

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Propuesta de mejora basada en el análisis del algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar para controlar la temperatura, humedad y masa del café natural en una cooperativa cafetalera

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

Elaborado por

Chris Jimmy Martínez Cárdenas

▀ [0009-0001-5325-8617](#)

Asesor

M.Sc. José Fortunato Oviden Martínez

 [0000-0003-2643-327X](#)

LIMA – PERÚ

2023

A mis padres, por ser mi soporte absoluto en mi vida
Y a la familia Engitronic, por motivarme constantemente.

RESUMEN

El secado del café consiste en reducir el contenido de humedad del grano, este proceso es determinante para su calidad final, propiedades organolépticas óptimas son valoradas en el mercado, sin embargo, el café peruano no mantiene estas características debido a la limitada infraestructura de postcosecha. El secado del café natural o en vía seca presenta períodos más largos respecto a las otras vías debido a que esta conserva todas sus capas, lo que dificulta la extracción de la humedad del grano. El prototipo de secador solar está conformado por un Controlador Lógico Programable (PLC), módulo de Internet de las Cosas (IoT), sensores de temperatura, sensor de humedad ambiental, sensores de velocidad de aire, sensores de radiación, balanzas y Variadores de Frecuencia (VFD). Se configuró el módulo IoT para enviar los datos de los sensores a la nube Siemens Insights Hub, se descargaron y procesaron los datos para tres períodos. Se analizó el algoritmo y los datos para una semana sin café, y dos procesos de secado de cafés naturales. Se propuso una mejora en el algoritmo de control considerando la temperatura, humedad ambiental y masa de café natural. También se determinó la ubicación adecuada de los sensores y las relaciones entre las variables involucradas en el proceso de secado. Finalmente, se establecieron las condiciones ambientales y operativas para un correcto proceso de secado de cafés.

Palabras clave: algoritmo, análisis de datos, secador solar, control, temperatura, humedad ambiental, masa de café natural, cooperativa cafetalera

ABSTRACT

Coffee drying consists of reducing the moisture content of the grain, this process is decisive for its final quality, optimal organoleptic properties are valued in the market, however, Peruvian coffee does not maintain these characteristics due to the limited post-harvest infrastructure. Natural coffee drying or dry processing has longer periods compared to the other methods because it preserves all its tissues, which makes it difficult to extract moisture from the grain. The solar dryer prototype is made up of a Programmable Logic Controller (PLC), Internet of Things (IoT) module, temperature sensors, ambient humidity sensor, air speed sensors, radiation sensors, scales and Variable Frequency Drives (VFD). The IoT module was configured to send the sensor data to the Siemens Insights Hub cloud, the data for three periods was downloaded and processed. The algorithm and data were analyzed for a week without coffee, and two natural coffee drying processes. An improvement in the control algorithm was proposed considering temperature, environmental humidity and natural coffee mass. The appropriate location of the sensors and the correlations between the variables involved in the drying process were also established. Finally, the environmental conditions and considerations for a correct coffee drying process were settled.

Keywords: algorithm, data analysis, solar dryer, control, temperature, environmental humidity, natural coffee mass, coffee cooperative

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales al Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico e Innovación – ProInnovate, a la Cooperativa Agraria Cafetalera La Florida (CAC La Florida) y a la Universidad Nacional de Ingeniería por apoyar el presente trabajo de investigación como parte del proyecto con código PIEC1-6-P-251-062-20.

ÍNDICE

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XV
PRÓLOGO	xvi
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Descripción del problema de investigación	2
1.3. Objetivos del estudio.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Antecedentes investigativos	6
1.4.1. Antecedentes internacionales	6
1.4.2. Antecedentes nacionales	10
1.4.3. Antecedentes locales	14
CAPÍTULO II MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL	16
2.1. Marco teórico	16
2.