

- Corriente de salida de hasta 2 A o 3 A (dependiendo del módulo), suficiente para alimentar el ESP32 y otros dispositivos de bajo consumo.
- Alta eficiencia (superior al 70–80%), lo que reduce pérdidas energéticas y calentamiento.
- Regulación estable ante variaciones en la carga o en el voltaje de entrada.

En el sistema desarrollado, el módulo LM2596 fue configurado para convertir los 12 V provenientes de la batería a un voltaje de aproximadamente 5.2 V, valor adecuado para alimentar el ESP32 a través de su pin de entrada de voltaje (VIN o 5V), asegurando un funcionamiento estable del microcontrolador y de los periféricos asociados.

De esta manera, la implementación del módulo DC-DC no solo mejora la eficiencia energética del sistema, sino que también protege los componentes electrónicos al proporcionar una alimentación regulada y confiable, lo cual es esencial para el correcto funcionamiento del prototipo durante el proceso de secado.

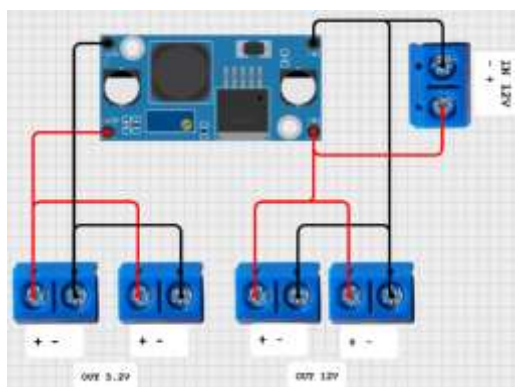


Figura 28. Diagrama circuito de potencia

4.5.4.1 Diseño y construcción placa de potencia

Una vez definida la necesidad de acondicionar la energía proveniente de la batería, se procedió al diseño y construcción de la placa de potencia, encargada de distribuir los niveles de voltaje requeridos por el sistema.

El diseño se basó en la integración de un módulo convertidor DC-DC LM2596, el cual se encargó de reducir el voltaje de entrada de 12 V a 5.2 V para la alimentación del sistema de control.



Figura 29. Modulo lm2596

Para facilitar la conexión y distribución de la energía, se emplearon un total de cinco borneras, organizadas de la siguiente manera:

Una bornera de entrada, utilizada para recibir los 12 V provenientes de la batería, los cuales alimentan directamente el módulo LM2596.

Dos borneras de salida regulada, destinadas a distribuir los 5.2 V generados por el módulo, utilizados principalmente para la alimentación del ESP32 y otros componentes electrónicos de bajo voltaje.

Dos borneras adicionales de 12 V, conectadas en paralelo con la entrada, que permiten derivar directamente este voltaje para alimentar el ventilador, el cual opera a mayor potencia y no requiere regulación a 5 V.

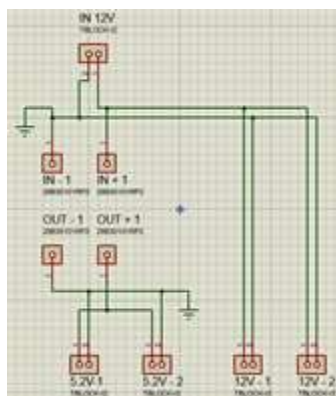


Figura 30. Esquemático circuito de potencia

Esta configuración permitió separar claramente las líneas de potencia y control, evitando interferencias y facilitando la organización del sistema eléctrico.

Posteriormente, se realizó el diseño esquemático en el software Proteus, donde se definieron las conexiones eléctricas entre el módulo LM2596, las borneras y las líneas de alimentación. A partir de este esquema, se generó el diseño del circuito impreso (PCB), optimizando la disposición de los componentes y las pistas para garantizar una correcta distribución de corriente y minimizar posibles pérdidas o interferencias.

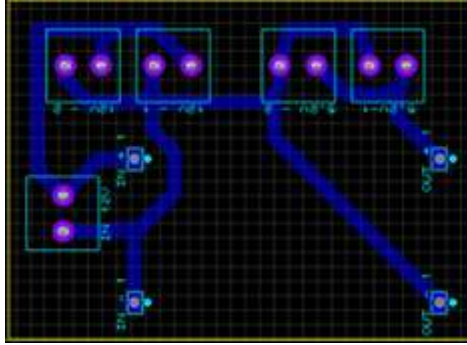


Figura 31. Vista PCB circuito de potencia Proteus

La fabricación de la placa se llevó a cabo mediante el método de planchado, en el cual el diseño del PCB es transferido térmicamente sobre una placa de baquelita recubierta de cobre. Posteriormente, se realizó el proceso de ataque químico para eliminar el material sobrante, dejando únicamente las pistas conductoras del circuito.



Figura 32. Circuito de potencia en baquelita

Finalmente, se procedió al perforado de la placa y soldadura de los componentes, incluyendo el módulo LM2596 y las borneras de conexión. Como resultado, se obtuvo una placa de potencia funcional, capaz de suministrar de manera estable y eficiente los diferentes niveles de voltaje requeridos por el sistema de secado de café.



Figura 33. Montaje lm2596 en placa de potencia

4.5.5 Diseño y construcción de carcasa

Una vez fabricadas las placas de control y de potencia, se procedió al diseño y construcción de una carcasa destinada a proteger e integrar ambos circuitos dentro de una estructura física adecuada. Este elemento cumple una función importante desde el punto de vista de ingeniería, ya que permite resguardar los componentes electrónicos frente a factores externos como polvo, humedad, contacto accidental además de facilitar la organización del cableado del sistema.

El diseño de la carcasa se realizó utilizando la plataforma Tinkercad, herramienta de modelado 3D que permitió definir de manera precisa las dimensiones y la distribución interna necesarias para alojar las placas electrónicas. Durante esta etapa, se consideraron aspectos como el espacio requerido para cada módulo, la accesibilidad a las conexiones y la correcta disipación térmica de los componentes.

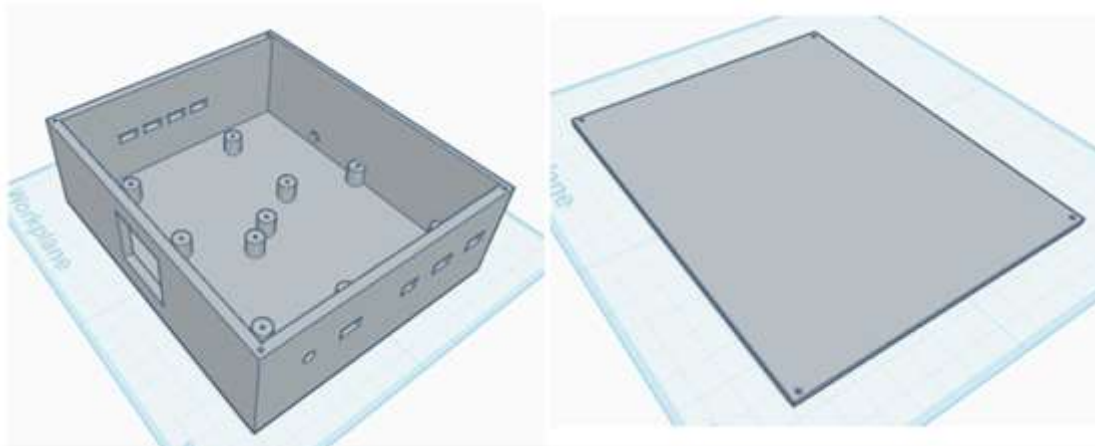


Figura 34. Diseño caja para placas de potencia y control en Tinkercad

Como resultado del proceso de diseño, se generó un archivo en formato STL el cual fue utilizado posteriormente para la fabricación de la carcasa mediante impresión 3D. Esta técnica permitió obtener una estructura personalizada, adaptada específicamente a las necesidades del sistema.

Dentro del diseño de la carcasa se incorporaron diversos orificios estratégicamente ubicados, los cuales permiten la conexión de los diferentes elementos del sistema sin necesidad de desmontar la estructura. Entre estos se incluyen:

- Orificios para la salida de conectores tipo Molex, utilizados para la conexión de los sensores SHT31, control PWM y retroalimentación RPM del ventilador, salidas para la alimentación eléctrica del ventilador (línea de 12 V).
- Un orificio adicional para el paso del cable correspondiente a la sonda del sensor PT100, permitiendo su conexión con el módulo MAX31865 ubicado en el interior.
- Abertura para la visualización de la pantalla TFT.
- Dos orificios traseros uno para la entrada de voltaje y otro para la conexión tipo C para el ESP32 para el cargue de la programación.

El diseño de estos accesos se realizó considerando criterios de orden, facilidad de mantenimiento y reducción de interferencias entre cables, contribuyendo a una mejor gestión del sistema eléctrico.

Finalmente, una vez impresa la carcasa, se procedió al montaje de las placas en su interior, asegurando una correcta fijación y disposición de los componentes. De esta manera, se

obtuvo una solución compacta, funcional y segura, que integra adecuadamente el sistema electrónico del prototipo de secado de café.



Figura 35. Montaje placas de potencia y control en caja en impresión 3d



Figura 36. Módulos y placas en caja impresión 3d

4.5.6 Programación ESP32

El sistema de secado de café incorpora un software embebido desarrollado en lenguaje C/C++ para el microcontrolador ESP32, el cual se presenta de forma completa en el Anexo A. Este programa permite integrar las funciones de adquisición de datos, control del sistema, visualización local y transmisión inalámbrica, constituyendo el núcleo lógico del prototipo.

En primer lugar, el código realiza la lectura de las variables principales del proceso mediante sensores SHT31, para temperatura y humedad relativa, y un sensor PT100 a través del módulo MAX31865, para medición de temperatura con mayor precisión. Estas lecturas se ejecutan de manera periódica y son procesadas por el microcontrolador para su uso en el control y monitoreo del sistema.

El control del flujo de aire se implementa mediante una señal PWM aplicada al ventilador, regulada a partir de la temperatura medida. Para ello, se utiliza un algoritmo de control tipo PID, el cual ajusta la velocidad del ventilador en función de una temperatura de referencia, permitiendo mantener condiciones térmicas más estables dentro del proceso de secado.

Adicionalmente, el sistema incluye una interfaz gráfica en una pantalla TFT, donde se visualizan en tiempo real las variables más importantes como temperatura, humedad, señal PWM y velocidad del ventilador (RPM), facilitando la supervisión directa del sistema.

Finalmente, el ESP32 establece una conexión WiFi y funciona como un servidor web, permitiendo enviar los datos en formato JSON hacia un sistema externo. Esta información es utilizada por un programa desarrollado en Python, el cual se encarga de almacenar, procesar y analizar los datos experimentales, permitiendo la generación de gráficas y la validación del comportamiento del sistema.

De esta manera, el software desarrollado permite la integración completa del sistema de monitoreo y control, combinando procesamiento en tiempo real con herramientas externas de análisis de datos.



Figura 37. Visualización de los datos en pantalla tft código esp32

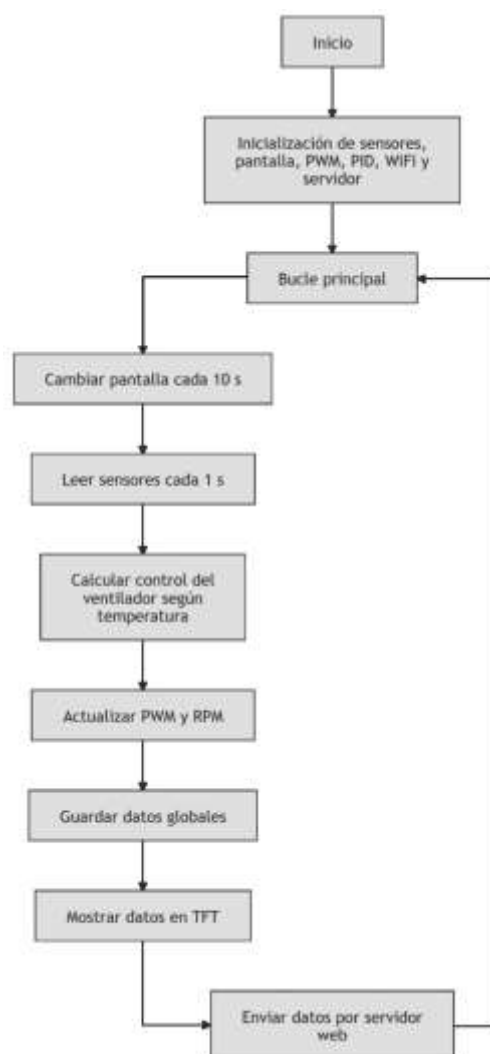


Figura 38. Diagrama de flujo programación esp32

4.5.7 Plataforma de visualización y registro de datos en Python

De manera complementaria al programa cargado en el ESP32, se desarrolló una aplicación en Python para el monitoreo, visualización y almacenamiento de los datos generados durante el proceso de secado. El código completo de esta aplicación se presenta en el Anexo B. Su función principal es establecer la comunicación con el microcontrolador a través de la red WiFi, recibir las variables medidas y presentarlas en una interfaz gráfica para facilitar el seguimiento experimental del sistema.

El programa consulta periódicamente los datos enviados por el ESP32 mediante solicitudes HTTP y recibe la información en formato JSON. A partir de estos datos, la aplicación muestra en tiempo real variables como la temperatura medida por el PT100, la señal PWM aplicada al ventilador, las RPM del sistema, así como la temperatura y humedad relativa registradas por los sensores SHT31 ubicados en la salida del colector y en el ambiente. Esta información se organiza dentro de una interfaz desarrollada con Tkinter, permitiendo una visualización clara y ordenada de las condiciones de operación del prototipo.

Adicionalmente, el software incorpora un cronómetro de secado y un campo para el ingreso manual del porcentaje de humedad del café medido con el equipo DH-200X, lo cual permite complementar los datos capturados automáticamente por el sistema electrónico. También se implementa una gráfica en tiempo real de la temperatura medida por el PT100, junto con la temperatura de referencia establecida, facilitando la supervisión del comportamiento térmico del proceso.

Finalmente, todos los datos adquiridos durante la ejecución del programa son almacenados en una estructura de registro y, al cerrar la aplicación, se exportan automáticamente a un archivo de Excel. De esta manera, el código en Python complementa el software embebido del ESP32, ya que permite no solo la supervisión visual del proceso, sino también el almacenamiento organizado de la información experimental para su posterior análisis, graficación y validación del sistema de secado.



Figura 39. Visualización de los datos en plataforma Python

hora	temp_pt100	pwm	rpm	t1	h1	t2	h2	humedad_cafe	tiempo_hms	tiempo_secado
2026-03-10 11:12:34	36,31	255	561700	38,96	25,8	27,79	40,94	22 00:32:28	00:32:17	
2026-03-10 11:12:35	36,27	255	555210	38,91	25,87	27,64	41,24	22 00:32:29	00:32:18	
2026-03-10 11:12:36	36,21	255	562770	38,85	25,86	27,38	41,6	22 00:32:30	00:32:19	
2026-03-10 11:12:38	36,07	255	563140	38,75	26,08	27,05	42,27	22 00:32:32	00:32:20	
2026-03-10 11:12:39	36,07	255	566790	38,78	26,14	26,88	42,66	22 00:32:33	00:32:22	
2026-03-10 11:12:40	35,93	255	560580	38,72	26,15	26,73	43,04	22 00:32:34	00:32:23	
2026-03-10 11:12:42	35,93	255	572550	38,74	26,26	26,72	43,41	22 00:32:36	00:32:24	
2026-03-10 11:12:43	35,9	255	572550	38,79	26,26	26,72	43,79	22 00:32:37	00:32:25	
2026-03-10 11:12:44	35,73	255	563760	38,82	26,26	26,59	44,27	22 00:32:38	00:32:26	

Figura 40. Datos recolectados a través de la plataforma Python

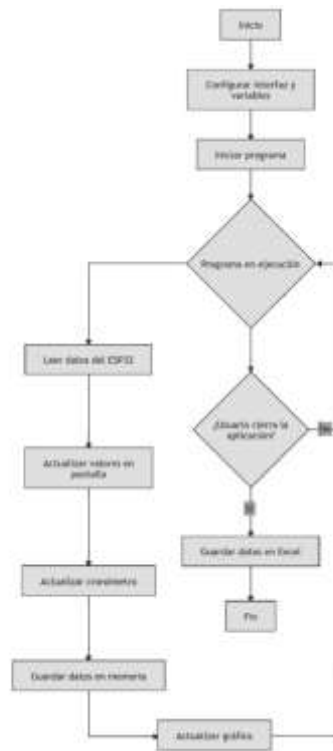


Figura 41. Diagrama de flujo de interfaz en Python

4.5.8 Plataforma de visualización y registro de datos en Python

Como complemento al sistema electrónico implementado en el prototipo, se desarrolló una plataforma de visualización y registro de datos en Python, orientada al monitoreo en tiempo real de las variables del proceso de secado y al almacenamiento de la información obtenida durante las pruebas experimentales.

Esta plataforma se comunica con el ESP32 a través de la red local mediante el protocolo HTTP, realizando consultas periódicas a la dirección IP del dispositivo para obtener los datos generados por los sensores del sistema. La información recibida incluye variables como temperatura medida por el sensor PT100, señal PWM aplicada al ventilador, velocidad de rotación en RPM, así como los valores de temperatura y humedad relativa obtenidos por los sensores SHT31.

La interfaz gráfica fue desarrollada utilizando la biblioteca Tkinter, permitiendo organizar la información en diferentes secciones para facilitar la interpretación de los datos. Dentro de la interfaz se presentan de forma clara las variables correspondientes al sistema de ventilación, la temperatura del tambor, las condiciones del aire a la salida del colector solar y las condiciones ambientales externas.

Adicionalmente, la plataforma incorpora una gráfica en tiempo real generada mediante la biblioteca Matplotlib, en la cual se representa la evolución de la temperatura medida por el sensor PT100 a lo largo del tiempo. Esta gráfica incluye una línea de referencia asociada al valor de consigna del sistema, permitiendo analizar el comportamiento térmico durante el proceso de secado.

La aplicación también permite registrar manualmente el porcentaje de humedad del café medido mediante un medidor externo, así como llevar un control del tiempo de secado mediante un cronómetro integrado en la interfaz. Estas funciones complementan la información obtenida por los sensores y facilitan el seguimiento de las pruebas experimentales.

Finalmente, todos los datos adquiridos durante la operación del sistema son almacenados automáticamente en un archivo de Excel, lo que permite realizar posteriormente el análisis de los resultados obtenidos durante el proceso de secado.

En conjunto, la plataforma de visualización y registro de datos en Python actúa como una herramienta de supervisión externa que complementa el sistema electrónico del prototipo,

permitiendo el monitoreo, almacenamiento y análisis de la información generada durante las pruebas experimentales.

4.6 Pruebas individuales de los subsistemas

Antes de realizar las pruebas de secado del café, fue necesario verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los subsistemas que componen el prototipo desarrollado. Estas pruebas permitieron asegurar que todos los elementos del sistema operaran adecuadamente antes de iniciar los experimentos de secado.

Las pruebas realizadas se dividieron en las siguientes etapas:

- pruebas del colector solar
- pruebas del sistema electrónico y sensores
- pruebas del tambor rotatorio
- pruebas del sistema de alimentación mediante paneles solares
- prueba inicial del sistema completo con café

Cada una de estas etapas se describe a continuación.

4.6.1 Prueba del colector solar

El colector solar fue evaluado en condiciones reales de operación, ubicándolo en un espacio abierto con exposición directa a la radiación solar. Durante la prueba se integraron los sistemas electrónicos y de alimentación, lo que permitió la adquisición de datos en tiempo real. El montaje experimental estuvo conformado por el colector solar, el sistema de medición basado en el microcontrolador ESP32, la fuente de alimentación y dos sensores SHT31 instalados en la entrada y salida del colector para el monitoreo de la temperatura y la humedad relativa del aire.

Adicionalmente, se realizaron pruebas preliminares en las cuales se registraron la temperatura y la humedad relativa del aire tanto a la entrada como a la salida del colector en intervalos de tiempo definidos, con el fin de evaluar el comportamiento térmico del sistema bajo

condiciones reales de operación. Durante estas pruebas, el colector operó con un flujo de aire constante, garantizado mediante el uso de un ventilador funcionando a su máxima potencia, lo cual permitió mantener condiciones estables de circulación de aire a lo largo del ensayo.

Los valores de irradiancia utilizados en el análisis fueron obtenidos a partir de la estación meteorológica de la Universidad CESMAG, la cual registra datos de forma automática cada cinco minutos. Para cada jornada experimental, se seleccionaron los datos correspondientes al intervalo de tiempo en el cual se realizaron las pruebas, permitiendo obtener valores representativos de irradiancia bajo condiciones reales de operación.

Es importante señalar que los valores de irradiancia registrados pueden presentar variaciones debido a condiciones climáticas propias de la región, como la nubosidad y cambios en la radiación solar incidente. Esto explica la presencia de valores de irradiancia inferiores a los típicamente reportados en condiciones ideales, y permite contextualizar los resultados obtenidos dentro de un entorno experimental real.

Las mediciones del sistema se realizaron durante un intervalo aproximado de 30 minutos, por lo que los valores registrados representan el comportamiento del colector en ese periodo específico y no implican que dichas condiciones se mantengan constantes bajo cualquier escenario de operación.

Durante la prueba, se observó que la temperatura del aire a la entrada del colector varió entre 25 °C y 28 °C, mientras que la temperatura de salida alcanzó valores de hasta 59 °C. Asimismo, la humedad relativa del aire presentó una disminución significativa, pasando de aproximadamente 60 % a la entrada del colector a valores cercanos al 18 % a la salida.

Estos resultados evidencian un adecuado desempeño del colector solar en el calentamiento del aire y en la reducción de su humedad relativa, generando condiciones favorables para el proceso de secado del café. Además esto permite contextualizar los resultados dentro de condiciones reales de irradiancia propias de la región.



Figura 42. Montaje experimental del colector solar durante las pruebas de funcionamiento



Figura 43. Visualización de variables térmicas y de humedad durante la prueba

Tiempo (min)	Temp. Entrada (°C)	Temp. Salida (°C)	Humedad entrada (%)	Humedad salida (%)
10	26.0	40.0	60	21
20	27.0	52.0	56	17
30	28.0	59.0	50	13

Tabla 5. Resultados experimentales del colector solar

Los datos obtenidos durante las pruebas se presentan en la Tabla 5, donde se muestran los valores registrados de temperatura de entrada, temperatura de salida y humedad relativa del aire en función del tiempo. Estos resultados permiten analizar la evolución térmica del aire al atravesar el colector, así como evaluar la capacidad del sistema para incrementar la temperatura del flujo de aire de entrada.

Asimismo, para una mejor interpretación de los resultados, se elaboraron las Figuras 46 y 47, en las cuales se representa la variación de la temperatura y la humedad relativa del aire en función del tiempo. Estas gráficas facilitan la visualización del incremento térmico del aire y la disminución de la humedad relativa entre la entrada y la salida del colector, evidenciando el desempeño del sistema en el acondicionamiento del aire para el proceso de secado.

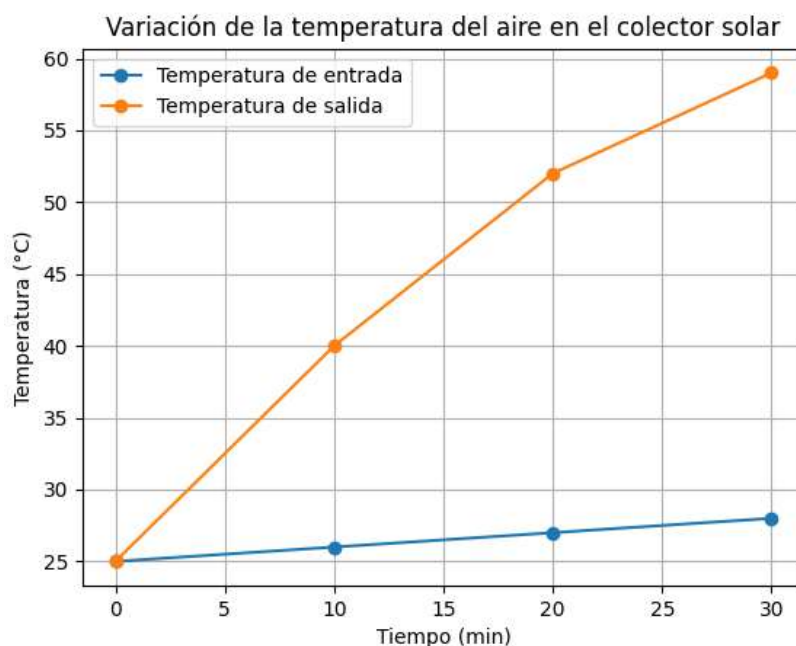


Figura 44. Variación de la temperatura del aire en el colector solar

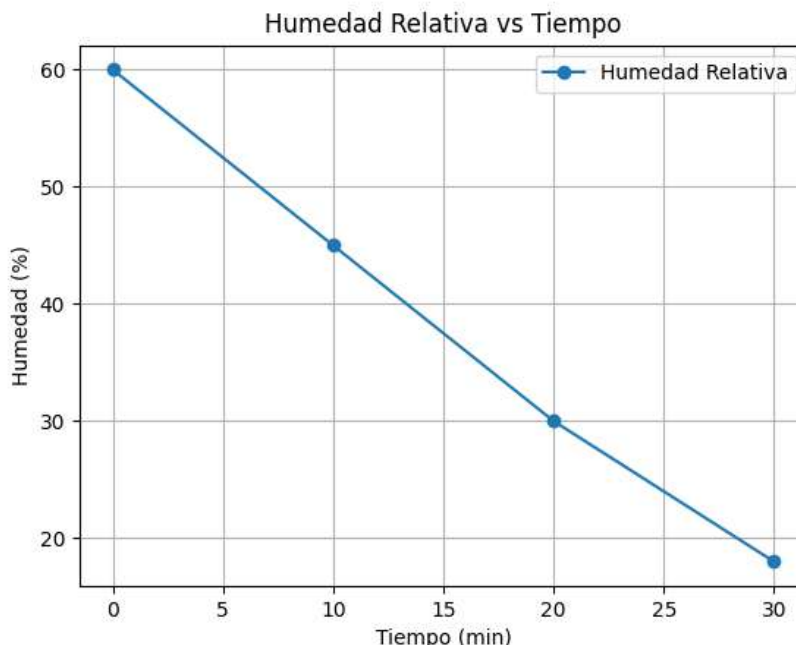


Figura 45. Variación de la humedad del aire en la entrada y salida durante la prueba del colector

Se observa un incremento progresivo de la temperatura del aire a la salida del colector, acompañado de una disminución significativa de la humedad de salida con respecto a la de entrada, lo cual confirma la capacidad del sistema para acondicionar el aire en aplicaciones de secado.

4.6.1.1 Limitaciones experimentales

A continuación, se presentan los cálculos térmicos del colector solar. Sin embargo, es importante considerar ciertas limitaciones experimentales asociadas a la medición de variables del sistema.

Es importante señalar que durante el desarrollo de las pruebas experimentales no fue posible realizar la medición directa de la velocidad del aire en el sistema, debido a la falta de instrumentación especializada, como anemómetros. Por esta razón, algunos parámetros requeridos para el análisis, en particular el flujo másico de aire, fueron estimados a partir de valores asumidos bajo condiciones de operación típicas del sistema.

Cabe resaltar que este tipo de aproximaciones es común en estudios experimentales de carácter preliminar, cuando no se dispone de mediciones directas de todas las variables involucradas. No obstante, estos supuestos introducen un margen de incertidumbre en los

resultados, por lo que los valores obtenidos deben interpretarse como estimaciones representativas del comportamiento del sistema y no como mediciones exactas.

4.6.1.2 Incremento experimental de temperatura

El incremento de temperatura del aire se determinó mediante:

$$\Delta T = T_s - T_e$$

A partir de los datos experimentales:

- A los 10 min: $\Delta T = 14^\circ\text{C}$
- A los 20 min: $\Delta T = 25^\circ\text{C}$
- A los 30 min: $\Delta T = 31^\circ\text{C}$

El incremento promedio en condiciones de operación es:

$$\Delta T_{prom} \approx 23.3^\circ\text{C}$$

Este valor es superior al estimado teóricamente, lo cual indica un buen desempeño térmico del sistema bajo condiciones reales.

4.6.1.3 Potencia térmica útil experimental

La potencia térmica útil se estimó mediante:

$$Q_u = \dot{m}c_p\Delta T$$

Considerando:

$$\dot{m} = 0.02\text{kg/s (valor asumido)}$$

$$c_p = 1005\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{prom} = 23.3^\circ\text{C}$$

Se obtiene:

$$Q_u = 0.02 \cdot 1005 \cdot 23.3$$

$$Q_u \approx 468.9 \text{ W}$$

Este valor representa una estimación experimental basada en un flujo másico asumido, por lo que debe considerarse como aproximado.

4.6.1.4 Eficiencia térmica experimental

La eficiencia térmica se calculó mediante:

$$n_{exp} = \frac{Q_u}{A_c \cdot G}$$

Considerando:

$$Q_u = 468.9 \text{ W}$$

$$A_c = 0.7252 \text{ m}^2$$

$$G = 167.21 \text{ W/m}^2$$

Se obtiene:

$$n_{exp} \approx 387\%$$

Este resultado no es físicamente posible, lo que indica inconsistencias en los parámetros utilizados, principalmente en el flujo másico del aire, el cual no fue medido experimentalmente. Además, el bajo valor de irradiancia registrado influye en la sobreestimación de la eficiencia.

4.6.1.5 Análisis comparativo

Al comparar los resultados teóricos con los experimentales, se observa que:

- El incremento de temperatura promedio (23.3 °C) es mayor al teórico (14.4 °C)
- La potencia térmica estimada experimentalmente supera la estimación teórica
- La eficiencia calculada no es representativa debido a limitaciones experimentales

Estas diferencias se deben a:

- Uso de un flujo másico no medido
- Variaciones en las condiciones ambientales
- Posibles efectos de acumulación térmica en el colector

4.6.1.6 Conclusión del análisis térmico

Los resultados experimentales evidencian que el colector solar es capaz de generar un incremento significativo de temperatura en el aire, alcanzando valores adecuados para aplicaciones de secado. Sin embargo, la estimación de la potencia térmica y la eficiencia presenta limitaciones debido a la falta de medición directa del flujo másico de aire. Por lo tanto, se recomienda en futuras pruebas incorporar instrumentos que permitan medir el caudal de aire con mayor precisión, con el fin de obtener una caracterización más exacta del desempeño térmico del sistema.

4.6.2 Pruebas del sistema electrónico y de control

Una vez finalizado el ensamblaje de las placas de control y potencia dentro de la carcasa diseñada, se procedió a realizar un conjunto de pruebas experimentales orientadas a verificar el correcto funcionamiento del sistema electrónico en condiciones reales de operación. Estas pruebas permitieron validar la estabilidad de la alimentación, la ejecución del programa en el microcontrolador ESP32, la adquisición de datos de los sensores, la actuación sobre el ventilador y la transmisión de información hacia el sistema de monitoreo.

4.6.2.1 Verificación de la etapa de alimentación

Inicialmente, se realizó la calibración del módulo reductor de voltaje LM2596, ajustando su salida a un valor de 5.2 V mediante el potenciómetro integrado. Este procedimiento se efectuó utilizando un multímetro digital, garantizando que el valor medido fuera adecuado para la alimentación del ESP32.

Posteriormente, se verificó la estabilidad del voltaje bajo condiciones de operación, manteniendo el sistema encendido durante varios minutos y observando que no se presentaron fluctuaciones significativas en la tensión de salida. Adicionalmente, se comprobó la correcta distribución de energía hacia los diferentes componentes del sistema, asegurando que la línea de 5 V alimentara correctamente la placa de control y que la línea de 12 V estuviera disponible para el ventilador.

También se realizó una prueba de continuidad en las conexiones principales, con el fin de descartar cortocircuitos o falsos contactos en el montaje.



Figura 46. Verificación de voltajes de 5.2V y 12V LM2596

4.6.2.2 Prueba de arranque y ejecución del sistema

Una vez verificada la alimentación, se procedió a cargar el programa en el microcontrolador ESP32 a través del puerto USB tipo C. Posteriormente, se energizó el sistema y se comprobó el correcto arranque del microcontrolador.

Durante esta prueba se observó que el sistema iniciaba sin reinicios inesperados, ejecutando de forma continua las rutinas de adquisición de datos, procesamiento, visualización y transmisión. Se realizó además una prueba de funcionamiento prolongado, manteniendo el sistema en operación continua, evidenciando estabilidad en la ejecución del código y ausencia de bloqueos o fallos.



Figura 47. Compilación de código al ESP32 mediante cable usb-c



Figura 48. Asignación de IP para protocolo HTTP



Figura 49. Verificación de visualización de datos

4.6.2.3 *Pruebas del sensor de temperatura PT100 (MAX31865)*

Para la validación del sensor de temperatura PT100, implementado mediante el módulo MAX31865, se realizaron pruebas experimentales orientadas a verificar tanto la correcta adquisición de datos como su influencia directa en el sistema de control del ventilador.

Inicialmente, se comprobó la comunicación entre el ESP32 y el módulo MAX31865 mediante el protocolo SPI, verificando que el sistema entregara valores de temperatura de forma continua, estable y sin interrupciones. Posteriormente, se realizaron pruebas de respuesta térmica controlada con el fin de evaluar el comportamiento dinámico del sensor y su utilidad como variable de entrada del sistema de control.

Es importante destacar que, debido a que el sistema térmico basado en el colector solar no alcanzó las temperaturas requeridas dentro del tambor rotatorio para activar completamente la lógica de control, las pruebas del sensor PT100 se realizaron en un entorno controlado utilizando agua como medio de transferencia térmica. Esta metodología permitió generar variaciones de temperatura, facilitando la evaluación del sensor y del sistema de control.

Para ello, la sonda PT100 fue sometida a dos condiciones distintas:

- temperatura ambiente, como referencia inicial
- inmersión en agua calentada progresivamente, para evaluar el incremento controlado de temperatura

Durante estas pruebas se observó que el sensor:

- respondía de manera progresiva a los cambios térmicos
- no presentaba saltos bruscos ni valores erráticos
- mostraba estabilidad una vez alcanzada la nueva condición térmica

Adicionalmente, estas pruebas permitieron validar experimentalmente la señal de temperatura utilizada como entrada del controlador. A partir del calentamiento progresivo del agua, fue posible simular el comportamiento térmico del sistema y analizar la respuesta del ventilador frente a diferentes niveles de temperatura.

Con base en estas pruebas, se realizó el ajuste empírico de los parámetros del controlador implementado en el ESP32. El proceso de sintonización consistió en modificar progresivamente las ganancias proporcional, integral y derivativa, observando la respuesta del sistema en términos de suavidad, estabilidad y coherencia entre temperatura, PWM y velocidad del ventilador.

Como resultado de este procedimiento experimental, se definieron los valores:

- $K_p = 2.5$
- $K_i = 0.3$
- $K_d = 0.8$

Formula general:

$$u(t): K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t): 2.5 e(t) + 0.3 \int e(t) dt + 0.8 \frac{de(t)}{dt}$$

Estos valores proporcionaron una respuesta estable, sin oscilaciones abruptas, y una transición suave en la velocidad del ventilador ante cambios de temperatura.

Asimismo, se comprobó que:

- para temperaturas inferiores a 45 °C, el sistema asignaba un PWM máximo (255)
- a medida que la temperatura aumentaba hacia 50 °C, el PWM disminuía progresivamente
- para temperaturas superiores a 70°C, el PWM tendía a valores mínimos

Es importante resaltar que la estrategia implementada corresponde a un control híbrido, en el cual se combina una lógica por rangos de temperatura con una corrección tipo PID dentro de la zona de operación.

En conjunto, estas pruebas permitieron validar tanto la correcta medición del sensor PT100 como su papel en la determinación experimental de los parámetros del sistema de control.



Figura 50. Inmersión en agua calentada progresivamente

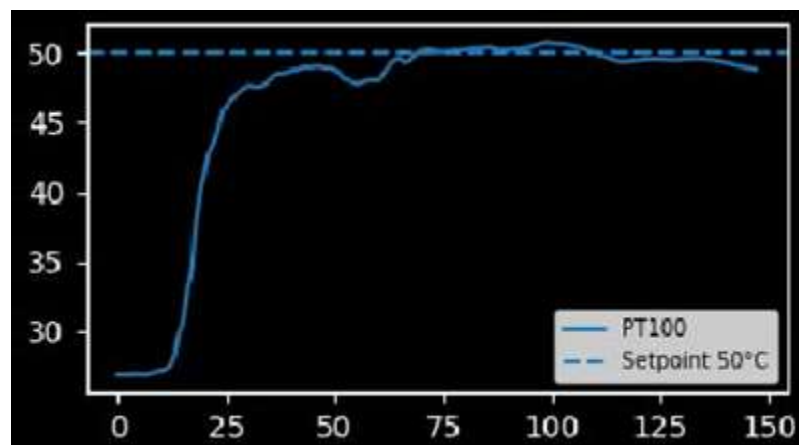


Figura 51. Respuesta de Temperatura con valores definidos del PID

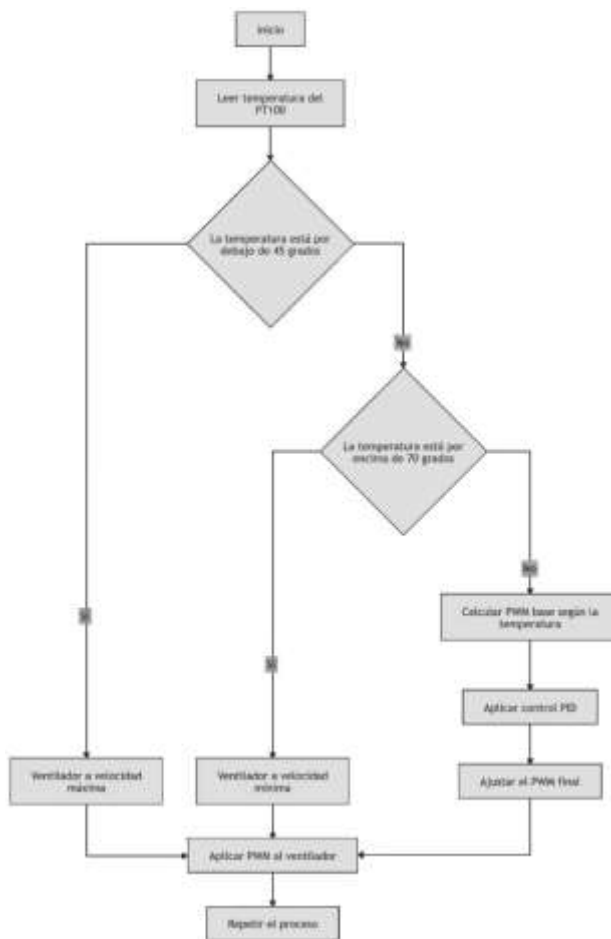


Figura 52. Diagrama de flujo control PID

4.6.2.4 Pruebas de los sensores de temperatura y humedad SHT31

El sistema cuenta con dos sensores SHT31, destinados a medir condiciones ambientales y del aire de proceso. Para su validación, se realizaron pruebas de comunicación I2C y adquisición simultánea de datos.

Inicialmente, se verificó que ambos sensores fueran detectados correctamente por el ESP32, sin conflictos de direccionamiento en el bus I2C. Posteriormente, se comprobó la estabilidad de las lecturas de temperatura y humedad relativa.

Para evaluar la respuesta de los sensores, se generaron cambios controlados en el entorno (variación de temperatura ambiente o presencia de humedad), observando que:

- Las lecturas variaban de forma coherente.
- No se presentaban valores erráticos.
- Ambos sensores respondían de manera independiente.

Estas pruebas permitieron validar la correcta integración de los sensores dentro del sistema y su capacidad para monitorear variables clave del proceso de secado.



Salida Colector

Temp: 36.1 °C Hum: 96.4 %

Figura 53. Respuesta sensor SHT31-1 a prueba de agua hervida



Salida Colector

Temp: 11.3 °C Hum: 70.5 %

Figura 54. Respuesta sensor SHT31-1 a prueba de hielo

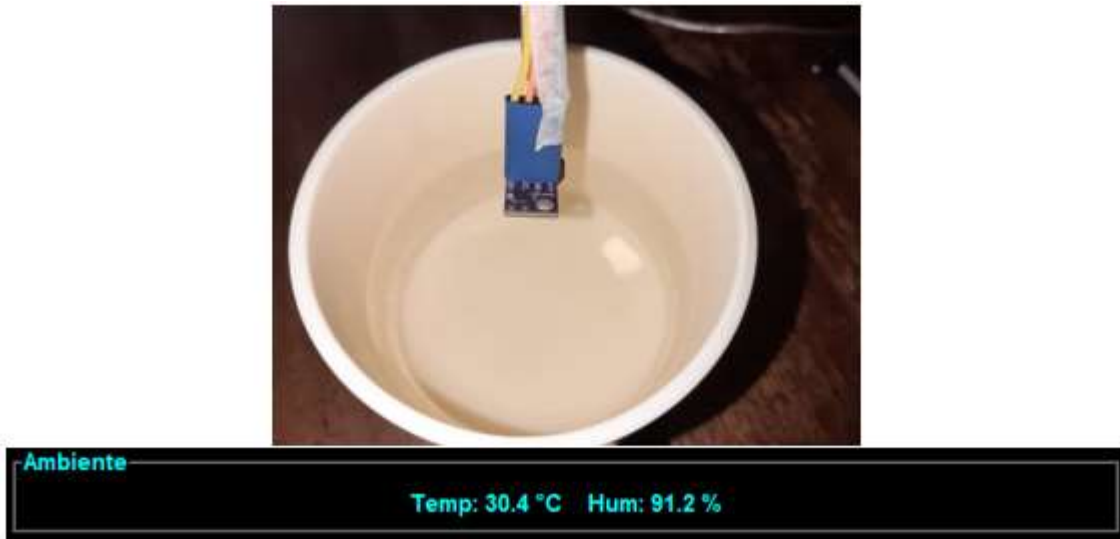


Figura 55. Respuesta sensor SHT31-2 a prueba de agua hervida



Figura 56. Respuesta sensor SHT31-2 a prueba de hielo

4.6.2.5 Prueba de la pantalla TFT

Se verificó el funcionamiento de la pantalla TFT como interfaz de visualización local. Durante esta prueba, se comprobó que las variables adquiridas por el sistema (temperatura, humedad, señal PWM y RPM del ventilador) fueran mostradas en tiempo real.

Se evaluó:

- Correcta actualización de datos.
- Legibilidad de la información.
- Ausencia de retrasos o congelamientos en la interfaz.

Esto permitió validar la funcionalidad del sistema de monitoreo local integrado en la carcasa.



Figura 57. Visualización correcta de los datos de los sensores en la pantalla TFT

4.6.2.6 Pruebas del sistema de ventilación (control PWM y RPM)

El sistema de ventilación fue evaluado en conjunto con el sensor PT100, dado que su funcionamiento depende directamente de la temperatura medida en el proceso.

Para esta prueba, se monitorearon simultáneamente tres variables:

- Temperatura (PT100)
- Señal PWM aplicada al ventilador
- Velocidad de rotación (RPM)

Durante los ensayos, se modificaron las condiciones térmicas del sensor PT100 (hielo y agua tibia), observando la respuesta del ventilador en tiempo real.

Se evidenció que:

- Cuando la temperatura era **baja** ($< 45^{\circ}\text{C}$), el ventilador operaba a máxima velocidad, con valores de PWM cercanos a 255 y RPM elevadas.
- A medida que la temperatura aumentaba, la señal PWM disminuía de forma progresiva, reduciendo la velocidad del ventilador.

- En temperaturas cercanas o superiores al punto de control ($\approx 50^{\circ}\text{C}$), se observaba una disminución significativa en las RPM.

Asimismo, se verificó la correcta lectura de la señal de retroalimentación del ventilador mediante el sensor de RPM, confirmando que los valores registrados correspondían con el comportamiento físico observado.

El sistema mostró una respuesta suave y continua, sin cambios bruscos en la velocidad, lo cual indica una adecuada implementación del control (combinación de lógica proporcional y ajuste tipo PID).

Estas pruebas permitieron validar la interacción entre el sistema de medición (PT100) y el sistema de actuación (ventilador), confirmando que el control del flujo de aire se realiza de manera automática en función de la temperatura.



Figura 58. PWM cuando temperatura PT100 está por debajo de 45°C



Figura 59. PWM cuando temperatura PT100 está en 50°C calculado con PID

4.6.2.7 Prueba de comunicación y registro de datos

Finalmente, se evaluó la capacidad de transmisión de datos del ESP32 hacia la aplicación desarrollada en Python mediante conexión WiFi.

Se verificó que:

- El microcontrolador estableciera conexión con la red.
- Los datos fueran enviados en formato adecuado (JSON).
- La aplicación recibiera y visualizara correctamente la información.

Adicionalmente, se comprobó el almacenamiento de los datos en archivos para su posterior análisis, validando la funcionalidad del sistema como herramienta de adquisición experimental.

```

inter.py > ...
1 import requests
2 import pandas as pd
3 import tkinter as tk
4 from datetime import datetime
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
7 import time
8 import math
9
10 # ----- CONFIG -----
11 ESP32_IP = "http://192.168.0.12/data"
12 INTERVALO_DATOS = 1000
13 INTERVALO_REFRESH = 50
14 SETPOINT_TEMP = 50
15
16 data_log = []
17
18 # ----- Cronometro -----
19 contador_activo = False

```

[Running] python -d:\Proyecto de Grado\Interfaz\Inter.py

Figura 60. Conexión Python con la red mediante IP



Figura 61. Correcta visualización de los datos en la interfaz

hora	temp_pt100	pwm	rpm	t1	h1	t2	h2	humedad_cafe	tiempo_hms	tiempo_secado
2026-03-07 10:03:01	21,58	255	684570	23,66	45,57	19,68	55,03	30 00:00:00	00:00:00	
2026-03-07 10:03:04	21,61	255	677970	23,66	45,48	19,68	55,01	30 00:00:02	00:00:00	
2026-03-07 10:03:05	21,64	255	687870	23,67	45,49	19,68	55,01	30 00:00:04	00:00:00	
2026-03-07 10:03:07	21,61	255	686010	23,67	45,46	19,71	55	30 00:00:06	00:00:00	
2026-03-07 10:03:09	21,68	255	1361610	23,67	45,38	19,69	55,01	30 00:00:08	00:00:00	
2026-03-07 10:03:10	21,61	255	1363980	23,67	45,35	19,69	55,01	30 00:00:09	00:00:00	
2026-03-07 10:03:12	21,58	255	681180	23,66	45,38	19,69	55,09	30 00:00:11	00:00:00	
2026-03-07 10:03:14	21,68	255	684930	23,66	45,52	19,71	55,17	30 00:00:13	00:00:00	
2026-03-07 10:03:16	21,61	255	677910	23,69	45,53	19,72	55,19	30 00:00:15	00:00:00	

Figura 62. Correcto almacenamiento de datos de la interfaz

4.6.2.8 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas al sistema electrónico y de control evidencian un funcionamiento estable, coherente e integrado de todos los subsistemas evaluados. En primer lugar, la etapa de alimentación, basada en el módulo LM2596, demostró suministrar un voltaje regulado y estable de 5.2 V, garantizando condiciones adecuadas de operación para el microcontrolador ESP32 y los demás componentes electrónicos, sin presencia de fluctuaciones ni caídas de tensión durante el funcionamiento continuo.

En cuanto al microcontrolador, se observó una ejecución estable del programa, sin reinicios inesperados ni fallos de procesamiento, lo cual confirma una adecuada integración entre el hardware y el software desarrollado. La correcta ejecución de las rutinas de adquisición, control, visualización y transmisión de datos evidencia la robustez del sistema implementado.

Respecto a los sensores, el PT100, a través del módulo MAX31865, presentó una respuesta adecuada frente a variaciones térmicas controladas (hielo, ambiente y agua tibia), mostrando cambios progresivos y estables en la temperatura medida, sin comportamientos erráticos. Por su parte, los sensores SHT31 evidenciaron lecturas consistentes de temperatura y humedad relativa, respondiendo de forma coherente ante cambios en las condiciones ambientales y sin conflictos en la comunicación I2C, lo que valida su correcto funcionamiento simultáneo.

En relación con el sistema de control, se comprobó una adecuada interacción entre la medición de temperatura del PT100 y la actuación del ventilador. Se evidenció un comportamiento inversamente proporcional entre la temperatura y la señal PWM: a bajas temperaturas el sistema opera con PWM máximo, mientras que al incrementarse la temperatura hacia el valor de referencia, la señal disminuye progresivamente. Esta respuesta confirma la correcta implementación de la lógica de control, combinando un comportamiento proporcional

con ajuste tipo PID, lo cual permitió obtener una regulación suave y sin cambios bruscos en la velocidad del ventilador.

Asimismo, la medición de RPM permitió validar físicamente la acción de control, evidenciando que las variaciones en la señal PWM se traducen directamente en cambios en la velocidad de rotación, confirmando la correcta respuesta del actuador y la efectividad del sistema de retroalimentación.

Por otra parte, la pantalla TFT demostró un funcionamiento adecuado como interfaz de monitoreo local, permitiendo la visualización en tiempo real de las variables del sistema sin retardos ni interrupciones. De igual manera, la comunicación WiFi y la transmisión de datos hacia la aplicación en Python se realizaron de forma continua y confiable, garantizando el monitoreo remoto y el almacenamiento de la información para su posterior análisis.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el sistema electrónico y de control presenta una integración adecuada entre sus diferentes componentes, cumpliendo de manera satisfactoria con las funciones de medición, control, visualización y registro de datos requeridas para el proceso de secado.

4.6.2.9 Conclusión

Las pruebas experimentales realizadas al sistema electrónico y de control permitieron validar su correcto funcionamiento una vez integrado en la carcasa. Se comprobó que la etapa de potencia proporciona una alimentación estable y confiable, garantizando condiciones adecuadas para la operación continua del sistema.

El microcontrolador ESP32 demostró una ejecución robusta del programa, permitiendo la adquisición, procesamiento y transmisión de datos sin fallos, lo cual confirma la correcta implementación del software y su adecuada interacción con el hardware.

En cuanto a los sensores, tanto el PT100 como los SHT31 mostraron un comportamiento estable y coherente, permitiendo la medición confiable de las variables de temperatura y humedad, fundamentales para el monitoreo del proceso de secado. Asimismo, se verificó que estos sensores pueden operar de manera simultánea sin interferencias, garantizando la integridad de los datos adquiridos.

El sistema de ventilación demostró una respuesta adecuada al control implementado, regulando la velocidad del ventilador en función de la temperatura medida, con una relación

directa entre la señal PWM y las RPM obtenidas. Esto confirma la efectividad del sistema de control y su capacidad de adaptación ante cambios en las condiciones térmicas.

Adicionalmente, la interfaz de visualización en pantalla TFT y el sistema de comunicación inalámbrica permitieron el monitoreo tanto local como remoto de las variables del sistema, así como el registro continuo de datos, lo cual resulta fundamental para el análisis experimental.

Por lo tanto, se concluye que el sistema electrónico y de control desarrollado cumple con los requerimientos necesarios para su implementación dentro del prototipo de secado de café, constituyéndose como una herramienta confiable para la adquisición, supervisión y control de variables durante las pruebas experimentales del sistema completo.

4.6.3 Pruebas tambor rotatorio

Con el fin de verificar el funcionamiento del tambor rotatorio, se realizaron pruebas preliminares bajo condiciones reales de operación. Durante estas pruebas, el sistema operará con una configuración fija del motor, manteniendo constante la señal de control.

Las pruebas se desarrollarán en tres condiciones: funcionamiento en vacío, funcionamiento con carga y operación continua. En cada caso, se registrarán variables como el voltaje del motor y la corriente consumida, con el propósito de analizar el comportamiento eléctrico del sistema y evaluar el efecto de la carga sobre el consumo energético.

Estas pruebas permitieron comprobar la estabilidad del funcionamiento del tambor rotatorio y validar su desempeño dentro del sistema de secado.

Ensayo	Condición de operación	Masa de carga (g)	Voltaje del motor (V)	Corriente (A)
1	Vacío	0	119	0.18
2	Con carga	6kg	119	0.24
3	Operación continua	6kg	119	0.26
4	Operación continua	6k	119	0.25

Tabla 6. Registro de pruebas preliminares del tambor rotatorio

4.6.3.1 Análisis del tambor rotatorio

4.6.3.1.1 Condición de vacío

Cálculo de la potencia eléctrica del motor en vacío

$$P = V \cdot I$$

$$P_1 = 119 \cdot 0.18$$

$$P_1 = 21.42 \text{ W}$$

4.6.3.1.2 Análisis en vacío

En la condición en vacío, el tambor rotatorio operó sin carga, registrando un consumo de corriente de 0.18 A y una potencia eléctrica de 21.42 W. Este valor representa el consumo base del sistema, asociado principalmente a las pérdidas mecánicas, fricción en los soportes y funcionamiento propio del motor.

4.6.3.1.3 Conclusión en vacío

La prueba en vacío permitió establecer una condición de referencia del consumo energético del sistema sin carga, evidenciando un funcionamiento estable y sin requerimientos adicionales de esfuerzo mecánico.

4.6.3.1.4 Condición con carga y operación continua

Cálculo de la potencia del motor

Ensayo con carga

$$P_2 = 119 \cdot 0.24$$

$$P_2 = 28.56 \text{ W}$$

Operación continua

$$P_3 = 119 \cdot 0.26 = 30.94 \text{ W}$$

$$P_4 = 119 \cdot 0.25 = 29.75 \text{ W}$$

4.6.3.1.5 Potencia promedio del sistema

$$P_{prom} = \frac{28.56 + 30.94 + 29.75}{3}$$

$$P_{prom} = \frac{89.25}{3}$$

$$P_{prom} = 29.75 \text{ W}$$

4.6.3.1.6 Variación porcentual de corriente vacío vs carga

$$\% \Delta I = \frac{I_{carga} - I_{vacío}}{I_{vacío}} \cdot 100$$

$$\% \Delta I = \frac{0.24 - 0.18}{0.18} \cdot 100$$

$$\% \Delta I = \frac{0.06}{0.18} \cdot 100$$

$$\% \Delta I = 33.33\%$$

4.6.3.1.7 Corriente promedio en operación continua

$$I_{prom} = \frac{0.26 + 0.25}{2}$$

$$I_{prom} = 0.255 \text{ A}$$

4.6.3.1.8 Voltaje promedio en operación continua

$$V_{prom} = \frac{119 + 119}{2}$$

$$V_{prom} = 119 \text{ V}$$

4.6.3.1.9 Potencia promedio en operación continua

$$P_{prom} = \frac{30.94 + 29.75}{2}$$

$$P_{prom} = 30.35 \text{ W}$$

4.6.3.1.10 Análisis de resultados

En la condición con carga, el sistema registró una corriente de 0.24 A y una potencia de 28.56 W, evidenciando un incremento respecto a la condición en vacío. Este aumento corresponde al esfuerzo adicional requerido por el motor para movilizar el material dentro del tambor.

La variación porcentual de la corriente fue de 33.33 %, lo cual confirma la influencia directa de la carga sobre el consumo energético del sistema.

Durante la operación continua, el tambor presentó un comportamiento estable, con corrientes de 0.26 A y 0.25 A, obteniendo un valor promedio de 0.255 A y una potencia promedio de 30.35 W. Estos resultados indican que el sistema mantiene un consumo energético constante durante su funcionamiento prolongado, sin evidenciar inestabilidades.

4.6.3.1.11 Conclusión

Las pruebas realizadas evidencian que el tambor rotatorio presenta un comportamiento adecuado bajo condiciones de operación reales. Se identificó un incremento en el consumo de corriente al trabajar con carga, lo cual es consistente con el aumento del esfuerzo mecánico requerido por el sistema. Asimismo, durante la operación continua, el sistema mostró estabilidad

en su funcionamiento, manteniendo valores constantes de corriente y potencia, lo que valida su desempeño dentro del sistema de secado.

4.6.4 Pruebas del sistema fotovoltaico

Con el fin de evaluar el funcionamiento del sistema fotovoltaico, se realizaron pruebas preliminares bajo condiciones reales de operación, exponiendo los paneles a la radiación solar directa. Durante estas pruebas, se registraron variables como la irradiancia solar, el voltaje y la corriente generada por el sistema en diferentes intervalos de tiempo.

A partir de estos datos, se calculó la potencia eléctrica generada durante el periodo de prueba, con el propósito de analizar el comportamiento del sistema y verificar su capacidad para suministrar energía al prototipo de secado.

Tiempo (min)	Irradiancia G (W/m^2)	Voltaje del sistema (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
10	192	83	0.35	29
20	202	84	0.36	30
30	207	86	0.36	30

Tabla 7. Registro de pruebas del sistema fotovoltaico

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el sistema fotovoltaico presentó un comportamiento estable durante el periodo de prueba, evidenciado en el incremento progresivo de la irradiancia solar de $192 W/m^2$ a $207 W/m^2$. Este aumento se reflejó en una ligera variación del voltaje del sistema, el cual pasó de 83 V a 86 V, mientras que la corriente se mantuvo prácticamente constante alrededor de 0.35–0.36 A.

En consecuencia, la potencia generada se mantuvo en un rango cercano a los 29–30 W, lo que indica que, bajo estas condiciones de radiación, el sistema es capaz de suministrar una potencia eléctrica estable. Estos resultados permiten validar que el sistema fotovoltaico puede aportar energía al prototipo de secado, especialmente para la alimentación de los subsistemas electrónicos y de control.

No obstante, es importante destacar que los valores de irradiancia registrados corresponden a condiciones moderadas de radiación solar, lo cual limita la potencia generada. Esto evidencia la dependencia directa del sistema fotovoltaico respecto a la disponibilidad de radiación solar, condición característica del contexto climático de la ciudad de Pasto.

4.6.4.1 Cálculos

4.6.4.1.1 Verificación de la potencia

$$P = V \cdot I$$

$$P_1 = 83 \cdot 0.35 = 29.05 \approx 29W$$

$$P_2 = 84 \cdot 0.36 = 30.24 \approx 30W$$

$$P_3 = 86 \cdot 0.36 = 30.96 \approx 30W$$

4.6.4.1.2 Potencia Promedio

$$P_{prom} = \frac{29 + 30 + 30}{3}$$

$$P_{prom} = \frac{89}{3}$$

$$P_{prom} = 30 W$$

4.6.4.1.3 Voltaje promedio

$$V_{prom} = \frac{83 + 84 + 86}{3}$$

$$V_{prom} = \frac{253}{3}$$

$$V_{prom} = 84.3 V$$

4.6.4.1.4 Corriente promedio

$$I_{prom} = \frac{0.35 + 0.36 + 0.36}{3}$$

$$I_{prom} = \frac{1.07}{3}$$

$$I_{prom} = 0.3566 \text{ A}$$

4.6.4.1.5 Irradiancia promedio

$$G_{prom} = \frac{192 + 202 + 207}{3}$$

$$G_{prom} = \frac{601}{3}$$

$$G_{prom} = 200.3 \text{ W/m}^2$$

4.6.4.1.6 Energía generada

Tiempo total = 30 min

$$t = \frac{30}{60} = 0.5 \text{ h}$$

$$E = P_{prom} \cdot t$$

$$E = 30 \cdot 0.5$$

$$E = 15 \text{ Wh}$$

4.6.4.1.7 Eficiencia del sistema fotovoltaico

$$n = \frac{P_{prom}}{A \cdot G_{prom}}$$

Donde:

P_{prom} potencia promedio

A área total de paneles (m^2)

$$n = \frac{30}{1.73 \cdot 200.3}$$

$$n = \frac{30}{346.519}$$

$$n = 0.0865$$

$$n = 8.65\% \approx 8.6\%$$

4.6.4.1.8 Análisis de resultados

Durante las pruebas del sistema fotovoltaico se registraron valores de voltaje, corriente e irradiancia solar en diferentes intervalos de tiempo. A partir de estos datos, se obtuvo un voltaje promedio de 84.3 V, una corriente promedio de 0.3566 A y una potencia promedio de 30 W.

La irradiancia solar promedio durante el ensayo fue de 200.3 W/m², valor calculado a partir de las mediciones realizadas en un periodo de 30 minutos. Sin embargo, es importante aclarar que este valor corresponde únicamente a las condiciones específicas bajo las cuales se desarrolló la prueba, por lo que no puede considerarse representativo del comportamiento promedio de irradiancia en la zona de estudio.

En este sentido, los datos obtenidos permiten caracterizar el desempeño instantáneo del sistema fotovoltaico bajo condiciones reales de operación, mas no establecer conclusiones generalizadas sobre el recurso solar disponible en la ciudad de Pasto. Para determinar un valor

promedio representativo de irradiancia, sería necesario contar con mediciones continuas durante periodos prolongados o emplear información proveniente de estaciones meteorológicas.

En las condiciones evaluadas, el sistema generó una energía total de 15 Wh en un periodo de 30 minutos, evidenciando su capacidad para producir energía de forma continua durante el tiempo de operación analizado.

Se observa que tanto el voltaje como la corriente presentan un comportamiento estable a lo largo del tiempo, con un ligero incremento asociado al aumento de la irradiancia solar. Esto confirma la relación directa entre la radiación incidente y la potencia generada por el sistema fotovoltaico.

En general, los resultados demuestran que el sistema es capaz de generar energía de manera continua y estable bajo condiciones de irradiancia moderada, siendo adecuado para alimentar los componentes del prototipo de secado, especialmente los subsistemas electrónicos y de control.

4.7 Pruebas experimentales del sistema del secado

Con el propósito de evaluar el desempeño integral del prototipo de secado de café, se realizaron pruebas experimentales bajo condiciones controladas en las instalaciones de la Universidad CESMAG. Estas pruebas permitieron analizar el comportamiento térmico, mecánico, electrónico y energético del sistema, así como su capacidad para reducir el contenido de humedad del grano hasta valores adecuados para su almacenamiento.

Durante los días de secado, el sistema operó de manera integrada mediante sus diferentes subsistemas: el colector solar como fuente de calentamiento del aire, el tambor rotatorio como mecanismo de agitación del café, el sistema electrónico de monitoreo basado en el microcontrolador ESP32, y el sistema fotovoltaico como fuente de alimentación eléctrica. De esta manera, se validó no solo el proceso de secado, sino también la autonomía energética del sistema al emplear energía solar tanto en forma térmica como eléctrica.

Las pruebas se realizaron utilizando una carga aproximada de 6 kg de café pergamino húmedo en cada ensayo, garantizando condiciones homogéneas que permitieran comparar los resultados obtenidos.

Es importante resaltar que los datos obtenidos durante estos días de secado no solo permiten evaluar el comportamiento térmico del sistema, sino que constituyen la base para el desarrollo de un modelo matemático capaz de describir y predecir la evolución del contenido de humedad del café en función del tiempo y de las condiciones operativas del sistema.

4.7.1 Procedimiento experimental

Para la ejecución de las pruebas se siguió el siguiente procedimiento:

- Verificación del correcto funcionamiento del sistema fotovoltaico, incluyendo paneles solares, baterías e inversor.
- Carga del café pergamino húmedo en el tambor rotatorio.
- Activación del sistema de ventilación y del colector solar.
- Puesta en marcha del sistema de monitoreo y adquisición de datos mediante el ESP32.
- Registro continuo de variables como: temperatura dentro del tambor, temperatura ambiente, humedad ambiente, temperatura salida colector, humedad salida del colector, tiempo de secado.
- Medición periódica del contenido de humedad del café.

Finalización del ensayo cuando el café alcanzó valores entre 10 % y 12 % de humedad.

Durante las pruebas se verificó que la energía suministrada por el sistema fotovoltaico fue suficiente para mantener el funcionamiento continuo del sistema, sin interrupciones.

4.7.2 Organización de las pruebas experimentales

El registro de datos incluyó observaciones que indican el momento en el cual se realizó el cambio de carga de café. Por esta razón, los resultados se organizaron en función de cada carga procesada y no únicamente por fecha, identificándose cuatro pruebas experimentales independientes.

4.7.3 Resultados experimentales

Prueba	Periodo evaluado	Temp. Promedio (°C)	Humedad relativa promedio (%)	Tiempo total (h)	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)
1	02/03 – 04/03	28.04	45.16	25.02	32.6	12.1
2	04/03 – 09/03	22.75	65.70	24.98	33.1	12
3	10/03 – 12/03	29.10	48.50	23.80	31.8	11.8
4	13/03 – 15/03	24.60	60.20	24.20	32.2	12.3

Tabla 8. Resumen general de las pruebas

La tabla 8, muestra que los resultados en todas las pruebas el sistema logró reducir el contenido de humedad del café hasta valores cercanos al 12 %, adecuados para almacenamiento, además, Los datos presentados constituyen la base experimental para el análisis de la cinética de secado y el desarrollo del modelamiento matemático del proceso.

Al comparar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos experimentales, se evidencia una variación moderada asociada principalmente a cambios en las condiciones ambientales. Sin embargo, la tendencia general del proceso de secado se mantiene consistente, lo cual respalda la repetibilidad del comportamiento del sistema.

4.7.4 Representación gráfica de los resultados

Se elaboraron gráficas con el fin de analizar el comportamiento del sistema.

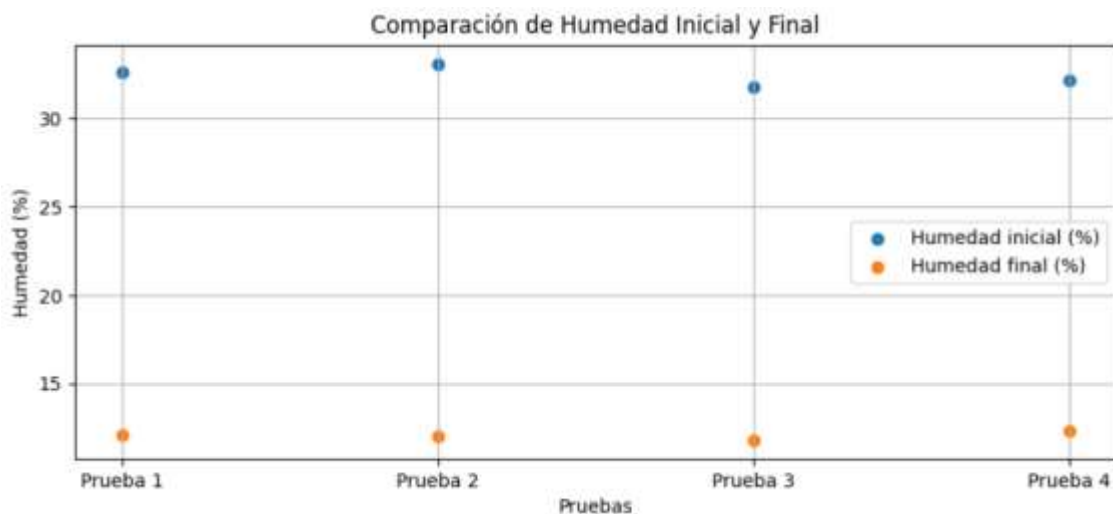


Figura 63. Humedad inicial y final del café por prueba

La gráfica muestra la variación de la humedad del café antes y después del proceso de secado. Se observa que en todas las pruebas el sistema logró reducir la humedad desde valores iniciales cercanos al 32 % hasta valores finales alrededor del 12 %, lo cual confirma la efectividad del sistema.

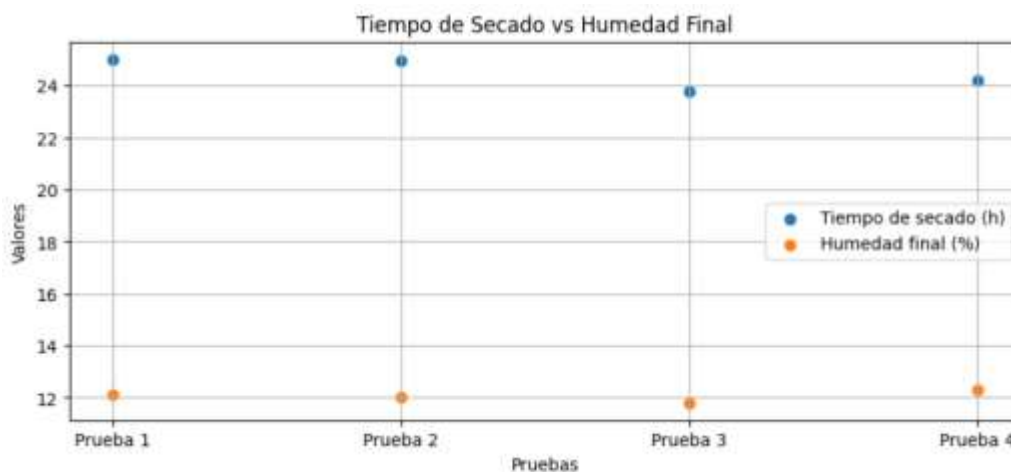


Figura 64. Relación entre el tiempo de secado y la humedad final

En la figura 95, se observa que los valores de humedad presentan una tendencia decreciente consistente a lo largo del tiempo en los diferentes ensayos. La variabilidad entre mediciones se

mantiene dentro de rangos reducidos, lo cual indica un comportamiento estable del sistema durante el proceso de secado.

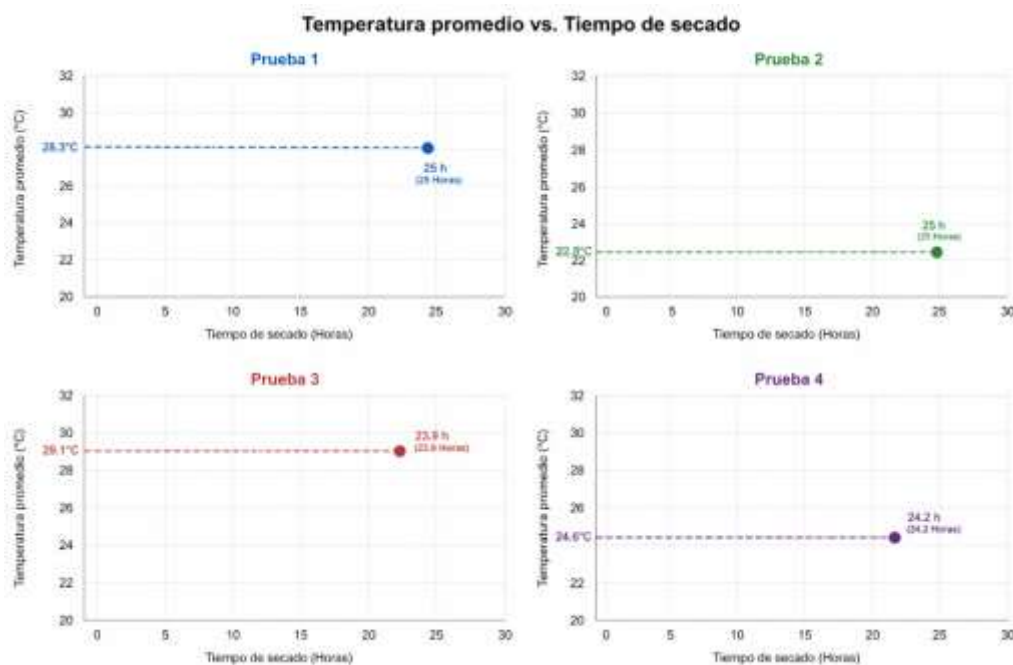


Figura 65. Relación entre la temperatura promedio y el tiempo de secado

La figura 96 muestra la relación entre la temperatura promedio del aire de secado y el tiempo requerido para alcanzar la humedad final del café. Se observa que a mayores temperaturas promedio, el tiempo de secado tiende a disminuir, lo cual es consistente con los principios de transferencia de calor y masa. Sin embargo, esta relación no es completamente lineal debido a la influencia de variables como la humedad relativa y la variabilidad de la irradiancia durante las pruebas experimentales.

El eje Y corresponde al tiempo requerido para alcanzar la humedad objetivo en cada ensayo, permitiendo analizar la influencia de la temperatura sobre la duración del proceso.

Estas graficas representan el comportamiento real del sistema y fueron utilizadas como referencia para validar los modelos matemáticos desarrollados posteriormente.

4.7.5 Curva de secado del sistema

Con el fin de representar el comportamiento general del proceso de secado del café, se construyó una curva de secado a partir de los resultados experimentales obtenidos en las diferentes pruebas.

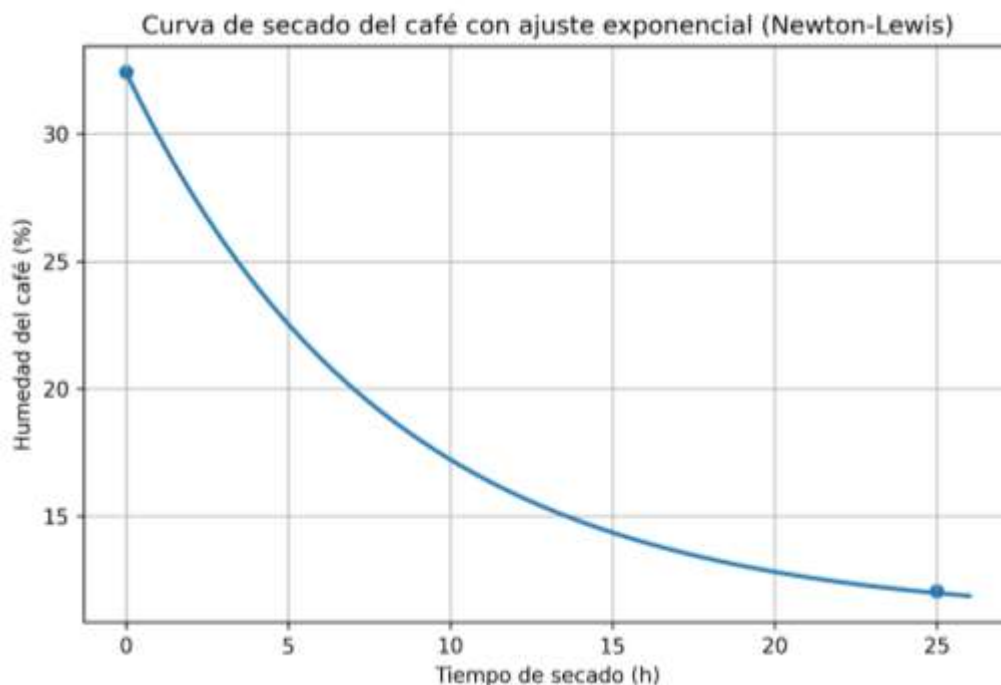


Figura 66. Curva de secado representativa del sistema

La figura muestra la variación del contenido de humedad del café en función del tiempo de secado. Se observa una tendencia decreciente continua, iniciando en valores cercanos al 32 % y alcanzando valores finales próximos al 12 %, correspondientes al rango adecuado para almacenamiento.

La forma de la curva corresponde a un comportamiento exponencial decreciente típico de los procesos de secado, en el cual inicialmente se presenta una mayor velocidad de eliminación de humedad, seguida de una disminución progresiva de la tasa de secado a medida que el contenido de agua en el grano disminuye.

Esta curva representa el comportamiento promedio del sistema bajo las condiciones experimentales evaluadas, y constituye una base adecuada para la aplicación del modelo matemático de Newton-Lewis.

4.7.6 *Análisis de regresión*

Con el fin de determinar el modelo matemático que mejor describe el comportamiento del proceso de secado, se realizó un análisis de regresión sobre los datos experimentales.

Se evaluaron diferentes tipos de ajuste, incluyendo modelos lineales, cuadráticos y exponenciales. La selección del modelo se realizó considerando tanto el coeficiente de determinación (R^2) como la coherencia física del fenómeno.

Aunque los modelos polinómicos pueden presentar un buen ajuste numérico, estos no representan adecuadamente la naturaleza del proceso de secado, ya que pueden generar comportamientos no realistas fuera del rango experimental.

Por otro lado, el modelo exponencial describe de manera adecuada la disminución progresiva de la humedad, siendo consistente con los principios de transferencia de masa.

En consecuencia, se selecciona el modelo exponencial como base para el modelamiento matemático del proceso.

El análisis de regresión no solo permite identificar el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales, sino que constituye el primer paso para la construcción de un modelo matemático ajustado permite estimar el comportamiento del proceso de secado bajo las condiciones experimentales evaluadas.

4.7.7 *Modelo exponencial ajustado*

El análisis de regresión realizado sobre los datos experimentales permitió identificar que el comportamiento del proceso de secado del café sigue una tendencia exponencial decreciente. En este tipo de procesos, es común modelar la variación de la humedad en función del tiempo mediante una función exponencial de la forma:

$$M(t) = ae^{bt}$$

Donde:

$M(t)$ es el contenido de humedad del café en el tiempo t

a es el valor inicial de la función (relacionado con la humedad inicial del proceso)

b es el parámetro que describe la velocidad de decrecimiento de la humedad

t es el tiempo de secado

Este modelo representa matemáticamente el comportamiento experimental observado y sirve como aproximación inicial para describir la cinética de secado. Sin embargo, al tratarse de un modelo empírico, no incorpora directamente los fundamentos físicos del proceso, por lo que se requiere su transición hacia un modelo con base teórica.

4.7.7.1 Obtención de los parámetros del modelo

Para determinar los valores de a y b , se aplicó un ajuste de regresión exponencial a los datos experimentales obtenidos durante el proceso de secado. Este procedimiento se realizó utilizando herramientas computacionales, las cuales permiten minimizar el error entre los datos medidos y la función ajustada.

Como resultado del proceso de ajuste, se obtuvieron los siguientes valores:

$$a = 20.4475$$

$$b = -0.05464$$

4.7.7.2 Interpretación física de los parámetros

El parámetro a representa el valor de la humedad cuando $t = 0$, es decir:

$$M(0) = a = 20.4475\%$$

Este valor es coherente con la humedad inicial del café registrada experimentalmente, lo cual indica que el modelo describe adecuadamente el punto de partida del proceso.

Por otro lado, el parámetro b tiene un valor negativo:

$$b = -0.05464$$

Esto indica que la función es decreciente, es decir, la humedad disminuye con el tiempo. La magnitud de este parámetro está asociada a la velocidad del proceso de secado: valores más negativos implican una reducción más rápida de la humedad.

4.7.7.3 *Modelo ajustado final*

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación general, se obtiene el modelo exponencial ajustado:

$$M(t) = 20.4475e^{-0.05464t}$$

Este modelo permite estimar el contenido de humedad del café en cualquier instante de tiempo dentro del rango experimental analizado.

4.7.7.4 *Verificación del modelo*

Para verificar la coherencia del modelo, se puede calcular la humedad en un tiempo específico. Por ejemplo, para $t = 5$ horas:

$$M(5) = 20.4475e^{-0.05464(5)}$$

$$M(5) = 20.4475e^{-0.2732}$$

$$M(5) = 20.4475 \times 0.7607$$

$$M(5) \approx 15.55\%$$

Este valor es consistente con los datos experimentales observados, lo que confirma la validez del ajuste realizado.

4.7.7.5 *Importancia del modelo exponencial*

El modelo exponencial no solo proporciona un buen ajuste a los datos experimentales, sino que también tiene un fundamento físico, ya que los procesos de secado convectivo suelen presentar una disminución exponencial del contenido de humedad debido a mecanismos de transferencia de masa dominados por difusión interna.

Este resultado es fundamental, ya que permite establecer la base para la aplicación del modelo de Newton–Lewis en el análisis del proceso de secado.

4.7.8 Cálculo de la constante de secado

Una vez identificada la tendencia exponencial del proceso de secado y establecida la relación con el modelo de Newton–Lewis, se procedió al cálculo de la constante de secado k , parámetro que representa la rapidez con la que el sistema reduce la humedad del café.

El modelo de Newton–Lewis se expresa como:

$$MR = e^{-kt}$$

Donde:

MR es la razón de humedad

k es la constante de secado

t es el tiempo de secado.

La razón de humedad se define como:

$$MR = \frac{M(t) - M_{ref}}{M_0 - M_{ref}}$$

Donde:

$M(t)$ contenido de humedad del café en el tiempo t

M_0 humedad inicial del café

M_{ref} humedad de referencia del modelo

Para el cálculo de k se emplearon los datos experimentales de la prueba representativa seleccionada. En este caso se tienen los siguientes valores:

$$M_0 = 22.2\%$$

$$M_f = 13.1\%$$

$$M_{ref} = 10\%$$

$$t = 7.7667 \text{ h}$$

Donde M_f corresponde a la humedad final medida al final del periodo de secado considerado.

4.7.8.1 Paso 1 sustitución de la humedad final en la razón de humedad

La razón de humedad al tiempo final se calcula reemplazando el valor de $M(t)$ por la humedad final M_f :

$$MR_f = \frac{M_f - M_{ref}}{M_0 - M_{ref}}$$

Sustituyendo los valores experimentales:

$$MR_f = \frac{13.1 - 10}{22.2 - 10}$$

$$MR_f = \frac{3.1}{12.2}$$

$$MR_f = 0.2541$$

Este resultado indica que, al final del tiempo considerado, la humedad del café representa aproximadamente el 25.41% de la diferencia inicial respecto a la humedad de referencia.

4.7.8.2 Paso 2 sustitución en el modelo de Newton-Lewis

El modelo establece que:

$$MR = e^{-kt}$$

Por lo tanto, para el instante final:

$$0.2541 = e^{-k(7.7667)}$$

4.7.8.3 Paso 3 aplicación de logaritmo natural

Para despejar la constante k , se aplica logaritmo natural a ambos lados de la ecuación:

$$\ln(0.2541) = \ln(e^{-k(7.7667)})$$

$$\ln(0.2541) = -k(7.7667)$$

$$-1.3701 = -7.7667k$$

4.7.8.4 Paso 4 Despeje de la constante de secado

Para despejar k , se divide ambos lados entre -7.7667 :

$$k = \frac{-1.3701}{-7.7667}$$

$$k = 0.1764h^{-1}$$

4.7.8.5 Forma compacta del cálculo

El mismo procedimiento anterior puede expresarse de forma directa mediante la ecuación:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{M_0 - M_{ref}}{M_f - M_{ref}}\right)}{t}$$

Sustituyendo los datos:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{22.2 - 10}{13.1 - 10}\right)}{7.7667}$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{12.2}{3.1}\right)}{7.7667}$$

$$k = \frac{\ln(3.9355)}{7.7667}$$

$$k = \frac{1.3701}{7.7667}$$

$$k = 0.1764 \text{ h}^{-1}$$

Ambas formas de cálculo conducen al mismo resultado.

La constante de secado obtenida representa un parámetro característico del sistema desarrollado y fue utilizada posteriormente para la formulación del modelo ajustado del proceso.

4.7.8.6 Interpretación del valor obtenido

El valor calculado de la constante de secado:

$$k = 0.1764 \text{ h}^{-1}$$

representa la velocidad característica con la que el sistema disminuye la humedad del café bajo las condiciones experimentales analizadas.

Un valor mayor de k indicaría un proceso de secado más rápido, mientras que un valor menor indicaría un secado más lento. En este caso, el valor obtenido refleja una velocidad de secado consistente con las condiciones térmicas reales del sistema y con el comportamiento observado en la curva experimental.

4.7.8.7 *Importancia de este parámetro dentro del modelo*

La constante k constituye el parámetro principal del modelo de Newton–Lewis, ya que permite construir la ecuación matemática completa del proceso de secado y, posteriormente, desarrollar un modelo ajustado del tiempo requerido para alcanzar la humedad objetivo del café.

Una vez determinado este valor, el modelo matemático del proceso puede escribirse como:

$$M(t) = M_{ref} + (M_0 - M_{ref})e^{-kt}$$

y, sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

$$M(t) = 10 + (22.2 - 10)e^{-0.1764t}$$

$$M(t) = 10 + 12.2e^{-0.1764t}$$

Esta ecuación describe la evolución de la humedad del café en función del tiempo para la prueba analizada.

De esta manera, la constante de secado fue obtenida directamente a partir de los datos experimentales reales registrados por el sistema, lo que permite que el modelo matemático represente de forma consistente el comportamiento observado durante el proceso de secado.

4.7.9 *Modelo matemático final del proceso de secado*

Una vez determinada la constante de secado k , se procedió a formular el modelo matemático final que describe la evolución del contenido de humedad del café en función del tiempo.

El modelo de Newton–Lewis se expresa en términos de humedad como:

$$M(t) = M_{ref} + (M_0 - M_{ref})e^{-kt}$$

Este modelo permite describir la evolución del contenido de humedad del café a lo largo del tiempo bajo las condiciones específicas del sistema experimental desarrollado.

Para la prueba representativa analizada, los valores obtenidos experimentalmente fueron:

$$M_{ref} = 10\%$$

$$M_0 = 22.2\%$$

$$k = 0.1764 \text{ h}^{-1}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación general:

$$M(t) = 10 + (22.2 - 10)e^{-0.1764t}$$

$$M(t) = 10 + 12.2e^{-0.1764t}$$

Esta ecuación corresponde al modelo matemático final del proceso de secado para la prueba representativa seleccionada.

4.7.9.1 Interpretación de la ecuación obtenida

La expresión:

$$M(t) = 10 + 12.2e^{-0.1764t}$$

indica que el contenido de humedad del café disminuye de manera exponencial con el tiempo, aproximándose progresivamente al valor de referencia $M_{ref} = 10\%$

En esta ecuación:

- el término 10 representa el valor de referencia hacia el cual tiende el proceso,
- el término 12.2 representa la diferencia inicial entre la humedad del café y la humedad de referencia,
- el exponente $-0.1764t$ describe la rapidez con la que esa diferencia disminuye.

Desde el punto de vista físico, esto significa que al inicio del proceso la reducción de humedad es más rápida, mientras que a medida que el café pierde agua y se aproxima a su condición final, la velocidad de secado disminuye.

4.7.9.2 Verificación del modelo en distintos tiempos

Con el fin de interpretar mejor el comportamiento del modelo, se puede calcular la humedad del café en distintos instantes de tiempo.

Caso 1: para $t = 0$

$$M(0) = 10 + 12.2e^{-0.1764(0)}$$

$$M(0) = 10 + 12.2(1)$$

$$M(0) = 10 + 12.2$$

$$M(0) = 22.2\%$$

Este resultado coincide con la humedad inicial experimental del café, lo cual confirma que el modelo está correctamente formulado.

Caso 2: para $t = 4$ horas

$$M(4) = 10 + 12.2e^{-0.1764(4)}$$

$$M(4) = 10 + 12.2e^{-0.7056}$$

$$M(4) = 10 + 12.2(0.4937)$$

$$M(4) = 10 + 6.0231$$

$$M(4) = 16.02\%$$

Esto indica que, después de 4 horas efectivas de secado, el modelo estima una humedad aproximada del 16.02%.

Caso 3: para $t = 7.767$ horas

$$M(7.7667) = 10 + 12.2e^{-0.1764(7.7667)}$$

$$M(7.7667) = 10 + 12.2e^{-1.3701}$$

$$M(7.7667) = 10 + 12.2(0.2541)$$

$$M(7.7667) = 10 + 3.1000$$

$$M(7.7667) = 13.10\%$$

Este resultado coincide con la humedad final experimental registrada, lo cual confirma que la ecuación reproduce adecuadamente el comportamiento real del proceso para la prueba analizada.

4.7.9.3 Comportamiento del modelo a largo plazo

Si el tiempo de secado continúa aumentando, el término exponencial $e^{-0.1764t}$ tiende progresivamente a cero. Por tanto, la ecuación se aproxima a:

$$M(t) \rightarrow 10\%$$

Esto significa que, desde el punto de vista matemático, el contenido de humedad del café se aproxima asintóticamente a la humedad de referencia del modelo, sin alcanzarla de forma instantánea.

Este comportamiento es consistente con la física del secado, ya que el proceso se vuelve cada vez más lento a medida que el café pierde humedad.

4.7.9.4 Importancia del modelo obtenido

El modelo matemático final permite:

- describir la evolución temporal de la humedad del café,
- estimar el contenido de humedad para distintos tiempos de secado,
- comparar los valores estimados con los datos experimentales,
- y servir como base para el desarrollo del modelo ajustado del tiempo necesario para alcanzar la humedad objetivo.

En este sentido, la ecuación obtenida no solo constituye una representación matemática del proceso, sino también una herramienta de análisis del comportamiento del sistema de secado.

En consecuencia, el modelo:

$$M(t) = 10 + 12.2e^{-0.1764t}$$

representa de manera adecuada la cinética de secado del café para la prueba analizada, ya que conserva coherencia con la tendencia experimental observada y permite describir matemáticamente la disminución del contenido de humedad del producto en función del tiempo.

4.7.10 Modelo matemático del proceso de secado

A partir del modelo matemático obtenido y de la estimación de la constante de secado, se desarrolló un modelo ajustado implementado en Python ver Anexo C, el cual permite simular el comportamiento del proceso de secado del café bajo diferentes condiciones operativas.

El modelo tiene como objetivo principal estimar el tiempo necesario para que el café alcance la humedad objetivo del 12%, a partir de variables como la temperatura del sistema y las condiciones ambientales registradas durante el proceso experimental.

La implementación computacional permite generar curvas de secado simuladas y compararlas con los datos experimentales, facilitando la validación del modelo y el análisis del comportamiento del sistema sin necesidad de realizar nuevas pruebas físicas. De esta manera, el

modelo ajustado no solo describe la cinética de secado, sino que también se convierte en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, permitiendo estimar tiempos de secado, evaluar condiciones de operación y optimizar el funcionamiento del sistema.

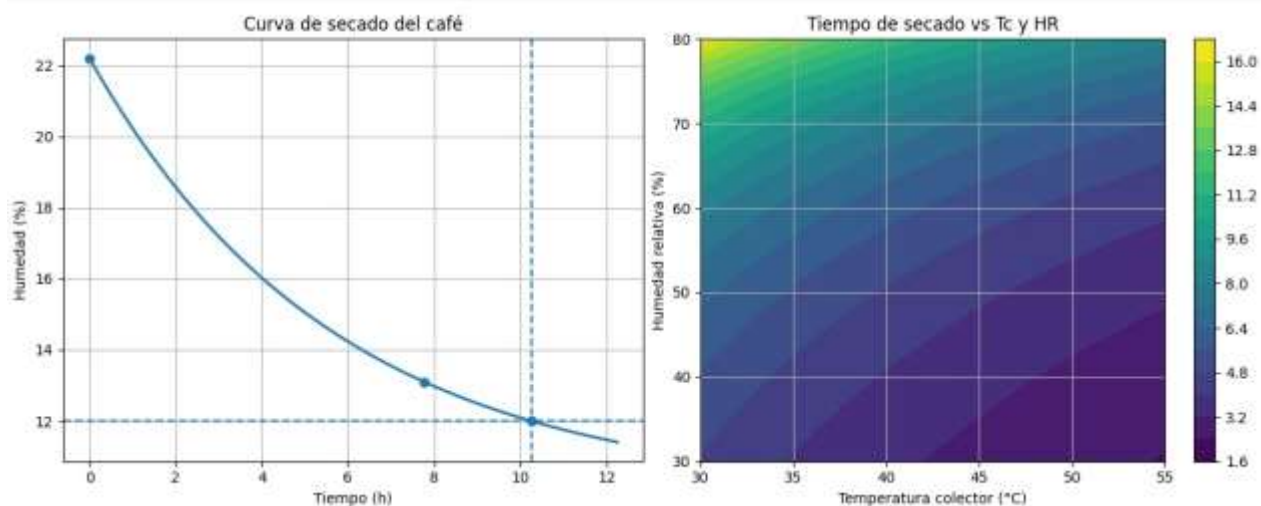


Figura 67. Estimación del contenido de humedad del café en función del tiempo

Con el fin de analizar el comportamiento del proceso de secado bajo diferentes condiciones, se implementó el modelo ajustado mediante herramientas computacionales.

La Figura 98, muestra la simulación de la evolución del contenido de humedad del café en función del tiempo, obtenida a partir del modelo matemático desarrollado. Se observa una disminución progresiva de la humedad con una tendencia exponencial decreciente, consistente con el comportamiento teórico del modelo de Newton–Lewis.

A partir de esta simulación, es posible estimar el tiempo necesario para alcanzar la humedad objetivo del 12%, lo cual permite evaluar el desempeño del sistema sin necesidad de realizar nuevas pruebas experimentales. Este enfoque convierte el modelo en una herramienta útil para la estimación del proceso de secado y la optimización de las condiciones de operación del sistema.

Formulación del tiempo de secado

Una vez validado el modelo matemático del proceso de secado, es posible utilizarlo como una herramienta que se ajusta para estimar el tiempo necesario para alcanzar la humedad objetivo del café.

Partiendo del modelo de Newton–Lewis:

$$M(t) = M_{ref} + (M_0 - M_{ref})e^{-kt}$$

se puede despejar el tiempo t con el fin de determinar cuánto tarda el proceso en alcanzar un valor específico de humedad.

Esta expresión permite estimar directamente el tiempo necesario para que el café alcance la humedad objetivo del 12%, constituyendo una herramienta de gran utilidad para la planificación y control del proceso de secado. De esta manera, el modelo no solo describe el comportamiento del sistema, sino que permite predecir su evolución bajo diferentes condiciones operativas.

4.7.10.1 Despeje de la ecuación para el tiempo

Partiendo de la ecuación:

$$M(t) = M_{ref} + (M_0 - M_{ref})e^{-kt}$$

$$M(t) - M_{ref} = (M_0 - M_{ref})e^{-kt}$$

$$\frac{M(t) - M_{ref}}{M_0 - M_{ref}} = e^{-kt}$$

$$\ln\left(\frac{M(t) - M_{ref}}{M_0 - M_{ref}}\right) = -kt$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{M(t) - M_{ref}}{M_0 - M_{ref}}\right)}{k}$$

4.7.10.2 Aplicación del modelo para la humedad objetivo

Para el caso del proceso de secado del café, el interés principal es determinar el tiempo necesario para alcanzar la humedad objetivo:

$$M_{obj} = 12\%$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{M(t) - M_{ref}}{M_0 - M_{ref}}\right)}{k}$$

4.7.10.3 Sustitución de valores experimentales

Para la prueba representativa:

$$M_0 = 22.2\%$$

$$M_f = 13.1\%$$

$$M_{ref} = 10\%$$

$$k = 0.1764 \text{ h}^{-1}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{M_0 - M_{ref}}{M_{obj} - M_{ref}}\right)}{k}$$

4.7.10.4 Sustitución de valores experimentales

Para la prueba representativa:

$$M_0 = 22.2\%$$

$$M_{obj} = 12\%$$

$$M_{ref} = 10\%$$

$$k = 0.1764 \text{ h}^{-1}$$

Sustituyendo:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{22.2 - 10}{12 - 10}\right)}{0.1764}$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{12.2}{2}\right)}{0.1764}$$

$$t = \frac{\ln(6.1)}{0.1764}$$

$$t = \frac{1.8083}{0.1764}$$

$$t = 10.25 \text{ h}$$

La incorporación de variables reales como temperatura y humedad relativa permite que el modelo ajustado se acerque aún más al comportamiento real del sistema, fortaleciendo su aplicabilidad en escenarios prácticos y su potencial uso en sistemas de control automático del proceso de secado.

4.7.10.5 Interpretación del resultado

El modelo estima que el tiempo necesario para alcanzar una humedad del 12% es aproximadamente:

$$t = 10.25 \text{ horas}$$

Este valor representa el tiempo efectivo de secado bajo las condiciones experimentales analizadas.

Es importante destacar que este tiempo corresponde al comportamiento ideal del modelo, el cual asume condiciones relativamente constantes de operación. En la práctica, el proceso real puede presentar variaciones debido a cambios en la temperatura, la humedad relativa o la radiación solar a lo largo del día.

4.7.11 Validación del modelo matemático

Con el fin de verificar la capacidad del modelo matemático de Newton–Lewis para representar el comportamiento del proceso de secado del café en el sistema experimental desarrollado, se realizó una validación mediante la comparación entre los valores experimentales de humedad y los valores estimados por el modelo.

Para ello, se utilizaron los datos obtenidos durante las pruebas experimentales y se calcularon los valores de humedad correspondientes a diferentes instantes de tiempo empleando la ecuación del modelo matemático definido en el apartado anterior.

A continuación, se presenta la comparación entre los valores experimentales y los valores estimados por el modelo:

Tiempo (h)	Humedad real (%)	Humedad estimada (%)
0.0	33.1	33.1
6.0	21.78	32.01
7.0	21.0	31.83
49.0	24.2	25.45
50.0	23.67	25.32
51.0	22.2	25.19
52.0	22.2	25.06
72.0	20.9	22.71
73.0	20.73	22.6

74.0	17.59	22.49
75.0	14.0	22.39

Tabla 9. Comparación entre la humedad experimental y la humedad estimada por el modelo de Newton-Lewis

La tabla 9 permite observar la relación directa entre los datos experimentales y los valores calculados por el modelo, evidenciando el comportamiento de ambos a lo largo del proceso de secado.

La diferencia entre los valores experimentales y los estimados por el modelo se mantiene dentro de rangos aceptables, lo cual evidencia que el modelo describe adecuadamente la tendencia del proceso. La dispersión observada puede atribuirse a variaciones en las condiciones de operación durante los ensayos.

Con base en estos datos, se construyó la siguiente representación gráfica:

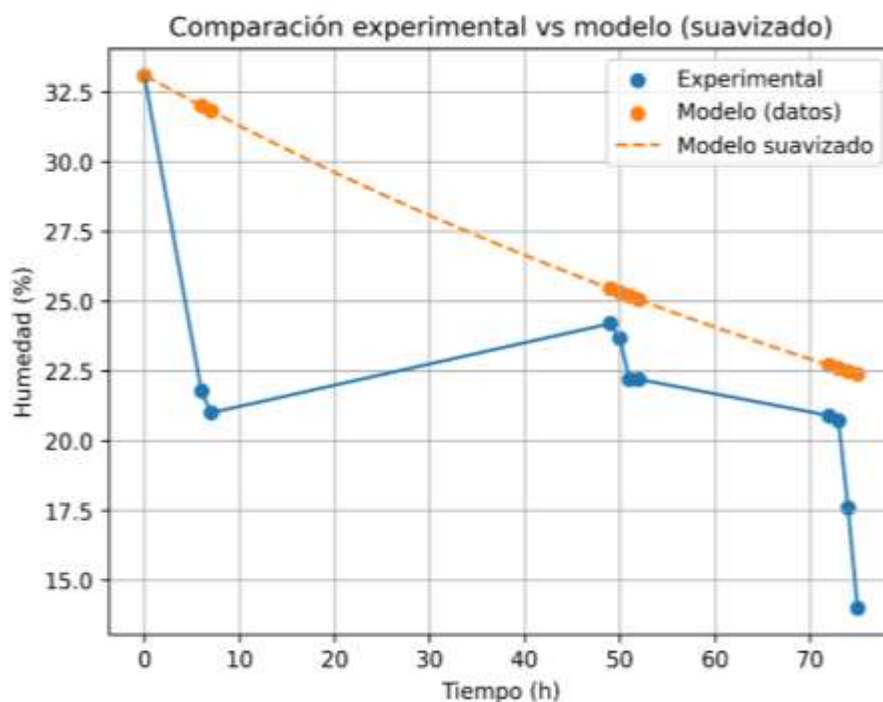


Figura 68. Comparación entre la curva experimental y la curva estimada por el modelo matemático

En la figura 99, se presenta la evolución del contenido de humedad del café en función del tiempo, comparando los datos experimentales obtenidos durante las pruebas con los valores estimados mediante el modelo matemático de Newton-Lewis.

A partir de la comparación visual entre ambas curvas, se observa que el modelo reproduce de manera general la tendencia decreciente del contenido de humedad a lo largo del proceso de secado. La curva del modelo presenta un comportamiento suavizado de tipo exponencial, característico de la formulación de Newton–Lewis, mientras que los datos experimentales muestran variaciones más pronunciadas asociadas a las condiciones reales del sistema.

En particular, se evidencian diferencias notables en los primeros instantes del proceso, donde la humedad experimental presenta una caída más abrupta que la estimada por el modelo. Asimismo, en la etapa final del secado se observan desviaciones entre ambas curvas, donde los valores experimentales disminuyen más rápidamente en comparación con la tendencia suavizada del modelo.

Estas discrepancias pueden atribuirse a la naturaleza simplificada del modelo matemático, el cual no considera efectos transitorios iniciales, variaciones en las condiciones de operación ni cambios en los mecanismos de transferencia de masa a lo largo del proceso. Por el contrario, el modelo asume un comportamiento continuo y uniforme del secado.

A pesar de estas diferencias, el modelo presenta una aproximación adecuada al comportamiento global del proceso, logrando representar la tendencia general de disminución del contenido de humedad en función del tiempo. Esto permite considerar al modelo como una herramienta útil para describir de manera aproximada la cinética de secado del café en el sistema estudiado.

Con el propósito de cuantificar de manera más precisa el grado de ajuste del modelo, en el siguiente apartado se realizó el cálculo del error relativo promedio y la determinación de la eficacia del modelo a partir de los datos experimentales.

Es importante señalar que el modelo matemático fue ajustado utilizando los datos experimentales obtenidos durante las pruebas, por lo que su alcance se limita a describir el comportamiento del sistema bajo las condiciones evaluadas. En este sentido, el modelo no constituye una herramienta ajustada general, sino una representación del comportamiento observado en el sistema experimental.

4.8 Evaluación del modelo y análisis del error

Una vez desarrollado el modelo matemático del proceso de secado del café y realizada su validación cualitativa mediante la comparación entre los datos experimentales y los valores estimados, se procede a evaluar cuantitativamente su desempeño.

En este apartado se analiza el grado de ajuste del modelo mediante el cálculo del error relativo porcentual promedio, así como la determinación de la eficacia del modelo, con el fin de establecer su capacidad para representar el comportamiento real del sistema de secado.

4.8.1 Cálculo del error del modelo

Para evaluar la precisión del modelo matemático, se utilizó el error porcentual absoluto medio (MAPE), el cual permite cuantificar la diferencia entre los valores experimentales y los valores estimados por el modelo.

El error porcentual para cada punto se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Error(\%) = \left| \frac{M_{exp} - M_{mod}}{M_{exp}} \right| \times 100$$

Donde:

M_{exp} : humedad experimental (%)

M_{mod} : humedad estimada por el modelo (%)

A partir de esta expresión, se calcularon los errores porcentuales para cada uno de los datos considerados en la validación del modelo.

Tiempo (h)	Humedad real (%)	Humedad ajustada (%)	Error (%)
0.0	33.1	33.1	0.0
6.0	21.78	32.01	46.96

7.0	21.0	31.83	51.57
49.0	24.2	25.45	5.17
50.0	23.67	25.32	6.97
51.0	22.2	25.19	13.47
52.0	22.2	25.06	12.88
72.0	20.9	22.71	8.66
73.0	20.73	22.6	9.02
74.0	17.59	22.49	27.85
75.0	14.0	22.39	59.93

Tabla 10. Error porcentual entre valores experimentales y valores estimados por el modelo

El error promedio del modelo se determina como:

$$Error_{prom} = \frac{\sum Error_i}{n}$$

$$Error_{prom} = \frac{242.48}{11}$$

$$Error_{prom} = 22.05\%$$

Este valor indica que, en promedio, el modelo presenta una desviación del 22.05% respecto a los datos experimentales.

Se observa que los errores más elevados se presentan principalmente en los primeros y últimos instantes del proceso de secado, lo cual coincide con el análisis cualitativo realizado previamente. Esto se debe a que el modelo de Newton–Lewis asume un comportamiento exponencial uniforme, mientras que el sistema real presenta variaciones asociadas a condiciones transitorias y cambios en los mecanismos de transferencia de masa.

4.8.2 *Determinación de la eficacia del modelo*

La eficacia del modelo se define como una medida complementaria que permite expresar el grado de ajuste del modelo en términos porcentuales, indicando qué tan bien representa el comportamiento del sistema real.

La eficacia se calcula mediante:

$$Eficacia(\%) = 100 - Error_{prom}$$

Sustituyendo el valor obtenido:

$$Eficacia = 100 - 22.05$$

$$Eficacia = 77.95\%$$

Este resultado indica que el modelo matemático de Newton–Lewis logra representar aproximadamente el 77.95% del comportamiento del proceso real de secado del café en el sistema experimental desarrollado.

En términos prácticos, este nivel de eficacia puede considerarse adecuado para modelos de tipo semiempírico aplicados a procesos de secado, donde existen múltiples variables que influyen en el comportamiento del sistema, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, el flujo de aire y las condiciones internas del producto.

La eficacia del modelo se evaluó considerando no solo la aproximación a la humedad final objetivo, sino también la concordancia de la tendencia de la curva de secado con los datos experimentales obtenidos durante las pruebas.

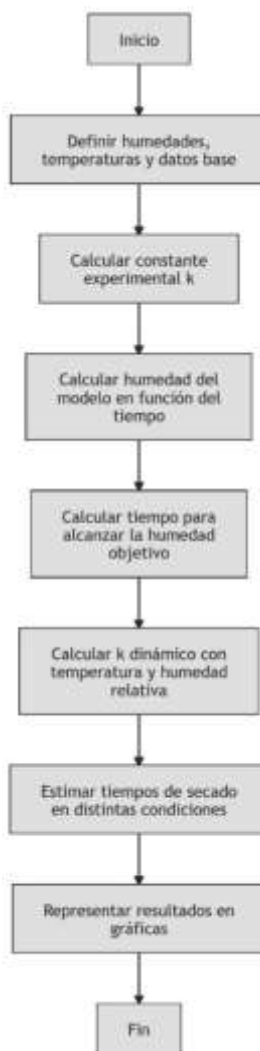


Figura 69. Diagrama de flujo modelo ajustado

5. Análisis de resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas al sistema de secado de café basado en un tambor rotatorio acoplado a un colector solar y energizado mediante paneles fotovoltaicos. El objetivo principal de este análisis es determinar la efectividad del sistema propuesto a partir del comportamiento de variables como el tiempo de secado, la reducción del contenido de humedad, el consumo energético y el nivel de control del proceso.

El análisis se fundamenta en la comparación del desempeño del prototipo con métodos tradicionales de secado ampliamente utilizados en la caficultura, específicamente el secado en patio y el secado mecánico a gas. Esta comparación se realiza bajo criterios de ingeniería, considerando tanto aspectos energéticos como operativos, con el fin de establecer el alcance real del sistema desarrollado y su viabilidad como alternativa tecnológica.

5.2 Métodos tradicionales de secado de café

5.2.1 *Secado en patio*

El secado en patio corresponde al método tradicional de secado al sol, en el cual el café pergamino húmedo se extiende sobre superficies expuestas a la radiación solar, como patios de cemento, carros secadores, elbas o marquesinas [14]. Este método se caracteriza por su bajo costo energético, ya que la fuente principal de calor es la radiación solar.

Según la Federación Nacional de Cafeteros, el tiempo requerido para secar el café mediante este método se encuentra entre 7 y 15 días, dependiendo de las condiciones climáticas, especialmente la radiación solar y la humedad relativa del ambiente [14]. Durante el proceso, el café debe ser removido constantemente para evitar la formación de zonas con diferente contenido de humedad.

Desde el punto de vista físico, el secado en patio se basa en la transferencia de calor por radiación y en la convección natural del aire ambiente. Sin embargo, la ausencia de control sobre

estas variables genera una alta dependencia del clima, lo que afecta tanto la velocidad de secado como la uniformidad del producto final [14], [15].

5.2.2 *Secado mecánico a gas*

El secado mecánico a gas es un proceso tecnificado en el cual el aire es calentado mediante la combustión de gas y posteriormente impulsado a través del café mediante ventilación forzada.

Desde el punto de vista de la ingeniería, este método se basa en la transferencia de calor por convección forzada, lo que incrementa significativamente la velocidad de evaporación del agua contenida en el grano [3], [4].

El sistema típicamente está compuesto por una cámara de combustión, un intercambiador de calor, un ventilador y una cámara de secado. El aire caliente puede alcanzar temperaturas entre 40 °C y 60 °C, permitiendo acelerar el proceso de secado [14].

Según la Federación Nacional de Cafeteros, este método puede requerir entre 25 y 30 horas y consumir aproximadamente 2,5 libras de gas propano por arroba (@) de café pergamino seco [14].

5.3 Resultados del sistema de secado propuesto

Las pruebas experimentales realizadas al sistema de tambor rotatorio mostraron un comportamiento consistente en la reducción del contenido de humedad del café. En promedio, la humedad inicial del producto fue de aproximadamente 32,43 %, mientras que la humedad final alcanzada fue cercana al 12,05 %, valor adecuado para almacenamiento.

El tiempo promedio de secado fue de 24,5 horas, con variaciones mínimas entre las pruebas. Durante el proceso, la temperatura interna del tambor se mantuvo en un rango aproximado entre 22,75 °C y 29,10 °C, lo cual indica que el sistema operó bajo condiciones térmicas moderadas.

A pesar de estas temperaturas relativamente bajas, el sistema logró una reducción significativa del contenido de humedad, lo que sugiere que la combinación de ventilación forzada, agitación del grano y aporte solar permitió un proceso de secado eficiente.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema cumple con los requerimientos del proceso de secado, logrando reducir el contenido de humedad del café hasta niveles adecuados para almacenamiento. En este sentido, el sistema demuestra una alta eficacia en el cumplimiento del objetivo principal del proceso.

5.4 Análisis de los cálculos del proceso

5.4.1 Velocidad de secado

La velocidad de secado representa la rapidez con la cual el producto reduce su contenido de humedad a lo largo del tiempo. En forma simplificada, puede expresarse como:

$$V = \frac{M_i - M_f}{t}$$

Donde:

- V : velocidad media de secado (%/h)
- M_i : humedad inicial del café (%)
- M_f : humedad final del café (%)
- t : tiempo total de secado (h)

Esta expresión no pretende describir toda la cinética instantánea del proceso, sino ofrecer un indicador comparativo promedio entre métodos.

a. Velocidad de secado del sistema propuesto

A partir de las cuatro pruebas experimentales del presente trabajo, como se presentó en el Capítulo 4, se obtienen los promedios:

$$M_i = \frac{32.6 + 33.1 + 31.8 + 32.2}{4} = 32.43\%$$

$$M_f = \frac{12.1 + 12 + 11.8 + 12.3}{4} = 12.05\%$$

$$t = \frac{25.02 + 24.98 + 23.80 + 24.20}{4} = 24.50 \text{ h}$$

Entonces:

$$V_{tambor} = \frac{32.43 - 12.05}{24.50} = 0.832\%/h$$

Esto significa que, en promedio, el sistema propuesto eliminó 0,832 puntos porcentuales de humedad por hora.

El valor promedio de la velocidad de secado obtenido se encuentra dentro de un rango consistente entre los diferentes ensayos, lo que indica una estabilidad en el desempeño del sistema bajo condiciones similares de operación.

b. Velocidad de secado en patio

Usando el mismo descenso de humedad como base comparativa y el rango real de tiempo reportado por la Federación Nacional de Cafeteros de 7 a 15 días [14], se obtiene:

$$V_{patio,max} = \frac{20.38}{168} = 0.121\%/h$$

$$V_{patio,max} = \frac{20.38}{360} = 0.057\%/h$$

Por lo tanto, la velocidad media de secado en patio queda en el rango:

$$V_{patio} = 0.057 \text{ a } 0.121\%/h$$

c. Velocidad de secado a gas

La cartilla de la Federación reporta que el secado mecánico en silos demora normalmente entre 25 y 30 horas [14]. Si se usa el mismo descenso de humedad para comparación general:

$$V_{gas,max} = \frac{20.38}{25} = 0.815\%/h$$

$$V_{gas,min} = \frac{20.38}{30} = 0.679\%/h$$

Por tanto:

$$V_{gas} = 0.679 \text{ a } 0.815\%/h$$

Interpretación de la velocidad de secado

Estos resultados muestran tres comportamientos claramente diferenciados. El secado en patio presenta la menor velocidad, debido a su dependencia del clima y a la ausencia de control sobre el aire de secado [14]. El secado a gas presenta una velocidad alta porque trabaja con aire caliente forzado y controlado [3], [4], [14]. El tambor rotatorio propuesto alcanza una velocidad media de secado del mismo orden del secado a gas, aun cuando sus temperaturas internas promedio fueron más bajas, lo cual sugiere que la combinación entre agitación del grano, flujo de aire y aporte solar logró compensar parcialmente la menor temperatura interna, como se evidenció en los resultados experimentales del presente trabajo.

5.4.2 Energía consumida en cada método

Para comparar el aspecto energético, es necesario distinguir entre energía externa comercial y energía natural disponible. En el secado en patio y en el sistema propuesto, la radiación solar aporta energía térmica al proceso, pero no representa consumo comprado de combustible. En cambio, en el secado a gas sí existe un consumo directo de combustible fósil [14], [15].

a. Energía externa en secado en patio

En el secado en patio, la energía térmica proviene principalmente del sol y del aire ambiente. Por ello, el consumo de energía comercial externa para calentamiento puede considerarse:

$$E_{patio} \approx 0 \text{ kWh}$$

Esto no significa que el proceso no use energía física, sino que no requiere compra de combustible o electricidad para producir calor. Su costo energético se reemplaza por mayor tiempo de secado, mayor área y mayor mano de obra [14].

b. Energía consumida en secado mecánico a gas

La cartilla de la Federación reporta un consumo de 2,5 libras de gas propano por arroba de café pergamino seco, operando el silo a máxima capacidad [14].

Primero se convierte el consumo a kilogramos:

$$2.5 \text{ lb} = 2.5 \times 0.4536 = 1.134 \text{ kg de GLP/@}$$

Cenicafé usa la equivalencia de 7,5 arrobas = 93,8 kg de café pergamino seco, es decir, aproximadamente 1 arroba = 12,5 kg de café pergamino seco [15].

Entonces, el consumo específico de GLP es:

$$\frac{1.134 \text{ kg GLP}}{12.5 \text{ kg c.p.s}} = 0.0907 \text{ kg} \frac{\text{GLP}}{\text{kg}} \text{ c.p.s}$$

Para una carga comparable de 6 kg de café pergamino seco equivalente:

$$m_{GLP} = 0.0907 \times 6 = 0.544 \text{ kg}$$

Cenicafé reporta para el GLP un poder calorífico de aproximadamente 46,35 MJ/kg [15].

La energía consumida sería:

$$E_{gas} = m_{GLP} \times PCI$$

$$E_{gas} = 0.544 \times 46.35 = 25.23 \text{ MJ}$$

Ahora se convierte a kWh:

$$E_{gas} = 25.23 \times 0.2778 = 7.01kWh$$

Por tanto, para una carga equivalente de 6 kg, el secado a gas requeriría aproximadamente:

$$E_{gas} = 7.01kWh$$

c. Energía consumida en el sistema propuesto

Tomando la potencia promedio del sistema estimada previamente en 27,67 W y el tiempo promedio experimental de 24,5 h, la energía consumida por ventilación, accionamiento y monitoreo es:

$$E_{tambor} = P \times t$$

$$E_{tambor} = 0.02767 \times 24.5 = 0.678kWh$$

En este caso, la energía térmica principal provino del colector solar y la energía eléctrica fue suministrada por el sistema fotovoltaico, por lo que el consumo comercial externo efectivo del prototipo fue prácticamente nulo durante la operación experimental, como se mostró en el Capítulo 4.

Método	Base de calculo	Energía externa aproximada
Secado en patio	Radiación solar y aire ambiente	0 kWh
Secado a gas	2.5 lb GLP/@ cps → 6kg comparables	7.01kWh
Tambor rotatorio solar	27.67 W durante 24.5h	0.678kWh

Tabla 11. Comparativa de energía externa

Análisis comparativo de energía

La tabla 11 muestra que los tres métodos tienen naturalezas energéticas muy distintas. El secado en patio no requiere compra de energía para calentamiento, pero paga esa ventaja con tiempos mucho mayores y baja estabilidad operativa [14]. El secado a gas reduce el tiempo, pero lo hace a costa de un consumo importante de combustible fósil [14], [15]. El tambor rotatorio propuesto ocupa una posición intermedia muy favorable: mantiene tiempos próximos al secado mecánico, pero con un requerimiento eléctrico muy inferior y con fuente térmica renovable [15]. En otras palabras, el prototipo no compite con el secado en patio por ser más barato energéticamente, sino por secar mucho más rápido; y no compite con el gas por ser más rápido, sino por lograr un tiempo semejante con menor dependencia de energía fósil.

Interpretación energética

Desde una perspectiva de ingeniería, el dato más importante no es solo el valor absoluto en kWh, sino la calidad de la energía utilizada. En el secado a gas, la mayor parte del aporte depende de combustión fósil y genera emisiones que pueden influir en la calidad del café [14], [15]. En el patio, la energía es renovable pero el proceso es lento e inestable y también está expuesto a agentes externos [14]. En el prototipo desarrollado, el calor proviene del sol y el apoyo eléctrico es bajo; por eso, el sistema ofrece una relación favorable entre rapidez del proceso, bajo requerimiento energético comercial y sostenibilidad operativa [15].

Desde el punto de vista energético, el sistema presenta un comportamiento eficiente, ya que el uso del colector solar permite aprovechar la radiación solar como fuente térmica principal, reduciendo el consumo de energía externa en comparación con el secado mecánico a gas.

5.5 Comparación entre métodos de secado

5.5.1 *Tiempo de secado*

Con base en las fuentes técnicas consultadas y en los datos reales del presente trabajo, los tiempos de secado pueden resumirse así:

Método	Tiempo reportado
Secado en patio / secado al sol	7 a 15 días (168 a 360 h)
Secado mecánico a gas en silos	25 a 30 h
Tambor rotatorio solar (presente trabajo)	23,8 a 25,02 h

Tabla 12. Comparativa de tiempo de secado

La literatura técnica reporta para el secado al sol rangos del orden de varios días, mientras que para secado mecánico se reportan tiempos del orden de 25 a 30 horas [14]. En el presente trabajo, las cuatro pruebas del sistema propuesto arrojaron tiempos entre 23,8 h y 25,02 h, con un promedio de 24,5 h, como se presentó en el Capítulo 4.

Análisis del tiempo de secado

Esta comparación permite observar que el tambor rotatorio solar se distancia claramente del secado en patio y se aproxima mucho más al secado mecánico a gas. Esa es una conclusión importante, porque el sistema no debe presentarse como un secador solar lento equivalente a los métodos tradicionales al sol, sino como una tecnología que, aun con temperaturas internas moderadas, logró reducir el tiempo de secado hasta un rango semejante al de los sistemas mecánicos [14], [15].

5.5.2 Consumo energético

La comparación energética ya calculada puede resumirse así:

Método	Energía externa
Secado en patio	0 kWh
Secado a gas	7.01kWh
Tambor rotatorio solar	0.678kWh

Tabla 13. Comparación energética

Análisis del consumo energético

El secado en patio tiene un consumo comercial externo prácticamente nulo, pero su gran desventaja es el tiempo prolongado y la poca capacidad de control [14]. El secado a gas resuelve ese problema acelerando el proceso, pero introduce el mayor costo energético directo [14], [15]. El tambor rotatorio propuesto muestra un comportamiento muy favorable: aunque no iguala el costo externo cero del patio, sí reduce drásticamente el requerimiento energético frente al gas, y al mismo tiempo acorta el tiempo de secado hasta un nivel similar al mecánico [15].

5.5.3 Control del proceso

Parámetro de control	Patio	Gas	Tambor rotatorio solar
Control de temperatura	No	Si	Parcial
Control del flujo de aire	No	Si	Si
Seguimiento de humedad/variables	Manual	Depende del modelo	Si
Dependencia del clima	Alta	Baja	Media
Automatización	No	Limitada/Industrial	Si, a escala prototipo

Tabla 14. Datos de los sistemas de secado

El secado en patio depende casi totalmente del operario y de las condiciones ambientales [14]. En el secado a gas existe un mayor dominio de la temperatura del aire y del flujo [14], [15]. En el tambor propuesto, aunque la temperatura no se mantuvo en un valor elevado constante como en un secador mecánico convencional, sí hubo monitoreo continuo de variables, control del flujo de aire y un mecanismo mecánico de movimiento del producto, como se describió en el Capítulo 4. Esto le da al prototipo una ventaja clara frente al patio y una ventaja tecnológica parcial frente al gas convencional.

5.5.4 Uniformidad del secado

La uniformidad del secado no depende solo del tiempo total, sino de cómo se distribuyen el calor y la humedad dentro de la masa de café. En el secado en patio, la uniformidad depende del espesor de la capa, de la frecuencia con que se revuelve el café y de la exposición real a la radiación solar; por eso la literatura insiste en revolver el producto varias veces al día para obtener una humedad final más uniforme [14], [15].

En el secado mecánico a gas, la uniformidad mejora porque el aire caliente atraviesa la masa de café con un patrón más definido. Los sistemas tecnificados pueden emplear inversión del flujo, varias cámaras o mecanismos de agitación para reducir gradientes internos de humedad [14], [15].

En el tambor rotatorio propuesto, la uniformidad se favorece por un mecanismo adicional: el movimiento permanente del grano. El movimiento del tambor hace que el café cambie continuamente de posición, lo que reduce zonas fijas de mayor o menor exposición al aire y ayuda a disminuir gradientes locales de humedad. Por eso, aunque el sistema trabajó con temperaturas promedio internas relativamente bajas, logró obtener humedades finales muy cercanas entre pruebas, alrededor del 12 %, como se evidenció en el Capítulo 4. Esto sugiere una uniformidad de secado favorable para la escala del prototipo.

A partir de esta comparación, se observa que el sistema propuesto presenta una mayor eficacia que el secado en patio en términos de reducción del tiempo de secado, y una mayor eficiencia energética en comparación con el secado a gas. Esta combinación de características permite analizar el desempeño global del sistema desde una perspectiva de efectividad.

Al contrastar los resultados obtenidos con los reportados en estudios previos, se evidencian diferencias significativas en el comportamiento del proceso de secado, las cuales pueden explicarse a partir de las características propias del sistema desarrollado en este trabajo.

En comparación con sistemas de secado solar convencionales o estáticos, como los reportados en [10], el prototipo propuesto presenta una mejora en la uniformidad del secado. Esto se debe principalmente a la incorporación del tambor rotatorio, el cual genera un movimiento continuo del grano, favoreciendo una distribución homogénea del calor y reduciendo los gradientes de humedad dentro del material. En sistemas sin agitación, es común encontrar zonas con diferente contenido de humedad, lo cual afecta la calidad final del producto.

Asimismo, frente a sistemas con ventilación forzada, pero sin control dinámico, como el descrito en [11], el sistema desarrollado en este trabajo presenta una ventaja en la estabilidad del proceso. Esto se debe a la implementación de un control electrónico del flujo de aire mediante modulación PWM, el cual permite ajustar las condiciones internas en función de la temperatura, mejorando la eficiencia de la transferencia de calor y masa [1].

Por otra parte, en comparación con secadores híbridos que emplean fuentes adicionales de energía como biomasa [12], el sistema propuesto presenta una mayor sostenibilidad energética, al utilizar energía solar como fuente térmica principal y un sistema fotovoltaico para la alimentación eléctrica. Aunque estos sistemas híbridos pueden ofrecer mayor estabilidad térmica, implican un mayor consumo energético y mayores costos operativos, lo cual representa una limitación frente a soluciones basadas completamente en energías renovables.

En términos de tiempo de secado, los resultados obtenidos muestran un comportamiento competitivo frente a sistemas mecánicos a gas. Mientras que el secado en patio puede requerir entre 168 y 360 horas [14], y el secado mecánico a gas presenta tiempos considerablemente menores, el sistema propuesto logra completar el proceso en aproximadamente 24,5 horas, manteniendo velocidades de secado dentro de rangos similares a los sistemas mecánicos, pero con un consumo energético significativamente menor [15]. Esto indica que el sistema propuesto logra un equilibrio entre eficiencia energética y desempeño operativo.

En conjunto, estas diferencias evidencian que la mejora en el desempeño del sistema no se debe a un único factor, sino a la integración de múltiples elementos: el aprovechamiento de la energía solar, la incorporación del tambor rotatorio y la implementación de instrumentación electrónica con control del proceso. Esta integración permite optimizar simultáneamente la transferencia de calor, la transferencia de masa y la uniformidad del secado, lo cual explica el comportamiento observado en los resultados experimentales.

5.6 Determinación de la efectividad del sistema

La determinación de la efectividad del sistema de secado se realizó considerando de manera conjunta la eficacia del proceso y la eficiencia energética del sistema, con el fin de evaluar su desempeño global frente a métodos tradicionales de secado. La eficacia se entiende como la capacidad del sistema para cumplir el objetivo del proceso, mientras que la eficiencia hace referencia al uso adecuado de los recursos energéticos [1], [3].

En términos de eficacia, el sistema demostró ser capaz de reducir el contenido de humedad del café desde valores iniciales hasta niveles cercanos al 12 %, adecuados para almacenamiento seguro [2]. Asimismo, el tiempo de secado obtenido es significativamente menor en comparación con el método tradicional en patio, lo que evidencia el cumplimiento del objetivo principal del proceso.

En cuanto a la eficiencia, el sistema presenta un menor consumo de energía externa en comparación con el secado mecánico a gas, debido al aprovechamiento de la energía solar como fuente térmica principal y al uso del sistema fotovoltaico para la alimentación de los componentes electrónicos. Este comportamiento refleja un uso más racional de los recursos energéticos y una reducción en los costos operativos asociados al proceso.

Por lo tanto, el sistema desarrollado puede considerarse efectivo, ya que no solo cumple con los objetivos del proceso de secado (eficacia), sino que además optimiza el uso de los recursos energéticos (eficiencia), logrando un desempeño superior en comparación con los métodos tradicionales evaluados y posicionándose como una alternativa viable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

5.6.1 Evaluación de la eficacia del sistema

La eficacia del sistema se evaluó en función de su capacidad para cumplir el objetivo principal del proceso de secado, es decir, reducir el contenido de humedad del café hasta un valor cercano al 12 %, nivel técnicamente adecuado para su almacenamiento y conservación. En este contexto, la eficacia se entendió como el grado de cumplimiento del objetivo de secado, independientemente del consumo energético asociado, ya que este último corresponde al análisis de eficiencia.

Bajo este criterio, el indicador de eficacia se definió a partir de la fracción de humedad efectivamente removida por el sistema con respecto a la humedad que debía removerse para alcanzar la meta establecida. De esta manera, si el sistema logra llevar el producto exactamente hasta la humedad objetivo, la eficacia toma un valor cercano al 100 %. En cambio, si la humedad final obtenida permanece alejada de dicha meta, el valor del indicador disminuye proporcionalmente.

Por lo anterior, la eficacia se calculó mediante la siguiente expresión:

$$Eficacia = \frac{M_i - M_f}{M_i - M_{objetivo}} \times 100$$

donde M_i corresponde a la humedad inicial (%), M_f a la humedad final (%) y $M_{objetivo}$ al valor de humedad deseado.

Esta expresión permite comparar la reducción real de humedad alcanzada por el sistema frente a la reducción de humedad requerida para cumplir completamente el objetivo del proceso. Por tanto, constituye un indicador adecuado para valorar qué tan cerca estuvo el sistema de alcanzar la condición final esperada de secado.

Sustituyendo los valores promedio obtenidos experimentalmente:

$$Eficacia = \frac{32.43 - 12.05}{32.43 - 12} \times 100 = 99.75\%$$

El resultado obtenido indica que el sistema removió prácticamente la totalidad de la humedad necesaria para alcanzar la condición objetivo, evidenciando una alta capacidad para cumplir con el propósito del proceso de secado. En consecuencia, el sistema desarrollado puede considerarse altamente eficaz desde el punto de vista técnico.

Adicionalmente, este resultado es coherente con el comportamiento observado en las pruebas experimentales, en las cuales se evidenció una disminución progresiva y uniforme del contenido de humedad del grano. Esto sugiere que el sistema no solo alcanzó una humedad final cercana al valor objetivo, sino que lo hizo manteniendo estabilidad en el proceso y una adecuada distribución del calor dentro del tambor rotatorio.

Es importante señalar que este indicador de eficacia se centra exclusivamente en el cumplimiento del objetivo de secado en términos de humedad final. Por ello, su interpretación se complementó con el análisis del tiempo de secado, el consumo energético y el comportamiento general del proceso, con el fin de realizar una valoración integral del desempeño del sistema.

Una vez determinada la eficacia del sistema en términos de cumplimiento del objetivo de humedad, se complementó el análisis con indicadores comparativos de tiempo de secado y requerimiento energético, con el fin de establecer la efectividad global del sistema frente a métodos convencionales.

a. Efectividad frente al secado en patio

Tomando el promedio experimental del prototipo de 24,5 h y comparándolo con el rango del secado en patio de 168 a 360 h [14], puede calcularse la reducción relativa del tiempo:

$$E_{patio,min} = \frac{168 - 24.5}{168} \times 100 = 85.4\%$$

$$E_{patio,max} = \frac{360 - 24.5}{360} \times 100 = 93.2\%$$

Esto significa que, en términos de tiempo, el tambor rotatorio reduce el proceso entre 85,4 % y 93,2 % frente al secado en patio [14].

b. Efectividad energética frente al secado a gas

Tomando la energía de secado a gas de 7,01 kWh y la energía eléctrica del prototipo de 0,678 kWh, la reducción relativa del requerimiento energético es:

$$E_{energ} = \frac{7.01 - 0.678}{7.01} \times 100 = 90.3\%$$

Es decir, para una carga equivalente de 6 kg, el sistema propuesto reduce en aproximadamente 90,3 % el requerimiento de energía externa frente al secado mecánico a gas [15].

Análisis de la efectividad

El resultado más importante es que el sistema propuesto no sobresale por una sola variable, sino por el equilibrio entre varias.

Frente al secado en patio, su principal fortaleza es la reducción extrema del tiempo de secado, así como la mejora en el control del proceso, al incorporar ventilación forzada e instrumentación que disminuyen la dependencia de las condiciones climáticas [14].

Frente al secado a gas, su principal ventaja radica en la reducción del consumo energético externo, manteniendo tiempos de secado comparables y una velocidad de secado del mismo orden, lo que evidencia un desempeño competitivo [15].

Adicionalmente, el sistema presenta mejoras en la uniformidad del secado gracias al movimiento rotatorio del tambor, el cual favorece una distribución homogénea de la humedad en el producto final.

En conjunto, estos resultados demuestran que el sistema presenta un alto nivel de efectividad, al optimizar tanto el tiempo de secado como el consumo energético, sin comprometer la calidad del proceso.

Determinación de la efectividad global

Considerando que el sistema cumple con el objetivo del proceso (alta eficacia $\approx 99,75\%$) y optimiza significativamente los recursos utilizados (alta eficiencia operativa y energética), se concluye que el sistema de secado basado en tambor rotatorio, colector solar y energía fotovoltaica presenta una alta efectividad técnica.

Este desempeño demuestra que el sistema constituye una alternativa viable, eficiente y sostenible frente a los métodos tradicionales de secado de café, al lograr un equilibrio entre rapidez, bajo consumo energético y calidad del producto final.

5.7 Limitaciones del estudio

Las limitaciones del estudio deben analizarse a partir de la forma en que realmente se ejecutó la investigación. En primer lugar, el prototipo fue evaluado a escala de laboratorio y con una carga aproximada de 6 kg de café pergamino húmedo por ensayo, por lo cual los resultados no deben extrapolarse automáticamente a escalas comerciales o industriales sin validación adicional.

En segundo lugar, aunque el sistema integró colector solar, tambor, ventilación, monitoreo y alimentación fotovoltaica, las condiciones térmicas internas reales del secado no alcanzaron de forma sostenida los rangos teóricos inicialmente esperados para sistemas de secado convectivo. En las pruebas integradas, la temperatura promedio del tambor se mantuvo

aproximadamente entre 22,75 °C y 29,10 °C, lo cual indica que la efectividad alcanzada se dio bajo un régimen térmico moderado.

En tercer lugar, las comparaciones con patio y gas se realizaron en términos técnicos generales, apoyadas en literatura especializada [14], [15] y no bajo ensayos paralelos ejecutados exactamente en las mismas condiciones ambientales, de carga y de humedad inicial. Por ello, los resultados del capítulo deben interpretarse como una comparación fundamentada de desempeño, no como una igualdad experimental estricta entre métodos.

Finalmente, el número de pruebas del sistema propuesto fue de cuatro ensayos, suficiente para observar tendencias consistentes, pero todavía limitado para construir una caracterización estadística más robusta frente a variaciones climáticas, diferentes masas de carga o distintos tipos de café.

Adicionalmente, el modelo matemático empleado fue ajustado a partir de los datos experimentales obtenidos en estas pruebas, por lo que su validez se limita a las condiciones evaluadas. En este sentido, el modelo describe el comportamiento observado del sistema, pero no permite generalizar su aplicación a condiciones diferentes sin un proceso adicional de validación experimental.

5.8 Conclusión del análisis

El análisis comparativo desarrollado permite concluir que el sistema de secado de café basado en tambor rotatorio, colector solar y alimentación fotovoltaica presenta una efectividad técnica alta frente a los métodos tradicionales de secado considerados.

Esta efectividad se fundamenta en la combinación de la eficacia del sistema, entendida como su capacidad para alcanzar el contenido de humedad objetivo del café, y la eficiencia, entendida como la optimización del uso de los recursos energéticos del sistema, así como la mejora en el desempeño operativo del proceso en términos de tiempo de secado.

Frente al secado en patio, el prototipo mostró una mejora contundente en tiempo de proceso, al reducir el secado desde rangos de 168 a 360 horas hasta un promedio de 24,5 horas, lo que representa una reducción aproximada entre 85,4 % y 93,2 % [14].

Frente al secado mecánico a gas, el resultado más relevante fue energético. Mientras un secado equivalente con GLP requeriría aproximadamente 7,01 kWh para una carga comparable de 6 kg, el sistema propuesto necesitó alrededor de 0,678 kWh de apoyo eléctrico, con fuente

térmica solar. Esto implica una reducción del requerimiento de energía externa cercana al 90,3 %, manteniendo tiempos de secado del mismo orden que los reportados para sistemas mecánicos [15].

Además, el sistema propuesto mostró una ventaja adicional en términos de uniformidad y control. El movimiento continuo del café en el tambor, junto con la ventilación forzada y el monitoreo electrónico, permitió alcanzar humedades finales cercanas al 12 % en todas las pruebas, evidenciando así su eficacia y un comportamiento consistente entre ensayos, como se mostró en el Capítulo 4.

En síntesis, el tambor rotatorio desarrollado en esta tesis se posiciona como una alternativa intermedia muy favorable entre los dos métodos tradicionales: conserva el uso de energía renovable característico del secado al sol, pero se aproxima al desempeño temporal del secado mecánico. Por esta razón, puede afirmarse que el sistema cumple el propósito central de la investigación y demuestra ser una opción técnica viable, eficaz, eficiente y, en conjunto, altamente efectiva para el secado de café en contextos donde se busque reducir tiempos, mejorar la uniformidad y disminuir la dependencia de combustibles fósiles [14], [15].

5.9 Resultado final de efectividad del sistema

A partir del análisis integral desarrollado en los capítulos anteriores, es posible determinar la efectividad del sistema de secado de café basado en tambor rotatorio acoplado a un colector solar, considerando los principales indicadores evaluados durante el proceso experimental y su comparación con métodos tradicionales de secado.

En este contexto, la efectividad del sistema se entiende como la combinación de su eficacia y eficiencia, permitiendo evaluar tanto el cumplimiento del objetivo del proceso como la optimización de los recursos utilizados.

En primer lugar, en términos de eficacia, el sistema propuesto logró reducir el contenido de humedad del café hasta valores cercanos al 12 %, cumpliendo con los requerimientos necesarios para su almacenamiento seguro y evidenciando su capacidad para alcanzar el objetivo del proceso de secado. Asimismo, el tiempo de secado obtenido es significativamente menor en comparación con el método tradicional en patio, el cual requiere entre 168 y 360 horas dependiendo de las condiciones climáticas, mientras que el sistema desarrollado logró completar el proceso en un tiempo promedio de 24,5 horas. Esto representa una reducción del tiempo de

secado entre el 85,4 % y el 93,2 %, evidenciando una mejora sustancial en el desempeño del proceso.

En segundo lugar, desde el punto de vista de la eficiencia, el sistema presentó un comportamiento energético superior frente al secado mecánico a gas. Para una carga equivalente de aproximadamente 6 kg de café pergamino seco, el consumo energético del secado a gas se estimó en aproximadamente 7,01 kWh, mientras que el sistema propuesto presentó un consumo eléctrico de aproximadamente 0,678 kWh, siendo la energía térmica suministrada principalmente por el colector solar. Esto implica una reducción del consumo de energía externa cercana al 90,3 %, lo que posiciona al sistema como una alternativa energéticamente eficiente y ambientalmente sostenible.

En cuanto a la velocidad de secado, el sistema alcanzó un valor promedio de 0,832 %/h, el cual se encuentra dentro del rango típico del secado mecánico a gas (0,679 %/h a 0,815 %/h) y significativamente por encima del secado en patio (0,057 %/h a 0,121 %/h), demostrando que el sistema propuesto presenta un comportamiento cinético competitivo.

Adicionalmente, el sistema presenta mejoras importantes en el control del proceso. A diferencia del secado en patio, donde las variables dependen completamente de las condiciones ambientales, el prototipo desarrollado incorpora instrumentación electrónica basada en sensores de temperatura y humedad, junto con un sistema de control del flujo de aire, lo cual permite monitorear y regular las condiciones internas del proceso en tiempo real, aumentando la estabilidad operativa y la repetibilidad de los resultados.

Por otra parte, la uniformidad del secado se ve favorecida por la incorporación del tambor rotatorio, el cual genera un movimiento continuo del café durante el proceso. Este mecanismo reduce gradientes de humedad dentro de la masa de grano y mejora la exposición homogénea al aire caliente, contribuyendo a obtener valores finales de humedad consistentes entre las diferentes pruebas experimentales.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema propuesto presenta un alto nivel de efectividad técnica, al combinar una elevada eficacia en el cumplimiento del objetivo del secado con una alta eficiencia en términos de tiempo, consumo energético y control del proceso.

Por lo tanto, el sistema de secado basado en tambor rotatorio y colector solar desarrollado en este trabajo se consolida como una alternativa viable, eficiente y sostenible para el secado de

café, cumpliendo con el objetivo general de la investigación y demostrando su capacidad para mejorar el proceso frente a las tecnologías actualmente utilizadas en el sector cafetero, especialmente en contextos donde se busca reducir costos energéticos y optimizar las condiciones de operación.

5.10 Análisis costo beneficio respecto al secado en patio y secado a gas

5.10.1 Costo operativo de los sistemas de secado

Con el propósito de evaluar la viabilidad del sistema propuesto, se realizó un análisis comparativo del costo operativo de tres métodos de secado de café: secado en patio, secado mecánico a gas y secado mediante el prototipo de tambor rotatorio con colector solar.

Para garantizar una comparación homogénea, los cálculos se realizaron considerando una carga equivalente de aproximadamente 6 kg de café pergamino seco, en concordancia con las pruebas experimentales desarrolladas en el presente trabajo.

A) Costo operativo del secado a gas

De acuerdo con información técnica reportada por la Federación Nacional de Cafeteros [14], el consumo típico de gas propano en secadores mecánicos es de aproximadamente 2,5 lb de GLP por arroba de café pergamino seco.

Considerando que:

- 1 arroba \approx 12,5 kg
- 2,5 lb \approx 1,134 kg de GLP

Se obtiene:

Consumo de gas=1,134kg de GLP por arroba

Para una carga de 6 kg, equivalente a:

$$\frac{6}{12.5} = 0.48 \text{ arrobos}$$

En consumo de gas por carga es:

$$0.48 \times 1,134 = 0.544 \text{Kg de GLP}$$

Tomando un precio promedio de mercado del GLP de:

$$6200 \text{ COP/Kg [16]}$$

El costo operativo por carga es:

$$0.544 \times 6.200 = 3.373 \text{ COP}$$

Resultado: El costo operativo del secado a gas es aproximadamente 3.300 – 3.400 COP por cada 6 kg de café seco.

B) Costo operativo del prototipo de tambor rotatorio solar

El sistema propuesto utiliza energía solar térmica para el proceso de secado y un sistema fotovoltaico para alimentar los componentes eléctricos (ventiladores, sensores y sistema de control).

Durante las pruebas experimentales, el consumo energético del sistema fue aproximadamente:

$$0.678 \text{ kWh por carga}$$

Sin embargo, dado que esta energía proviene de paneles solares, el costo operativo directo asociado al consumo energético es:

$$\approx 0 \text{ COP}$$

En un escenario conservador, considerando que el sistema opere conectado a la red eléctrica [17], el costo sería:

$$0.678 \times 900 = 610 \text{ COP por carga (Aprox)}$$

Resultado: El costo operativo del prototipo es prácticamente nulo en operación solar, y en un escenario con respaldo eléctrico, es inferior a 700 COP por carga, siendo significativamente menor que el secado a gas.

C) Costo operativo del secado en patio

El secado en patio se caracteriza por no requerir consumo de energía comercial, ya que utiliza radiación solar directa. Sin embargo, implica costos indirectos asociados principalmente a la mano de obra.

Según recomendaciones técnicas, el café debe ser removido al menos 4 veces al día, y el tiempo de secado varía entre 7 y 15 días. Para efectos de este análisis, se considera un valor promedio de 11 días.

Se asume:

- Tiempo de trabajo diario: 0,5 horas
- Tiempo total por lote:

$$11 \times 0.5 = 5.5 \text{ horas}$$

Tomando un valor aproximado de mano de obra de:

$$7300 \text{ COP/hora [18]}$$

El costo por lote es:

$$5.5 \times 7.300 = 40.150 \text{ COP}$$

Resultado: El secado en patio presenta un costo energético nulo, pero un costo indirecto aproximado de 40.000 COP por lote, asociado a la mano de obra.

Es importante aclarar que este valor puede variar dependiendo de la escala de producción, ya que en sistemas de mayor capacidad este costo se distribuye entre mayores cantidades de café.

5.10.2 Inversión inicial de los sistemas de secado

Además del costo operativo, es fundamental analizar la inversión inicial requerida para cada método, ya que esta influye directamente en la viabilidad económica a largo plazo.

A) Inversión inicial del secado a gas

Los secadores mecánicos a gas disponibles comercialmente [19] para pequeñas producciones presentan costos aproximados en el rango de:

5.500.000COP a 6.000.000COP

Resultado: Se considera una inversión promedio de 5.800.000 COP para un sistema de secado a gas de pequeña escala.

B) Inversión inicial del secado en patio

El secado en patio generalmente utiliza infraestructura existente en la finca, por lo que su inversión inicial puede considerarse:

≈ 0COP

En caso de construcción de infraestructura básica (pisos, marquesinas), el costo puede variar significativamente.

Resultado: El secado en patio presenta la menor inversión inicial, especialmente cuando se dispone de infraestructura previa.

C) Inversión inicial del prototipo

A partir de los componentes utilizados en el desarrollo del prototipo, se realizó una estimación de costos:

<i>Componente</i>	<i>Costo Aproximado (COP)</i>
<i>Paneles solares (500 W)</i>	<i>600.000</i>
<i>Baterías</i>	<i>1.400.000</i>
<i>Inversor</i>	<i>300.000</i>
<i>Microcontrolador (ESP32)</i>	<i>25.000</i>
<i>Sensores (PT100, SHT31)</i>	<i>120.000</i>
<i>Pantalla y electrónica</i>	<i>40.000</i>

<i>Ventiladores y control</i>	<i>40.000</i>
<i>Estructura mecánica y colector</i>	<i>3.600.000</i>
<i>Total Aproximado</i>	<i>6.125.000</i>

Tabla 15. Costos componentes para el prototipo.

5.10.3 Análisis de Costo Beneficio

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el prototipo presenta la inversión inicial más alta entre las alternativas tecnificadas comparadas, incluso superando ligeramente al sistema de secado a gas. Sin embargo, esta mayor inversión inicial se compensa con un costo operativo considerablemente menor, ya que el sistema funciona principalmente con energía solar y no depende del consumo continuo de combustibles fósiles.

En el caso del secado a gas, aunque la inversión inicial es ligeramente menor, su operación implica un gasto constante en combustible, lo que incrementa progresivamente el costo total del proceso a medida que aumenta el número de ciclos de secado.

Por otra parte, el secado en patio presenta una inversión inicial muy baja, pero su principal desventaja radica en el largo tiempo de secado, la alta dependencia de las condiciones climáticas y los costos indirectos asociados al manejo manual del producto. Además, este método ofrece un menor control sobre las variables del proceso, lo que puede afectar la uniformidad y trazabilidad del secado.

En consecuencia, el análisis permite establecer que:

- El secado a gas resulta funcional y rápido, pero presenta dependencia permanente del combustible.
- El secado en patio requiere baja inversión, pero demanda más tiempo, mayor mano de obra y menor control del proceso.
- El prototipo de tambor rotatorio solar requiere una inversión inicial mayor, pero reduce de forma significativa el costo operativo y mejora las condiciones de control y monitoreo del secado.

5.10.4 Conclusión del análisis

El sistema de secado mediante tambor rotatorio con colector solar presenta una mayor inversión inicial que el secado a gas y que el secado en patio; sin embargo, **su** costo operativo es significativamente menor, debido al aprovechamiento de la energía solar como fuente principal de funcionamiento.

Frente al secado a gas, el prototipo ofrece una ventaja económica a largo plazo, ya que reduce el gasto recurrente en combustible y puede recuperar la diferencia de inversión tras un número determinado de ciclos de secado.

Frente al secado en patio, aunque este presenta una inversión mínima, el sistema propuesto ofrece ventajas importantes en términos de reducción del tiempo de secado, menor dependencia de las condiciones climáticas, mayor control del proceso y mejor capacidad de monitoreo.

En consecuencia, puede afirmarse que el prototipo desarrollado constituye una alternativa técnicamente funcional y económicamente viable a largo plazo, especialmente en escenarios donde se requiera disminuir el consumo de energía convencional y mejorar el control del proceso de secado.

6. Conclusiones

A partir del desarrollo, implementación y evaluación experimental del sistema de secado de café basado en un tambor rotatorio acoplado a un colector solar y energizado mediante un sistema fotovoltaico, se establecen las siguientes conclusiones:

En primer lugar, se logró diseñar y construir un prototipo funcional que integra de manera adecuada los subsistemas mecánico, térmico, electrónico y energético, permitiendo generar condiciones controladas para el proceso de secado del café. La integración del colector solar, el tambor rotatorio y el sistema de ventilación forzada permitió establecer un sistema operativo capaz de realizar el proceso bajo condiciones experimentales controladas.

Desde el punto de vista del proceso de secado, el sistema demostró ser eficaz al reducir el contenido de humedad del café desde valores iniciales cercanos al 32,43 % hasta valores finales de aproximadamente 12,05 %, adecuados para almacenamiento seguro. Este resultado confirma que el sistema cumple con los requerimientos técnicos del secado de café pergamino, evidenciando el cumplimiento del objetivo principal del proceso.

En términos de tiempo de secado, el sistema presentó un desempeño significativamente superior al método tradicional en patio, logrando completar el proceso en un tiempo promedio de 24,5 horas, frente a rangos de 168 a 360 horas reportados para el secado al sol. Esto representa una reducción del tiempo de secado entre el 85,4 % y el 93,2 %, evidenciando una mejora en la eficiencia operativa del proceso.

Desde el punto de vista energético, el sistema mostró una ventaja significativa frente al secado mecánico a gas. Mientras que este puede requerir aproximadamente 7,01 kWh para una carga equivalente, el sistema propuesto presentó un consumo eléctrico cercano a 0,678 kWh, siendo la mayor parte de la energía térmica suministrada por el colector solar. Esto implica una reducción del consumo energético externo de aproximadamente el 90,3 %, lo cual evidencia un comportamiento eficiente al aprovechar fuentes de energía renovable y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

En cuanto al comportamiento del proceso, el sistema alcanzó una velocidad promedio de secado de 0,832 %/h, valor comparable al del secado mecánico a gas y significativamente superior al del secado en patio. Este resultado demuestra que el sistema propuesto presenta un comportamiento competitivo bajo condiciones térmicas moderadas.

Adicionalmente, la incorporación del tambor rotatorio permitió mejorar la uniformidad del secado, al generar un movimiento continuo del grano que favorece una exposición homogénea al aire caliente. Asimismo, el sistema de instrumentación electrónica permitió monitorear en tiempo real variables como temperatura y humedad relativa, contribuyendo a un mayor control del proceso frente a métodos tradicionales.

En relación con el modelamiento matemático, el modelo de Newton-Lewis permitió describir adecuadamente la tendencia del proceso de secado bajo las condiciones experimentales evaluadas, mostrando un ajuste coherente con los datos obtenidos. No obstante, su alcance se limita a las condiciones bajo las cuales fue ajustado, por lo que no constituye una herramienta ajustada general.

En conjunto, los resultados permiten concluir que el sistema desarrollado presenta un alto nivel de efectividad técnica, entendida como la integración de una elevada eficacia en el cumplimiento del objetivo de reducción de humedad y una adecuada eficiencia en el uso de los recursos energéticos.

Finalmente, el sistema propuesto se consolida como una alternativa viable, sostenible y tecnológicamente adecuada para el secado de café a escala experimental, al mejorar el control del proceso, reducir el tiempo de secado y disminuir la dependencia de fuentes energéticas convencionales, contribuyendo al mejoramiento de los procesos productivos en el sector cafetero.

7. Recomendaciones

7.1 Recomendaciones para la mejora del sistema

A partir de los resultados obtenidos durante la fase experimental y del análisis del comportamiento del prototipo de secado de café, se identificaron diferentes oportunidades de mejora en los componentes del sistema. Estas recomendaciones se enfocan en optimizar el desempeño mecánico, térmico, energético y de control del sistema, con el fin de incrementar su eficiencia y viabilidad en aplicaciones reales.

7.1.1 *Recomendaciones de mejora en el tambor rotatorio*

A partir de los resultados obtenidos durante la fase experimental y del análisis del comportamiento del prototipo de secado, se identificaron una serie de aspectos susceptibles de mejora en el diseño mecánico y funcional del tambor rotatorio, los cuales pueden contribuir significativamente a incrementar la eficiencia del sistema.

En primer lugar, se recomienda realizar modificaciones en el diseño interno del tambor rotatorio, específicamente en las aletas encargadas del movimiento del café. Se sugiere aumentar el tamaño y/o rediseñar la geometría de estas aletas, con el fin de mejorar la capacidad de arrastre y elevación del grano durante la rotación. Esto permitiría generar una mayor exposición del café al flujo de aire caliente a menos velocidades de funcionamiento, favoreciendo una transferencia de calor y masa más eficiente y, por ende, una reducción más uniforme del contenido de humedad.

Adicionalmente, se recomienda la implementación de mallas o elementos de contención en los extremos del tambor, con el propósito de evitar la pérdida de material durante el proceso de rotación. Esta mejora no solo incrementa la seguridad operativa del sistema, sino que también garantiza que la totalidad del café permanezca dentro del tambor durante el proceso de secado, evitando pérdidas y asegurando la uniformidad del tratamiento térmico.

Por otra parte, se sugiere realizar una modificación en la estructura externa del tambor mediante la incorporación de una apertura o compuerta adicional en la lámina que lo recubre. Esta adecuación permitiría facilitar las labores de carga y descarga del café, mejorando la ergonomía del sistema y reduciendo los tiempos operativos asociados al manejo del producto.

En cuanto al sistema de accionamiento, se evidenció que el motor actualmente implementado no cumple con el torque necesario para movilizar cargas superiores, particularmente cercanas a los 25 kg de café pergamino, que corresponde a la capacidad máxima estimada del tambor. Por esta razón, se recomienda la selección e implementación de un motor con mayor capacidad de torque, que garantice una operación estable del sistema bajo condiciones de carga real, evitando esfuerzos mecánicos excesivos y posibles fallas en el funcionamiento.

También se recomienda reconsiderar la ubicación del ducto de entrada de aire hacia el tambor rotatorio. Un rediseño en la posición de este elemento podría mejorar la distribución del aire caliente dentro del sistema, favoreciendo una mayor uniformidad térmica y optimizando el proceso de secado.

7.1.2 Recomendaciones de mejora en el colector solar

Con base en el análisis del comportamiento térmico del sistema y las condiciones experimentales evaluadas, se identifican oportunidades de mejora en el diseño del colector solar, orientadas a optimizar la transferencia de calor, el flujo de aire y la eficiencia global del proceso de secado.

En primer lugar, se recomienda la incorporación de dos ventiladores adicionales en el sistema de captación solar, con el objetivo de incrementar el caudal de aire que ingresa al tambor rotatorio. Esta modificación permitiría evaluar el efecto del aumento del flujo de aire sobre la tasa de secado, considerando que una mayor velocidad del aire favorece la remoción de vapor de agua en la superficie del grano y mejora los fenómenos de transferencia de calor y masa dentro del sistema.

Asimismo, se sugiere realizar modificaciones en la geometría de la lámina de zinc utilizada como superficie absorbente dentro del colector solar. En particular, se recomienda analizar diferentes configuraciones de pliegues o corrugaciones, con el fin de aumentar el área efectiva de intercambio térmico y mejorar tanto la captación de la radiación solar como la transferencia de calor hacia el aire de secado. Este tipo de modificaciones puede influir directamente en la eficiencia térmica del colector y en la temperatura alcanzada por el aire.

Por otra parte, se propone rediseñar la salida del colector solar, adoptando una geometría tipo embudo o difusor. Esta configuración permitiría redirigir el flujo de aire de manera más

uniforme hacia el interior del tambor rotatorio, reduciendo pérdidas de energía y mejorando la distribución del aire caliente dentro del sistema, lo cual impacta positivamente en la uniformidad del proceso de secado.

Adicionalmente, se recomienda la implementación de una estructura de soporte que permita ajustar el ángulo de inclinación del colector solar. Esta adecuación facilitaría la orientación del sistema respecto a la incidencia de la radiación solar, permitiendo maximizar la captación de energía a lo largo del día. La optimización del ángulo de inclinación es un factor clave en sistemas solares térmicos, ya que influye directamente en la cantidad de energía absorbida y, por ende, en el rendimiento del proceso de secado.

En conjunto, estas mejoras propuestas en el colector solar buscan incrementar la eficiencia térmica del sistema, optimizar el flujo de aire y mejorar el desempeño general del proceso de secado del café.

7.1.3 Recomendaciones en el sistema de control y monitoreo

Con base en la implementación actual del sistema electrónico, se recomienda avanzar hacia la incorporación de estrategias de control más robustas que permitan mejorar la estabilidad del proceso.

En particular, se sugiere la implementación de un controlador PID que permita regular automáticamente variables como la temperatura y el flujo de aire dentro del tambor rotatorio. Esto contribuiría a mantener condiciones de secado más estables y a optimizar el rendimiento del sistema.

Asimismo, se recomienda fortalecer el sistema de monitoreo mediante la integración de sensores adicionales o mejoras en la calibración de los sensores existentes, con el fin de aumentar la precisión de las mediciones y mejorar la confiabilidad de los datos obtenidos durante el proceso.

7.1.4 Recomendaciones en el sistema energético

Desde el punto de vista energético, se recomienda realizar un análisis más detallado del sistema fotovoltaico utilizado, incluyendo la evaluación de su eficiencia, el dimensionamiento

adecuado de los paneles solares y la posible incorporación de sistemas de almacenamiento energético.

Adicionalmente, se sugiere evaluar la implementación de sistemas híbridos de secado, combinando la energía solar con fuentes auxiliares como biomasa o gas, con el fin de garantizar la continuidad del proceso en condiciones de baja radiación solar.

7.1.5 Recomendaciones para trabajos futuros

Finalmente, se recomienda realizar pruebas del sistema en condiciones reales de campo, específicamente en fincas cafeteras, con el fin de evaluar su desempeño bajo condiciones ambientales variables.

También se sugiere aumentar la capacidad del sistema para trabajar con mayores volúmenes de café, lo que permitiría analizar su viabilidad a escala productiva.

Por último, se recomienda continuar con el desarrollo del modelamiento matemático del proceso, incorporando modelos más complejos que consideren de manera más detallada los fenómenos de transferencia de calor y masa, lo cual permitiría mejorar la estimación del comportamiento del sistema y su optimización futura.

Referencias

- [1] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [2] R. J. Clarke and R. Macrae, *Coffee: Volume 2. Technology*. London, U.K.: Elsevier Applied Science, 1987.
- [3] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
- [4] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015.
- [5] A. E. Peñuela-Martínez et al., Manejo del café en el secado solar, *Avances Técnicos Cenicafé*, no. 577, 2025.
- [6] H. Duque-Orrego et al., *Economía del secado del café: Un estudio de caso*, Cenicafé, 2001.
- [7] “Coffee drying in Colombia,” *Revista ESPACIOS*, vol. 38, no. 29, 2017.
- [8] J. A. Escobar Moreno and C. A. Pantoja de la Cruz, *Sistema automatizado para el control de la temperatura y humedad relativa de un secador solar de café*, Trabajo de grado, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia, 2016.
- [9] J. A. Insuasty and S. Bastidas, *Prototipo secador rotatorio de café especial alimentado con energía solar*, Trabajo de grado, Universidad Mariana, Pasto, Colombia, 2022.
- [10] J. Duque-Dussán et al., “Secadores solares modulares de café: una alternativa sostenible, automatizada y de mayor durabilidad,” *Avances Técnicos Cenicafé*, 2025.
- [11] J. Quintanar Olgúin and M. Roa Durán, “Evaluación térmica y financiera del proceso de secado del grano de café en un secador solar activo tipo invernadero,” *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 8, no. 2, pp. 295–307, 2017.
- [12] A. Zziwa et al., “Accelerating coffee drying with innovation: Performance evaluation of a sensor-controlled hybrid solar-biomass powered dryer,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2025.
- [13] İ. Doymaz, “Drying kinetics of agricultural products,” *Journal of Food Engineering*, vol. 74, no. 3, pp. 341–347, 2006.
- [14] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Cartilla 21: Beneficio del café II. Secado del café pergamino*. Caldas, Colombia.

[15] C. E. Oliveros-Tascón, *Secado solar y secado combinado del café*. Chinchiná, Colombia: Cenicafé, 2013.

[16] Inversiones GLP S.A.S. E.S.P., “*Publicación Minorista 15 Enero 2026*,” Unigas, 15 enero 2026. Disponible en: <https://www.unigas.com.co/wp-content/uploads/2026/01/Publicacion-Minorista-15-Enero-2026.pdf>

[17] Centrales Eléctricas de Nariño S.A. E.S.P. (CEDENAR), “*Informe de Gestión 2024*,” mar. 2025. Disponible en: <https://www.cedenar.com.co/wp-content/uploads/2025/03/INFORME-DE-GESTION-2024.pdf>

[18] Holland & Knight, “*Colombia decreta aumento del salario mínimo y auxilio de transporte para 2026*,” 30 diciembre 2025. Disponible en: <https://www.hklaw.com/en/insights/publications/2025/12/colombia-decreta-aumento-del-salario-minimo-y-auxilio-de-transporte>

[19] Aristiagro, “*Secadora de café a gas Penagos 10 arrobas día SC-10-EM 110V*,”. Disponible en: <https://www.aristiagro.com/producto/secadora-de-cafe-a-gas-penagos-10-arrobas-dia-sc-10-em-110v/>

[20] C. G. Sanz, “*El mercado mundial del café y su impacto en Colombia*,” Banco de la República, 2012. Disponible en: https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/be_710.pdf

[21] D. C. Choperena Ramos, “*Impacto de las variaciones cambiarias en las exportaciones de café en Colombia*,” Univ. de La Sabana, 2016. Disponible en: <https://intellectum.unisabana.edu.co/server/api/core/bitstreams/7bdf9f62-e91a-52b7-e053-7e0910accd73/content>.

[22] Superintendencia de la Economía Solidaria, “*El sector cafetero en la economía colombiana*,” 2024. Disponible en: https://www.supersolidaria.gov.co/sites/default/files/gad_2024/20240515_nts_002.pdf

[23] Ó. H. Cerquera Losada, “*Análisis de la competitividad de las exportaciones del café colombiano*,” *Rev. SciELO*, 2020. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-86932020000200019

Anexos

Anexo A - Código programación ESP32

```

#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_ST7735.h>
#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include "Adafruit_SHT31.h"
#include <Fonts/FreeSans9pt7b.h>
#include <PID_v1.h>
#include <math.h>

// ===== WIFI =====
const char* ssid = "BRAVO CORAL";
const char* password = "1233188509JC";
WebServer server(80);
bool wifiOK = false;

// ===== TFT PINES =====
#define TFT_CS 5
#define TFT_RST 16
#define TFT_DC 17
#define TFT_BL 22

Adafruit_ST7735 tft = Adafruit_ST7735(TFT_CS, TFT_DC, TFT_RST);

// ===== PT100 =====
#define PIN_CS 27
#define PIN_SCK 18
#define PIN_MISO 19
#define PIN_MOSI 23

Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(PIN_CS);
#define RREF 430.0
#define RNOMINAL 100.0

// ===== SHT31 =====
TwoWire Wire2 = TwoWire(1);
Adafruit_SHT31 sht31_1 = Adafruit_SHT31();
Adafruit_SHT31 sht31_2 = Adafruit_SHT31(&Wire2);

// ===== FAN =====
#define PIN_PWM 14
#define PIN_RPM 34

// ===== PID =====
double Setpoint = 50.0;
double Input;
double Output;

double Kp = 2.5;
double Ki = 0.3;
double Kd = 0.8;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, REVERSE);

// ===== LIMITES CONTROL =====

```

```

#define TEMP_PID_START 45
#define TEMP_MAX_CONTROL 70

#define PWM_MIN 90
#define PWM_MAX 255

// ===== VARIABLES WIFI =====
float t1_global = NAN;
float h1_global = NAN;
float t2_global = NAN;
float h2_global = NAN;
float temp_global = NAN;
int pwm_global = 0;
float rpm_global = NAN;

// ===== RPM =====
volatile unsigned long contadorRPM = 0;
unsigned long tiempoAnteriorRPM = 0;
float rpm = 0;
int pwmSuavizado = 0;

void IRAM_ATTR contarRPM() {
  contadorRPM++;
}

// ===== TIMERS =====
unsigned long lastChange = 0;
unsigned long lastRefresh = 0;
int screenMode = 0;

// ===== SERVER =====
void handleData() {

  String json = "{";

  json += "\"temp\": " + String(isnan(temp_global) ? "null" : String(temp_global,
2)) + ",";
  json += "\"pwm\": " + String(pwm_global) + ",";
  json += "\"rpm\": " + String(isnan(rpm_global) ? "null" : String(rpm_global, 0))
+ ",";
  json += "\"t1\": " + String(isnan(t1_global) ? "null" : String(t1_global, 2)) +
",";
  json += "\"h1\": " + String(isnan(h1_global) ? "null" : String(h1_global, 2)) +
",";
  json += "\"t2\": " + String(isnan(t2_global) ? "null" : String(t2_global, 2)) +
",";
  json += "\"h2\": " + String(isnan(h2_global) ? "null" : String(h2_global, 2));

  json += "}";

  server.send(200, "application/json", json);
}

// ===== UI BASE =====
void drawUI() {

  tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);

  tft.setFont(&FreeSans9pt7b);
  tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);

  tft.setCursor(10, 15);
  tft.print("Datos Sensores");
}

```

```

tft.drawLine(0, 25, 160, 25, ST77XX_WHITE);
}

// ===== ICONO TERMÓMETRO =====
void drawThermometerIcon(int x, int y, uint16_t color) {
tft.drawRoundRect(x, y, 8, 22, 3, color);
tft.fillCircle(x + 4, y + 22, 4, color);
tft.drawLine(x + 4, y + 4, x + 4, y + 20, color);
tft.fillRect(x + 2, y + 5, 3, 1, ST77XX_RED);
tft.fillRect(x + 2, y + 8, 3, 1, ST77XX_RED);
tft.fillRect(x + 2, y + 11, 3, 1, ST77XX_RED);
tft.fillRect(x + 2, y + 14, 3, 1, ST77XX_RED);
tft.fillRect(x + 2, y + 17, 3, 1, ST77XX_RED);
}

// ===== ICONO GOTA =====
void drawWaterDropIcon(int x, int y, uint16_t color) {
tft.fillCircle(x + 6, y + 13, 6, color);
tft.fillTriangle(x, y + 13, x + 12, y + 13, x + 6, y + 3, color);
tft.fillRect(x + 9, y + 10, 1, 1, ST77XX_WHITE);
tft.fillRect(x + 10, y + 11, 1, 1, ST77XX_WHITE);
tft.fillRect(x + 11, y + 12, 1, 1, ST77XX_WHITE);
tft.fillRect(x + 11, y + 13, 1, 1, ST77XX_WHITE);
tft.fillRect(x + 11, y + 14, 1, 1, ST77XX_WHITE);
tft.fillRect(x + 10, y + 15, 1, 1, ST77XX_WHITE);
}

// ===== ICONO PWM =====
void drawSquareWaveIcon(int x, int y, uint16_t color) {
tft.drawLine(x, y + 5, x + 4, y + 5, color);
tft.drawLine(x + 4, y + 5, x + 4, y - 3, color);
tft.drawLine(x + 4, y - 3, x + 8, y - 3, color);
tft.drawLine(x + 8, y - 3, x + 8, y + 5, color);
tft.drawLine(x + 8, y + 5, x + 18, y + 5, color);
tft.drawLine(x + 18, y + 5, x + 18, y - 3, color);
tft.drawLine(x + 18, y - 3, x + 22, y - 3, color);
tft.drawLine(x + 22, y - 3, x + 22, y + 5, color);
}

// ===== TACÓMETRO =====
void drawTachometer(int x, int y, float rpm) {

int r = 12;
int cx = x + r;
int cy = y + r;

for (int a = 180; a <= 360; a += 6) {

int x1 = cx + r * cos(a * PI / 180);
int y1 = cy + r * sin(a * PI / 180);

tft.drawPixel(x1, y1, ST77XX_CYAN);
}

float ang = map((int)rpm, 0, 3000, 180, 360);

int ax = cx + (r - 4) * cos(ang * PI / 180);
int ay = cy + (r - 4) * sin(ang * PI / 180);

tft.drawLine(cx, cy, ax, ay, ST77XX_RED);
tft.fillCircle(cx, cy, 2, ST77XX_WHITE);
}

```

```

// ===== INTERFAZ SHT =====
void showSHT(float t, float h, int num) {

tft.fillRect(0, 30, 160, 120, ST77XX_BLACK);

uint16_t color = (num == 1) ? ST77XX_GREEN : ST77XX_CYAN;

tft.setTextColor(color);
tft.setCursor(10, 45);
tft.print("SHT31 Sensor ");
tft.print(num);

drawThermometerIcon(10, 60, ST77XX_RED);

tft.setCursor(30, 77);
tft.print("Temp: ");
if (isnan(t)) tft.print("--"); else tft.print(t, 2);

int x = tft.setCursorX();
int y = tft.setCursorY();

tft.drawCircle(x + 3, y - 10, 2, color);

tft.setCursor(x + 5, y);
tft.print("C");

drawWaterDropIcon(8, 95, ST77XX_BLUE);

tft.setCursor(30, 112);
tft.print("Hum: ");

if (isnan(h)) tft.print("--"); else tft.print(h, 1);

tft.print(" %");
}

// ===== INTERFAZ FAN =====
void showFan(float temp, int pwm, float rpm) {

tft.fillRect(0, 30, 160, 120, ST77XX_BLACK);

tft.setTextColor(ST77XX_MAGENTA);

tft.setCursor(10, 45);
tft.print("VENTILADOR");

drawThermometerIcon(14, 55, ST77XX_RED);

tft.setCursor(37, 72);
tft.print("Temp: ");

if (isnan(temp)) tft.print("--"); else tft.print(temp, 1);

int x = tft.setCursorX();
int y = tft.setCursorY();

tft.drawCircle(x + 3, y - 10, 2, ST77XX_MAGENTA);

tft.setCursor(x + 5, y);
tft.print("C");

drawSquareWaveIcon(5, 95, ST77XX_YELLOW);

```

```

tft.setCursor(40, 100);
tft.print("PWM: ");
tft.print(pwm);

drawTachometer(7, 111, rpm);

tft.setCursor(40, 125);
tft.print("RPM: ");

if (isnan(rpm)) tft.print("--"); else tft.print(rpm, 0);
}

// ===== SETUP =====
void setup() {

Serial.begin(115200);

pinMode(TFT_BL, OUTPUT);
digitalWrite(TFT_BL, HIGH);

Wire.begin(13, 21);
Wire2.begin(25, 26);

sht3l_1.begin(0x44);
sht3l_2.begin(0x44);

SPI.begin(PIN_SCK, PIN_MISO, PIN_MOSI, PIN_CS);
thermo.begin(MAX31865_3WIRE);

tft.initR(INITR_BLACKTAB);
tft.setRotation(1);
drawUI();

ledcAttach(PIN_PWM, 25000, 8);

pinMode(PIN_RPM, INPUT);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_RPM), contarRPM, FALLING);

myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(PWM_MIN, PWM_MAX);

WiFi.begin(ssid, password);

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
delay(500);
}

Serial.println("WiFi conectado");
Serial.print("IP: ");
Serial.println(WiFi.localIP());

wifiOK = true;

server.on("/data", handleData);
server.begin();
}

// ===== LOOP =====
void loop() {

if (millis() - lastChange >= 10000) {

```

```

screenMode++;
if (screenMode > 2) screenMode = 0;

lastChange = millis();
}

if (millis() - lastRefresh >= 1000) {

lastRefresh = millis();

float t1 = sht31_1.readTemperature();
float h1 = sht31_1.readHumidity();
float t2 = sht31_2.readTemperature();
float h2 = sht31_2.readHumidity();

thermo.enableBias(true);
delay(10);
float temp = thermo.temperature(RNOMINAL, RREF);
thermo.enableBias(false);

Input = temp;

// ===== CONTROL PID =====
if (temp < TEMP_PID_START) {

pwmSuavizado = PWM_MAX;

}
else if (temp >= TEMP_MAX_CONTROL) {

pwmSuavizado = PWM_MIN;

}
else {

double escala = (temp - TEMP_PID_START) / (TEMP_MAX_CONTROL - TEMP_PID_START);
pwmSuavizado = PWM_MAX - escala * (PWM_MAX - PWM_MIN);

myPID.Compute();
pwmSuavizado = (pwmSuavizado + Output) / 2.0;

}

pwmSuavizado = constrain(pwmSuavizado, PWM_MIN, PWM_MAX);

ledcWrite(PIN_PWM, pwmSuavizado);

if (millis() - tiempoAnteriorRPM >= 1000) {

rpm = (contadorRPM / 2.0) * 60.0;

contadorRPM = 0;
tiempoAnteriorRPM = millis();
}

t1_global = t1;
h1_global = h1;
t2_global = t2;
h2_global = h2;
temp_global = temp;
pwm_global = pwmSuavizado;
rpm_global = rpm;

```

```

if (screenMode == 0) showSHT(t1, h1, 1);
if (screenMode == 1) showSHT(t2, h2, 2);
if (screenMode == 2) showFan(temp, pwmSuavizado, rpm);
}

if (wifiOK) server.handleClient();
}

```

Anexo B - Código interfaz Python

```

import requests
import pandas as pd
import tkinter as tk
from datetime import datetime
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import time
import math

# ===== CONFIG =====
ESP32_IP = "http://192.168.0.12/data"
INTERVALO_DATOS = 1000
INTERVALO_RELOJ = 50
SETPOINT_TEMP = 50

data_log = []

# ===== cronómetro =====
contador_activo = False
tiempo_inicio = 0
tiempo_transcurrido = 0
tiempo_secado_actual = 0 # tiempo de secado independiente

# ===== VENTANA =====
root = tk.Tk()
root.title("Monitor Industrial ESP32")
root.geometry("720x600")
root.configure(bg="black")

# ===== ESTILOS =====
titulo_font = ("Arial", 16, "bold")
valor_font = ("Arial", 18, "bold")
normal_font = ("Arial", 11, "bold")

# ===== FUNCIONES =====
def valor_valido(v):
    """Verifica si el dato es válido"""
    if v is None:
        return False
    try:
        if isinstance(v, float) and math.isnan(v):
            return False
    except:
        pass
    return True

def formatear_tiempo(seg):
    seg = int(seg)
    horas = seg // 3600
    minutos = (seg % 3600) // 60

```

```

segundos = seg % 60
return f"{horas:02d}:{minutos:02d}:{segundos:02d}"

def actualizar_cronometro():
    global tiempo_transcurrido, tiempo_secado_actual
    # Tiempo total desde inicio del programa
    tiempo_transcurrido = time.perf_counter() - tiempo_inicio_total
    # Tiempo de secado solo si el contador está activo
    if contador_activo:
        tiempo_secado_actual = time.perf_counter() - tiempo_inicio
    contador_label.config(
        text=f"Tiempo de secado: {formatear_tiempo(tiempo_secado_actual)}"
    )
    root.after(INTERVALO_RELOJ, actualizar_cronometro)

def iniciar_contador():
    global contador_activo, tiempo_inicio
    if not contador_activo:
        tiempo_inicio = time.perf_counter() - tiempo_secado_actual
        contador_activo = True

def parar_contador():
    global contador_activo, tiempo_secado_actual
    if contador_activo:
        tiempo_secado_actual = time.perf_counter() - tiempo_inicio
        contador_activo = False

# ===== TITULO =====
tk.Label(
    root,
    text="SENSORES",
    fg="white",
    bg="black",
    font=titulo_font,
).pack(pady=4)

# =====
# ===== CAJA 1: TAMBOR Y VENTILADOR =====
# =====
frame_box1 = tk.LabelFrame(
    root,
    text="Tambor y Ventilador",
    fg="white",
    bg="black",
    font=normal_font,
    bd=2,
)
frame_box1.pack(fill="x", padx=10, pady=5)

frame_top = tk.Frame(frame_box1, bg="black")
frame_top.pack(pady=5)

# Etiquetas encima de los valores
tk.Label(frame_top, text="Temp PT100", fg="magenta", bg="black",
font=normal_font).grid(row=0, column=0)
tk.Label(frame_top, text="PWM", fg="yellow", bg="black",
font=normal_font).grid(row=0, column=1)
tk.Label(frame_top, text="RPM", fg="cyan", bg="black",
font=normal_font).grid(row=0, column=2)

pt100_val = tk.Label(frame_top, text="--- °C", fg="magenta", bg="black",
font=valor_font)
pt100_val.grid(row=1, column=0, padx=20)

```

```

    pwm_val = tk.Label(frame_top, text="---", fg="yellow", bg="black",
font=valor_font)
    pwm_val.grid(row=1, column=1, padx=20)
    rpm_val = tk.Label(frame_top, text="---", fg="cyan", bg="black",
font=valor_font)
    rpm_val.grid(row=1, column=2, padx=20)

# =====
# ===== CAJA 2: SALIDA COLECTOR =====
# =====
frame_box2 = tk.LabelFrame(
    root,
    text="Salida Colector",
    fg="lime",
    bg="black",
    font=normal_font,
    bd=2,
)
frame_box2.pack(fill="x", padx=10, pady=5)

sht1_val = tk.Label(
    frame_box2,
    text="Temp: --- °C    Hum: --- %",
    fg="lime",
    bg="black",
    font=normal_font,
)
sht1_val.pack(pady=4)

# =====
# ===== CAJA 3: AMBIENTE =====
# =====
frame_box3 = tk.LabelFrame(
    root,
    text="Ambiente",
    fg="cyan",
    bg="black",
    font=normal_font,
    bd=2,
)
frame_box3.pack(fill="x", padx=10, pady=5)

sht2_val = tk.Label(
    frame_box3,
    text="Temp: --- °C    Hum: --- %",
    fg="cyan",
    bg="black",
    font=normal_font,
)
sht2_val.pack(pady=4)

# ===== HUMEDAD CAFÉ =====
frame_humedad = tk.Frame(root, bg="black")
frame_humedad.pack(pady=5)

tk.Label(
    frame_humedad,
    text="% de Humedad del Café (DH-200X):",
    fg="orange",
    bg="black",
    font=normal_font,
).pack(side=tk.LEFT)

```

```

entrada_humedad = tk.Entry(frame_humedad, width=8)
entrada_humedad.pack(side=tk.LEFT, padx=5)
entrada_humedad.insert(0, "0")

# ===== CONTADOR =====
frame_contador = tk.Frame(root, bg="black")
frame_contador.pack(pady=5)

contador_label = tk.Label(
    frame_contador,
    text="Tiempo de secado: 0 s",
    fg="white",
    bg="black",
    font=valor_font,
)
contador_label.pack(side=tk.LEFT, padx=10)

tk.Button(frame_contador, text="INICIAR", command=iniciar_contador,
bg="green").pack(side=tk.LEFT, padx=4)
tk.Button(frame_contador, text="PARAR", command=parar_contador,
bg="red").pack(side=tk.LEFT, padx=4)

# ===== GRAFICA =====
fig, ax = plt.subplots(figsize=(4.2, 2.2), dpi=100)
fig.patch.set_facecolor("black")
ax.set_facecolor("black")
ax.tick_params(colors="white")
ax.spines[:].set_color("white")

canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root)
canvas.get_tk_widget().pack(pady=4)

# ===== ACTUALIZAR DATOS =====
def actualizar_datos():
    global data_log, tiempo_secado_actual

    try:
        r = requests.get(ESP32_IP, timeout=2)
        datos = r.json()

        # ===== PT100 =====
        if valor_valido(datos.get("temp")):
            pt100_val.config(text=f"{datos['temp']:.1f} °C")
        else:
            pt100_val.config(text="--- °C")

        # ===== PWM =====
        if valor_valido(datos.get("pwm")):
            pwm_val.config(text=f"{datos['pwm']}")
        else:
            pwm_val.config(text="---")

        # ===== RPM =====
        if valor_valido(datos.get("rpm")):
            rpm_val.config(text=f"{datos['rpm']:.0f}")
        else:
            rpm_val.config(text="---")

        # ===== SHT31-1 =====
        if valor_valido(datos.get("t1")) and valor_valido(datos.get("h1")):
            sht1_val.config(
                text=f"Temp: {datos['t1']:.1f} °C   Hum: {datos['h1']:.1f} %"
            )

```

```

else:
    sht1_val.config(text="Temp: --- °C    Hum: --- %")

# ===== SHT31-2 =====
if valor_valido(datos.get("t2")) and valor_valido(datos.get("h2")):
    sht2_val.config(
        text=f"Temp: {datos['t2']:.1f} °C    Hum: {datos['h2']:.1f} %"
    )
else:
    sht2_val.config(text="Temp: --- °C    Hum: --- %")

# ===== humedad manual =====
try:
    humedad_cafe = float(entrada_humedad.get())
except:
    humedad_cafe = 0

fila = {
    "hora": datetime.now(),
    "temp_pt100": datos.get("temp"),
    "pwm": datos.get("pwm"),
    "rpm": datos.get("rpm"),
    "t1": datos.get("t1"),
    "h1": datos.get("h1"),
    "t2": datos.get("t2"),
    "h2": datos.get("h2"),
    "humedad_cafe": humedad_cafe,
    "tiempo_hms": formatear_tiempo(tiempo_transcurrido), # tiempo desde
inicio del programa
    "tiempo_secado": formatear_tiempo(tiempo_secado_actual), # tiempo
desde botón iniciar
}

data_log.append(fila)

# ===== grafica =====
df = pd.DataFrame(data_log)
ax.clear()
ax.set_facecolor("black")

if "temp_pt100" in df:
    ax.plot(df["temp_pt100"], label="PT100")

ax.axhline(SETPOINT_TEMP, linestyle="--", label=f"Setpoint
{SETPOINT_TEMP}°C")
ax.tick_params(colors="white")
ax.legend(fontsize=7)
canvas.draw()

except Exception as e:
    print("Error conexión:", e)

root.after(INTERVALO_DATOS, actualizar_datos)

# ===== GUARDAR =====
def al_cerrar():
    if len(data_log) > 0:
        df = pd.DataFrame(data_log)
        df.to_excel("datos_sensores.xlsx", index=False)
        print("Excel guardado automáticamente")
    root.destroy()

# ===== INICIO =====

```

```

tiempo_inicio_total = time.perf_counter()
root.protocol("WM_DELETE_WINDOW", al_cerrar)
actualizar_cronometro()
actualizar_datos()
root.mainloop()

```

Anexo C - Modelo Ajustado Python

```

import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# PARÁMETROS DEL MODELO
# =====

M_REF = 10.0
M_OBJ = 12.0
ALPHA = 0.043733

# Datos base
M0 = 22.2
Mf = 13.1
t_exp_final = 7.7667

# Variables base del sistema
Tc_base = 42.0
Tt_base = 35.0
Ta_base = 20.0
HR_base = 55.0

# =====
# DATOS EXPERIMENTALES REALES
# REEMPLAZA ESTOS CON LOS TUYOS
# =====

tiempos_exp = np.array([0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 7.7667])
humedades_exp = np.array([22.2, 18.9, 16.1, 14.2, 13.1])

# =====
# FUNCIONES
# =====

def calcular_k(M0, Mf, t):
    return math.log((M0 - M_REF) / (Mf - M_REF)) / t

def humedad_modelo(t, M0, k):
    return M_REF + (M0 - M_REF) * math.exp(-k * t)

def tiempo_objetivo(M0, k):
    return math.log((M0 - M_REF) / (M_OBJ - M_REF)) / k

def k_dinamico(Tc, Tt, Ta, HR):
    factor_termico = ((Tc + Tt) / 2.0) - Ta
    factor_higro = 1 - (HR / 100.0)

    if factor_termico <= 0 or factor_higro <= 0:
        return np.nan

    return ALPHA * factor_termico * factor_higro

```

```

def tiempo_dinamico(M0, Tc, Tt, Ta, HR):
    k = k_dinamico(Tc, Tt, Ta, HR)
    if np.isnan(k) or k <= 0:
        return np.nan
    return math.log((M0 - M_REF) / (M_OBJ - M_REF)) / k

# =====
# CÁLCULOS
# =====

k_real = calcular_k(M0, Mf, t_exp_final)
t_obj = tiempo_objetivo(M0, k_real)

# Curva suave del modelo
tiempos_modelo = np.linspace(0, t_obj + 2, 300)
humedades_modelo = [humedad_modelo(t, M0, k_real) for t in tiempos_modelo]

# Mapa térmico
Tc_vals = np.linspace(30, 55, 120)
HR_vals = np.linspace(30, 80, 120)
Tc_grid, HR_grid = np.meshgrid(Tc_vals, HR_vals)
tiempo_grid = np.zeros_like(Tc_grid)

for i in range(Tc_grid.shape[0]):
    for j in range(Tc_grid.shape[1]):
        tiempo_grid[i, j] = tiempo_dinamico(
            M0,
            Tc_grid[i, j],
            Tt_base,
            Ta_base,
            HR_grid[i, j]
        )

# =====
# ESTILO TIPO PUBLICACIÓN
# =====

plt.rcParams.update({
    "font.size": 11,
    "axes.titlesize": 13,
    "axes.labelsize": 11,
    "legend.fontsize": 9
})

fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(14, 5.8))

# -----
# a) CURVA MODELO + DATOS REALES
# -----
axs[0].plot(
    tiempos_modelo,
    humedades_modelo,
    linewidth=2.2,
    label="Modelo ajustado"
)

axs[0].scatter(
    tiempos_exp,
    humedades_exp,
    s=42,
    zorder=4,
    label="Datos experimentales"
)

```

```

)

axs[0].axhline(
    M_OBJ,
    linestyle="--",
    linewidth=1.4,
    label=f"Humedad objetivo = {M_OBJ:.1f}%"
)

axs[0].axvline(
    t_obj,
    linestyle="--",
    linewidth=1.4,
    label=f"Tiempo estimado = {t_obj:.2f} h"
)

axs[0].set_title("a) Curva ajustada y datos experimentales")
axs[0].set_xlabel("Tiempo de secado (h)")
axs[0].set_ylabel("Humedad del café (%)")
axs[0].set_xlim(left=0)
axs[0].set_ylim(bottom=M_REF - 0.5, top=max(humedades_exp) + 1)
axs[0].grid(True, alpha=0.3)
axs[0].legend(frameon=True)

# -----
# b) MAPA DE TIEMPO DE SECADO
# -----
contour = axs[1].contourf(
    Tc_grid,
    HR_grid,
    tiempo_grid,
    levels=25
)

cbar = fig.colorbar(contour, ax=axs[1])
cbar.set_label("Tiempo estimado de secado (h)")

axs[1].set_title("b) Influencia de Tc y HR")
axs[1].set_xlabel("Temperatura del colector, Tc (°C)")
axs[1].set_ylabel("Humedad relativa, HR (%)")
axs[1].grid(True, alpha=0.2)

# -----
# AJUSTE FINAL
# -----
fig.suptitle("Modelo ajustado del secado del café", fontsize=14, y=1.02)
plt.tight_layout()

# Guardar en alta calidad
plt.savefig("graficas_combinadas_con_datos.png", dpi=300, bbox_inches="tight")

plt.show()

# =====
# RESULTADOS EN CONSOLA
# =====

print("===== RESULTADOS DEL MODELO =====")
print(f"k experimental = {k_real:.4f} 1/h")
print(f"Tiempo estimado para llegar a {M_OBJ:.1f}% = {t_obj:.2f} h")

```

Anexo D - Planos y diseño mecánico del tambor rotatorio

D.1 Diseño mecánico

El diseño mecánico del tambor rotatorio se desarrolló con el objetivo de garantizar una adecuada circulación del aire caliente a través del café durante el proceso de secado, así como permitir la rotación del sistema para lograr un movimiento uniforme del producto. El tambor fue diseñado mediante el software de modelado tridimensional SolidWorks, lo cual permitió definir las dimensiones, la disposición de los componentes mecánicos y su ensamblaje dentro del sistema de secado.

El sistema está compuesto por diferentes elementos estructurales que permiten contener el café, facilitar la rotación del tambor y garantizar la estabilidad del sistema durante su funcionamiento. Entre los principales componentes mecánicos del tambor se encuentran las placas laterales, el eje de rotación, la estructura cilíndrica perforada, el sistema de soporte y las compuertas de acceso.

A continuación, se describen los principales componentes del diseño mecánico.

D.2 Planos diseño mecánico para el tambor en Solid Works

En esta sección se presentan los planos del diseño mecánico del tambor rotatorio utilizado en el sistema de secado de café. El diseño del tambor fue desarrollado utilizando el software de modelado tridimensional SolidWorks, el cual permitió definir la geometría del sistema, evaluar la disposición de sus componentes y generar los planos necesarios para su fabricación.

El tambor rotatorio constituye uno de los elementos principales del sistema de secado, ya que es el componente encargado de contener el café durante el proceso y permitir su exposición uniforme al flujo de aire caliente proveniente del colector solar.

Durante el proceso de diseño se consideraron aspectos como:

- capacidad de carga del tambor
- circulación del aire caliente a través del café
- estabilidad estructural del sistema
- facilidad de rotación del tambor
- resistencia mecánica de los materiales utilizados

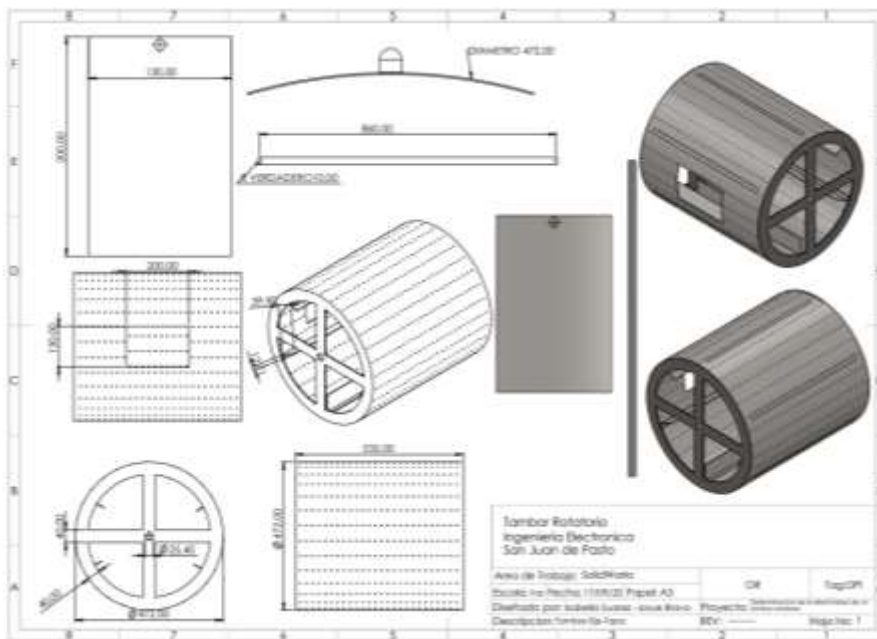


Figura 72. Planos tambor rotatorio

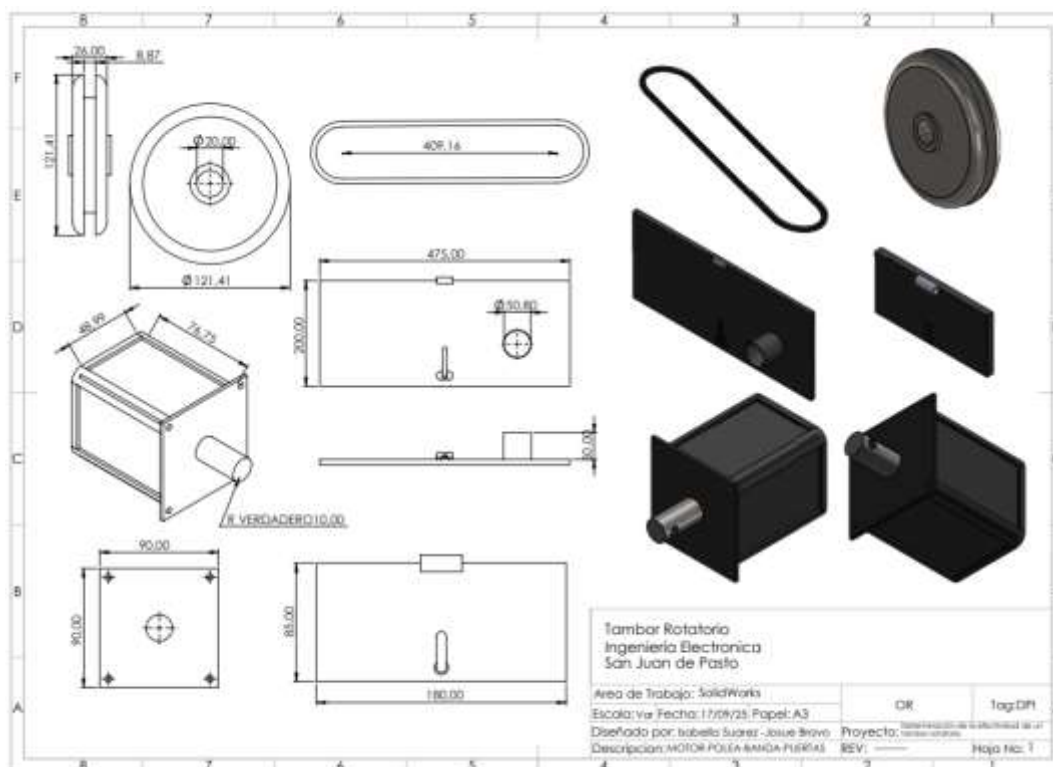


Figura 73. Planos tambor rotatorio

D.3 Placa lateral del tambor

Las placas laterales constituyen los elementos estructurales que delimitan los extremos del tambor rotatorio. Estas placas permiten cerrar el cilindro del tambor y proporcionan soporte estructural al sistema durante su rotación. En el centro de las placas laterales se encuentra el punto de acoplamiento del eje de rotación, el cual transmite el movimiento generado por el sistema de accionamiento hacia toda la estructura del tambor.

En la placa lateral frontal se encuentra instalada una compuerta de carga, la cual permite introducir el café dentro del tambor antes de iniciar el proceso de secado. Esta compuerta facilita el acceso al interior del tambor y permite realizar la operación de carga del producto de manera sencilla. Una vez que el café ha sido introducido en el sistema, la compuerta se cierra para evitar pérdidas de aire caliente durante el funcionamiento del secador.



Figura 74. Placa lateral del tambor frontal



Figura 75. Placa lateral del tambor posterior

D.4 Cilindro perforado del tambor

El cuerpo principal del tambor está formado por un cilindro metálico perforado, el cual constituye la superficie donde se deposita el café durante el proceso de secado. Las perforaciones distribuidas a lo largo del cilindro permiten el paso del aire caliente proveniente del colector solar hacia el interior del tambor.

La circulación del aire a través de estas perforaciones favorece el contacto directo entre el flujo de aire caliente y los granos de café, lo que mejora la transferencia de calor y facilita la evaporación de la humedad contenida en el producto. De esta manera, el diseño perforado del cilindro contribuye a mejorar la eficiencia del proceso de secado.

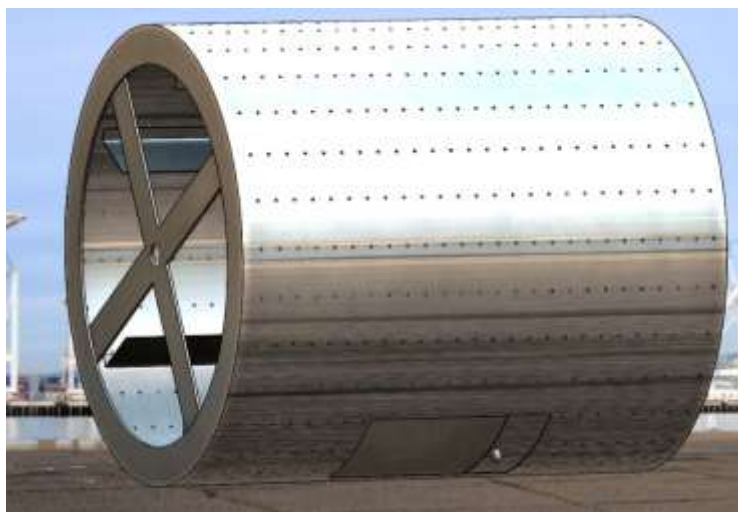


Figura 76. Cilindro interno perforado

D.5 Aletas internas del tambor

En el interior del cilindro se encuentran seis aletas internas, distribuidas radialmente a lo largo de la superficie interna del tambor. Estas aletas cumplen la función de levantar y desplazar el café durante la rotación del tambor.

A medida que el tambor gira, las aletas elevan los granos de café y posteriormente los dejan caer nuevamente dentro del cilindro. Este movimiento continuo produce un movimiento constante del producto, lo que permite que el café se distribuya de manera uniforme dentro del

tambor. Como resultado, se mejora el contacto entre el café y el aire caliente, favoreciendo un proceso de secado más uniforme.



Figura 77. Aletas internas del tambor

D.6 Cruceta estructural del eje

El tambor incorpora una cruceta estructural interna, la cual sirve como elemento de soporte para el eje de rotación. Esta cruceta está formada por varios brazos radiales que conectan el eje central con la estructura cilíndrica del tambor.

La función principal de esta estructura es proporcionar rigidez mecánica al sistema y permitir que el movimiento rotacional del eje se transmita de manera uniforme a toda la estructura del tambor. Además, la cruceta ayuda a mantener la estabilidad del tambor durante su funcionamiento y evita deformaciones estructurales durante la rotación.



Figura 78. Crucetas estructurales para el eje

D.7 Eje de rotación del tambor

El eje de rotación constituye el componente encargado de transmitir el movimiento rotacional al tambor durante el proceso de secado. Este eje atraviesa el centro del tambor y se encuentra conectado a la cruceta estructural interna, la cual actúa como elemento de soporte y fijación entre el eje y la estructura cilíndrica del tambor.

La cruceta estructural está formada por varios brazos radiales que conectan el eje central con el cuerpo del tambor, permitiendo que el movimiento generado por el sistema de transmisión se transfiera de manera uniforme a toda la estructura. De esta forma, el eje no solo permite la rotación del tambor, sino que, a través de la cruceta, asegura la estabilidad mecánica del sistema durante su funcionamiento.

La rotación del tambor permite que el café se mezcle continuamente durante el proceso de secado, evitando la acumulación del producto en una sola zona del cilindro. Este movimiento favorece una distribución más uniforme del café dentro del tambor y mejora el contacto entre el producto y el flujo de aire caliente que circula a través de las perforaciones del cilindro. Como resultado, se logra una mejor distribución del calor y un proceso de secado más uniforme del café.

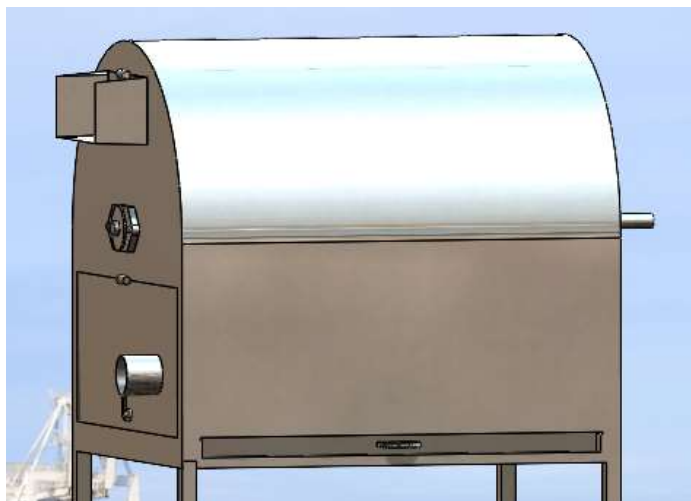


Figura 79. Eje de rotación

D.8 Escotilla de descarga del tambor

El cilindro perforado del tambor incorpora una escotilla de descarga, la cual permite retirar el café una vez finalizado el proceso de secado. Esta escotilla funciona como una abertura controlada en la superficie del tambor que facilita la salida del producto.

Durante el proceso de secado la escotilla permanece cerrada para evitar la pérdida de café o la alteración del flujo de aire dentro del sistema. Una vez terminado el secado, la escotilla se abre para permitir que el café salga del tambor de manera controlada.



Figura 80. Escotilla en el cilindro perforado

D.9 Bandeja deslizante de recolección

La estructura del sistema incorpora una bandeja deslizante y removible, ubicada en la parte inferior del tambor. Esta bandeja tiene la función de recolectar el café una vez que es descargado desde el interior del tambor.

Para realizar la descarga del producto, la bandeja se posiciona debajo de la escotilla del tambor y posteriormente se abre dicha escotilla. Al rotar ligeramente el tambor, el café seco cae por gravedad y es recolectado en la bandeja. Posteriormente, la bandeja puede retirarse fácilmente para vaciar el café seco, facilitando el manejo del producto.



Figura 81. Bandeja para la recolección de café

D.10 Compuerta de carga y descarga del café



Figura 82. Compuerta para carga del café

El sistema incluye una compuerta de acceso que permite introducir el café dentro del tambor antes de iniciar el proceso de secado. Esta compuerta facilita también la extracción del producto una vez finalizado el proceso.

La compuerta fue diseñada de manera que permita un cierre adecuado del sistema durante el funcionamiento, evitando pérdidas de aire caliente y garantizando la eficiencia del proceso de secado.

D.11 Estructura del soporte del sistema



Figura 83. Soporte del sistema

La estructura de soporte del sistema es el elemento encargado de sostener el tambor rotatorio y garantizar la estabilidad del conjunto durante el proceso de secado. Esta sirve como base para el montaje del tambor, el eje de rotación y el sistema de transmisión, asegurando la correcta alineación y operación de los componentes mecánicos.

Su función principal es soportar las cargas del sistema, incluyendo el peso del tambor, el café y los elementos de accionamiento, evitando vibraciones o desplazamientos que afecten su funcionamiento. Además, proporciona los puntos de apoyo necesarios para el eje, permitiendo una rotación estable.

La estructura también facilita la integración de componentes como el motor y la bandeja de recolección, ubicada en la parte inferior para la descarga del café. Asimismo, mantiene el tambor elevado, lo que mejora la operatividad, el acceso al sistema y la circulación del aire caliente.

En conjunto, garantiza la estabilidad mecánica, la correcta transmisión del movimiento y la integración funcional del sistema de secado.

Anexo E - Diseño y planos del colector solar

E.1 Diseño colector solar

El colector solar fue diseñado con el propósito de captar la energía proveniente de la radiación solar y transferirla al aire utilizado durante el proceso de secado del café. Para ello, inicialmente se desarrolló el modelado tridimensional de cada uno de los componentes del colector utilizando el software SolidWorks, lo que permitió definir con precisión las dimensiones, la disposición de los elementos y el recorrido del flujo de aire dentro del sistema.

El diseño del colector corresponde a un colector solar de aire, compuesto principalmente por una cubierta transparente, una superficie absorbente metálica y una estructura que permite la circulación controlada del aire. La cubierta transparente permite el ingreso de la radiación solar hacia el interior del colector, mientras que la superficie absorbente, fabricada en material metálico y pintada de color negro mate, fue diseñada para maximizar la absorción de energía térmica.

Adicionalmente, el diseño contempla elementos estructurales y materiales que permiten reducir las pérdidas de calor hacia el ambiente y mantener un flujo adecuado de aire dentro del colector. Durante la operación del sistema, el aire ambiente ingresa por la parte inferior del colector y, al entrar en contacto con la superficie absorbente calentada por la radiación solar, incrementa su temperatura. Posteriormente, este aire caliente es conducido hacia el tambor rotatorio mediante un sistema de ventilación, generando un flujo continuo que favorece la transferencia de calor y la evaporación de la humedad contenida en el grano de café.

Las dimensiones de la superficie absorbente y de la cubierta transparente del colector son de 98 cm × 74 cm, mientras que la estructura externa del colector, incluyendo el marco de madera, presenta dimensiones aproximadas de 1.00 m × 1.20 m. El colector fue diseñado con un solo canal de aire, lo que permite simplificar la construcción del sistema y facilitar el flujo directo del aire a través de la superficie absorbente.

E.2 Planos del colector solar

En esta sección se presentan los planos de diseño del colector solar utilizado en el sistema de secado. Estos planos fueron elaborados con el objetivo de definir las dimensiones, la

disposición de los componentes y la estructura del colector encargado de captar la radiación solar y transferir calor al aire utilizado en el proceso de secado.

El colector solar fue diseñado considerando criterios de eficiencia térmica, facilidad de construcción y compatibilidad con el sistema de secado desarrollado. En los planos se especifican las dimensiones principales del colector, la ubicación de la cubierta transparente, la superficie absorbente y los elementos estructurales que conforman la carcasa del sistema.

La superficie absorbente del colector está diseñada para maximizar la absorción de la radiación solar incidente. Para ello se emplea una lámina metálica pintada de color negro mate, lo cual favorece la captación de energía térmica y el aumento de la temperatura del aire que circula en el interior del colector.

Asimismo, los planos incluyen la disposición del sistema de entrada y salida de aire, el cual permite que el aire ambiente ingrese al colector, se caliente al entrar en contacto con la superficie absorbente y posteriormente sea conducido hacia el tambor rotatorio del secador.

Los planos presentados permiten visualizar la configuración geométrica del colector solar y constituyen una referencia para el proceso de fabricación y ensamblaje del sistema.

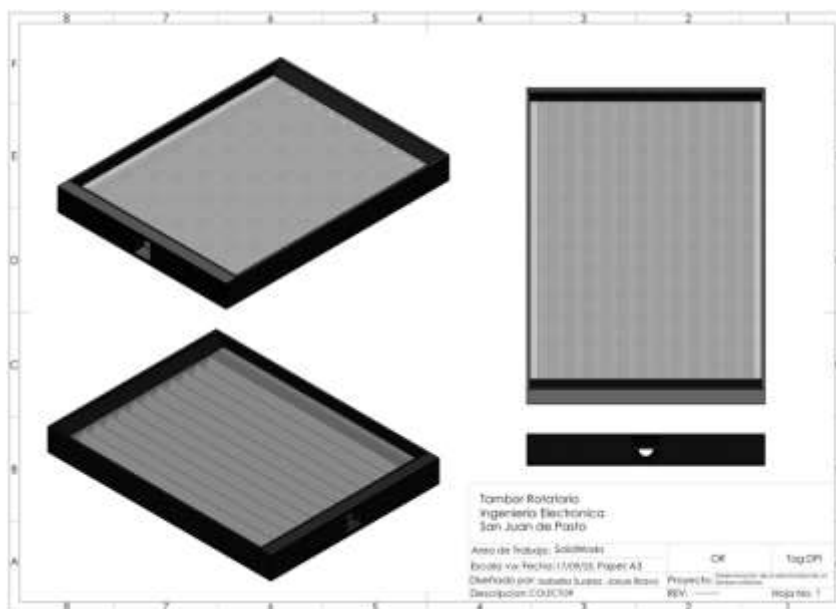


Figura 84. Plano del colector solar

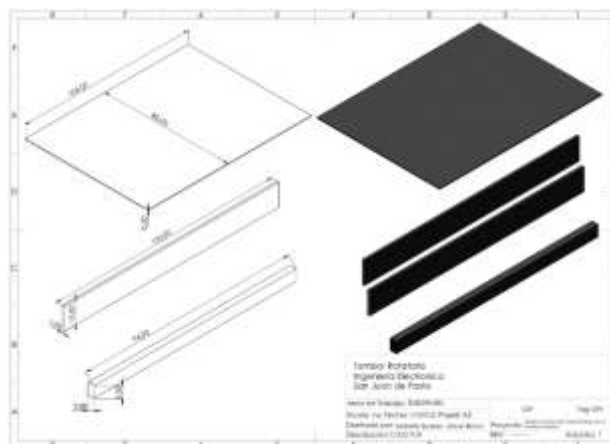


Figura 85. Plano de la base y estructura del colector solar

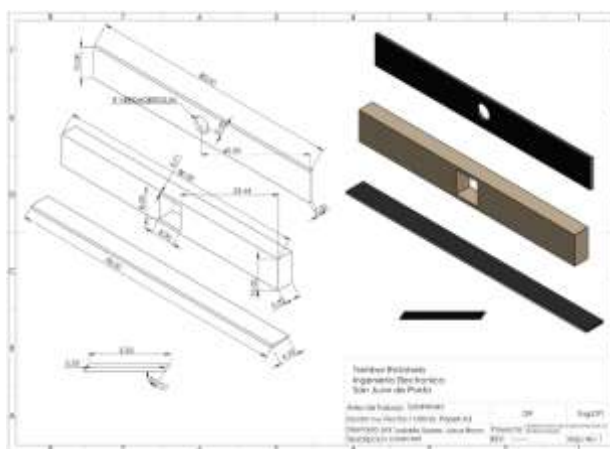


Figura 86. Plano de la salida, entrada y tapa del colector solar

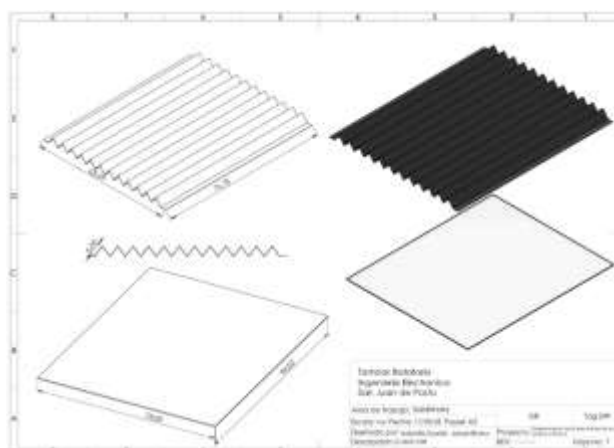


Figura 87. Plano de la lamina de zinc del colector solar

E.3 Estructura de madera

El diseño estructural del colector solar se desarrolló inicialmente en SolidWorks, permitiendo establecer las dimensiones de cada componente y su correcta integración dentro del sistema. La estructura fue concebida para proporcionar soporte mecánico a los elementos del colector y al mismo tiempo formar un canal interno que permita la circulación del aire.

La base del colector fue diseñada utilizando una lámina de MDF con dimensiones de 106 cm de largo, 80 cm de ancho y 0.5 cm de espesor, la cual funciona como plataforma estructural sobre la que se ensamblan los demás componentes del colector.



Figura 88. Lámina mdf

En los laterales del colector se diseñaron dos tablas de madera con dimensiones de 100 cm de largo, 1 cm de espesor y 10 cm de altura, las cuales conforman las paredes laterales del colector. Estas piezas permiten contener el flujo de aire dentro de la estructura y contribuyen a definir el volumen interno por donde circula el aire calentado.

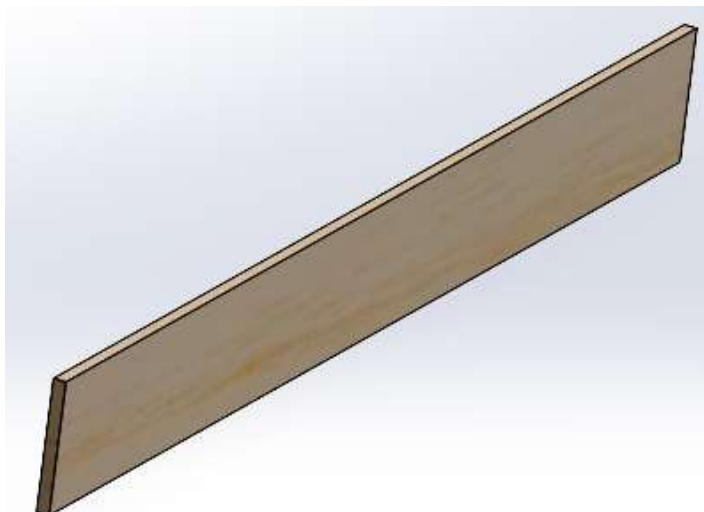


Figura 89. Lateral colector

Para la salida del aire caliente se diseñó una tabla de madera ubicada en la parte superior del colector, con dimensiones de 80 cm de largo, 1 cm de espesor y 10 cm de altura, en la cual se incorporó una abertura circular central de 5 cm de diámetro. Esta abertura permite la evacuación del aire calentado hacia el sistema de secado.

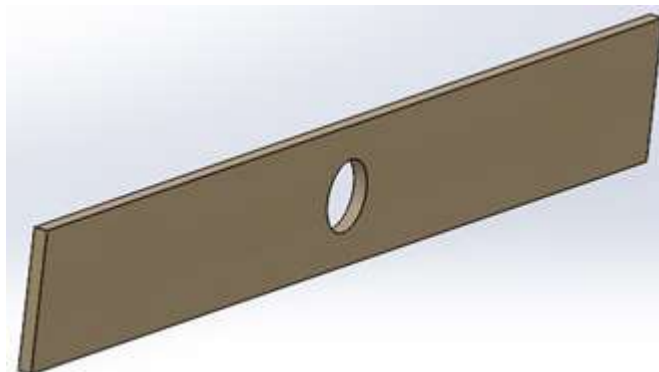


Figura 90. Salida de aire colector solar

En la parte inferior del colector se diseñó un listón de madera destinado a la entrada de aire. Este elemento también fue dimensionado para permitir la instalación de un ventilador de 12 V, encargado de impulsar el flujo de aire hacia el interior del colector. El listón presenta dimensiones de 80 cm de largo, 5 cm de ancho y 10 cm de altura, e incorpora una abertura cuadrada central de 8 cm × 8 cm, diseñada para el montaje del ventilador.

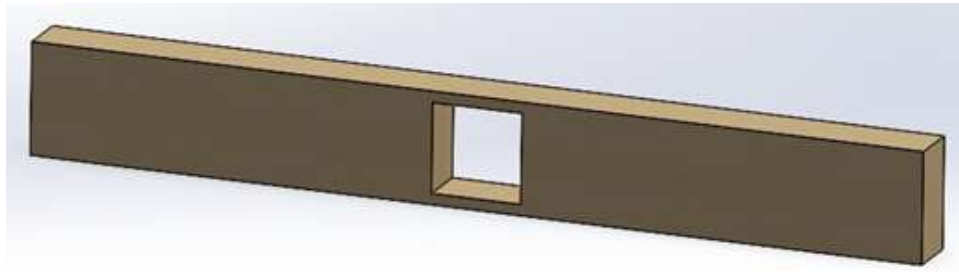


Figura 91. Entrada aire colector solar

Adicionalmente, el diseño incluye dos listones de madera con dimensiones de 94 cm de largo, 2.8 cm de ancho y 5 cm de altura, los cuales funcionan como soportes para el vidrio que cubre la parte superior del colector. Estos elementos permiten mantener una separación adecuada entre el vidrio y la base del sistema, generando el espacio necesario para la circulación del aire.

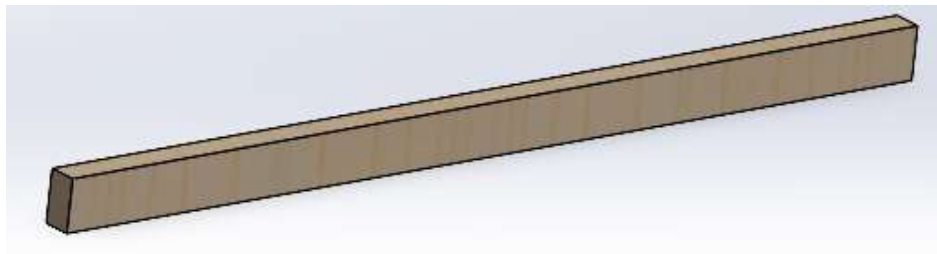


Figura 92. Liston soporte vidrio

Finalmente, se diseñaron dos tablas de MDF encargadas de dirigir el flujo de aire desde la entrada hasta la salida del colector. Estas piezas poseen dimensiones de 78 cm de largo, 5.33 cm de ancho y 5 cm de altura, y fueron diseñadas con cortes en sus extremos con un ángulo de 55.71° , lo que facilita su ajuste dentro de la estructura y contribuye a direccionar adecuadamente el flujo de aire en el interior del colector.

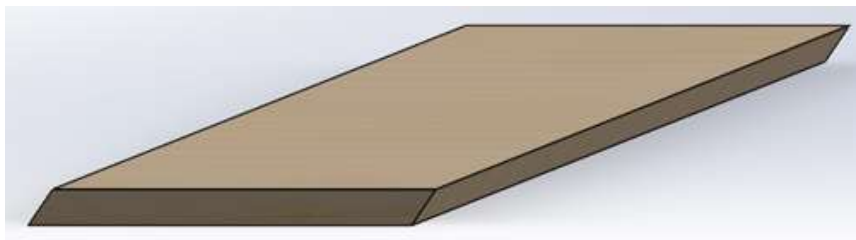


Figura 93. Tabla para dirigir el aire

E.4 Lámina de zinc

Dentro del diseño del colector solar se incorporó una lámina metálica absorbente, cuya función es captar la radiación solar incidente y transferir el calor al aire que circula en el interior del colector.

La lámina fue diseñada a partir de una lámina de zinc con espesor de 1 mm, con dimensiones iniciales de 94 cm de ancho por 196 cm de largo. Durante el proceso de diseño se planteó la incorporación de una geometría ondulada mediante una serie de dobleces a lo largo de la lámina.

Estos dobleces fueron diseñados con un ángulo aproximado de 53.13° , generando una configuración de secciones triangulares con una altura aproximada de 4 cm y una base de 6 cm. Esta geometría permite incrementar el área superficial de contacto entre el aire y la superficie metálica calentada, lo cual favorece el proceso de transferencia de calor dentro del colector.

Adicionalmente, durante el diseño se consideró que la altura de las ondulaciones no superara la altura de los listones que soportan el vidrio superior, garantizando así el correcto ensamblaje del sistema. Los dobleces fueron proyectados a lo largo del lado mayor de la lámina iniciando aproximadamente a 3 cm desde uno de sus bordes.

Como resultado del proceso de diseño y conformado, la lámina absorbente presenta dimensiones finales aproximadas de 94 cm de largo por 78 cm de ancho, lo que permite su correcta instalación dentro de la estructura del colector solar.



Figura 94. Lamina de zinc

E.5 Vidrio

El diseño del colector solar incluye una cubierta superior de vidrio cuya función principal es permitir el ingreso de la radiación solar y al mismo tiempo reducir las pérdidas de calor hacia el ambiente.

Para este propósito se seleccionó un vidrio con dimensiones de 94 cm de largo por 78 cm de ancho y un espesor de 5mm. Estas dimensiones fueron definidas durante el modelado del colector en SolidWorks, de manera que el vidrio pudiera apoyarse adecuadamente sobre los listones de madera diseñados como soporte estructural.

La incorporación del vidrio permite que la radiación solar atraviese la cubierta y sea absorbida por la lámina metálica ubicada en el interior del colector. Una vez calentada, esta lámina transfiere el calor al aire que circula dentro del sistema. Además, la cubierta de vidrio contribuye a generar un efecto invernadero dentro del colector, reduciendo la convección del aire caliente hacia el exterior y favoreciendo el aumento de la temperatura interna del sistema.

De esta manera, el vidrio no solo actúa como elemento protector de los componentes internos del colector, sino que también contribuye a mejorar la eficiencia térmica del diseño.

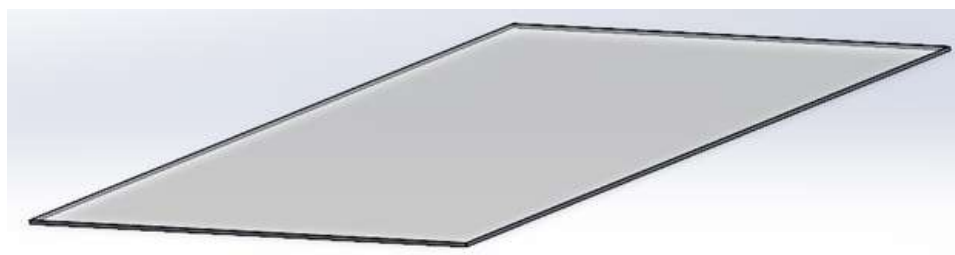


Figura 95. Vidrio

Anexo F - Diseño del subsistema fotovoltaico

F.1 Diseño fotovoltaico

El prototipo de secado de café incorpora un sistema fotovoltaico encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los diferentes componentes electrónicos y mecánicos del sistema. La integración de esta fuente de energía permite que el dispositivo opere de manera autónoma, aprovechando la radiación solar disponible y reduciendo la dependencia de fuentes energéticas convencionales.

El sistema fotovoltaico está compuesto principalmente por paneles solares, un banco de baterías y un inversor, los cuales trabajan de manera conjunta para generar, almacenar y distribuir la energía requerida por el prototipo. Esta configuración permite garantizar un suministro estable de energía para alimentar elementos como el microcontrolador, los sensores, la pantalla de visualización, el sistema de ventilación y los demás dispositivos electrónicos integrados en el sistema.

En primer lugar, los paneles solares fotovoltaicos se encargan de transformar la radiación solar en energía eléctrica en forma de corriente continua. Esta energía generada es utilizada para alimentar el sistema y también para cargar las baterías de almacenamiento.

Posteriormente, la energía producida es almacenada en un banco de baterías, el cual permite disponer de energía incluso cuando la radiación solar disminuye o durante periodos en los que el sistema continúa operando sin generación directa de energía solar. De esta manera se garantiza la continuidad del funcionamiento del prototipo durante las pruebas experimentales.

Finalmente, el sistema incorpora un inversor, cuya función es convertir la energía eléctrica almacenada en las baterías al nivel de tensión requerido por los dispositivos eléctricos del sistema. Este componente permite adaptar la energía generada por los paneles y almacenada en las baterías para su correcta utilización dentro del prototipo.

La integración del sistema fotovoltaico con el sistema de secado permite aprovechar una fuente de energía renovable, contribuyendo a mejorar la eficiencia energética del prototipo y reforzando el enfoque de sostenibilidad del proyecto.



Figura 96. Diagrama sistema fotovoltaico

F.2 Paneles solares

Los paneles solares fotovoltaicos constituyen el elemento encargado de transformar la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica, la cual es utilizada para alimentar el sistema de secado y para la carga del banco de baterías. Para el desarrollo del prototipo se emplearon cinco paneles solares conectados en serie, lo que permite incrementar el nivel de tensión del sistema y adaptarlo a los requerimientos de entrada del inversor utilizado.

La conexión en serie de los paneles se seleccionó con el objetivo de alcanzar un voltaje de operación adecuado para el sistema fotovoltaico, permitiendo que la energía generada pueda ser aprovechada de manera eficiente por el inversor y el sistema de carga de baterías. En este tipo de configuración, el voltaje total del sistema corresponde a la suma de los voltajes de cada panel, mientras que la corriente se mantiene constante.

El uso de múltiples paneles solares permite aumentar la capacidad de generación energética del sistema, garantizando que durante las horas de mayor radiación solar se disponga de suficiente energía para alimentar los dispositivos electrónicos del prototipo, así como para recargar el banco de baterías.

La selección de los paneles solares se realizó considerando parámetros fundamentales como la potencia nominal, el voltaje de operación y la corriente de salida, con el fin de asegurar la compatibilidad con el sistema de almacenamiento y con el inversor del sistema fotovoltaico. Estos criterios permiten garantizar un suministro energético adecuado para el funcionamiento continuo del sistema de monitoreo, ventilación y control implementado en el prototipo de secado de café.

	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Panel 4	Panel 5
Modelo	JHP50	JHP50	SM40	RI40	KC50T
Pmax (W)	50	50	40	40	54
Vmp (V)	17.4	17.4	17.33	17	17.4
Imp (A)	2.87	2.87	2.31	2.36	3.11
Voc (V)	20.8	20.8	21.51	21	21.7
Isc (A)	3.24	3.24	2.58	2.72	3.31

Figura 97. Datos de los paneles



Figura 98. Paneles solares Rampa

F.3 Baterías

El sistema fotovoltaico incorpora un banco de baterías encargado de almacenar la energía generada por los paneles solares, permitiendo que el sistema continúe operando incluso cuando la radiación solar disminuye o durante periodos de baja generación energética.

Para el desarrollo del sistema se utilizaron dos baterías selladas de plomo-ácido marca MTEK modelo MT121550, con una capacidad nominal de 12 V y 155 Ah cada una. Estas baterías están diseñadas para aplicaciones de uso cíclico y respaldo energético, lo que las hace

adecuadas para sistemas fotovoltaicos donde se requiere almacenamiento y suministro constante de energía.

Las baterías fueron conectadas en serie, lo que permite obtener un voltaje total de 24 V, compatible con el sistema de operación del inversor utilizado en el prototipo. Esta configuración permite aumentar el nivel de tensión del banco de almacenamiento manteniendo la misma capacidad en amperios-hora, lo cual facilita la alimentación de cargas eléctricas que operan a mayor voltaje.

Según las especificaciones del fabricante, las baterías presentan un rango de voltaje de carga en modo cíclico entre 14.4 V y 14.7 V, y un rango de voltaje de flotación entre 13.5 V y 13.8 V, parámetros que son gestionados automáticamente por el sistema de carga del inversor. Asimismo, la corriente inicial máxima de carga es inferior a 46.5 A, lo cual permite garantizar una operación segura y prolongar la vida útil del sistema de almacenamiento.

La elección de baterías selladas de plomo-ácido se fundamenta en su alta confiabilidad, bajo mantenimiento y buena capacidad de almacenamiento energético, características que las hacen ampliamente utilizadas en sistemas fotovoltaicos autónomos.



Figura 99. Baterías utilizadas en el sistema fotovoltaico

F.4 Inversor

El sistema fotovoltaico incorpora un inversor solar modelo PV3000, el cual cumple la función de gestionar el flujo de energía dentro del sistema y adaptar los niveles de tensión requeridos por los dispositivos eléctricos utilizados en el prototipo.

Este equipo integra múltiples funciones dentro de un solo dispositivo, incluyendo inversor de potencia, controlador de carga solar y cargador de baterías, lo que permite simplificar la arquitectura del sistema energético. El inversor tiene una potencia nominal de 1500 W, lo cual

resulta suficiente para alimentar los dispositivos electrónicos y el sistema de ventilación utilizados en el prototipo.

El equipo opera con un sistema de baterías de 24 VDC, compatible con la configuración del banco de baterías implementado. En cuanto a la entrada de energía solar, el inversor admite un rango de voltaje MPPT entre 30 V y 130 V, con un voltaje máximo de circuito abierto de 145 V, lo que permite una adecuada adaptación al sistema de paneles solares conectados en serie.

En términos de salida eléctrica, el inversor proporciona 120 V AC a 60 Hz, lo cual permite alimentar dispositivos eléctricos que operan con corriente alterna. Además, el equipo incluye un controlador de carga solar integrado con una corriente nominal de hasta 80A, encargado de regular la carga del banco de baterías y proteger el sistema contra sobrecargas o variaciones de voltaje.

La selección de este inversor se realizó considerando su compatibilidad con sistemas fotovoltaicos de 24 V, su capacidad de regulación mediante tecnología MPPT y su potencia de salida, características que permiten garantizar una gestión eficiente de la energía generada por los paneles solares y almacenada en el banco de baterías.



Figura 100. Inversor utilizado en el sistema fotovoltaico

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 28 de abril del 2026

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto


Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Determinación de la efectividad de un tambor rotatorio para el secado de café basado en un colector solar y energizado por paneles solares, presentado por el (los) autor(es) Isabella Suarez Lopez y Josué Samir Bravo Coral del Programa Académico Ingeniería Electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,




Camilo Arturo Lagos Mora
12997039
Ingeniera Electrónica
3008198104
calagos@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>TEL: 800.109.337-7 BOGOTÁ, COLOMBIA</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Isabella Suarez Lopez	Documento de identidad: 1004234453
Correo electrónico: isabelasuarezlopez@gmail.com	Número de contacto: 3104586697
Nombres y apellidos del autor: Josué Samir Bravo Coral	Documento de identidad: 1233192267
Correo electrónico: samirbravojosuec@gmail.com	Número de contacto: 3108010574
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: Camilo Arturo Lagos Mora	Documento de identidad: 12997039
Correo electrónico: calagos@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3008198104
Título del trabajo de grado: Determinación de la efectividad de un tambor rotatorio para el secado de café basado en un colector solar y energizado por paneles solares	
Facultad y Programa Académico: Facultad de Ingeniería, programa Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>TEL: 800.109.337-7</small> <small>INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

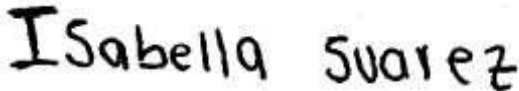

- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 28 días del mes de abril del año 2026

	
Nombre del autor: Isabella Suarez Lopez	Nombre del autor: Josué Samir Bravo Coral
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:



UNIVERSIDAD
CESMAG
TEL: 800.109.337-7
VIGILADO MINEDUCACIÓN

**AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE
GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN
REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

CÓDIGO: AAC-BL-FR-031

VERSIÓN: 1

FECHA: 09/JUN/2022

Nombre del asesor: Camilo Arturo Lagos Mora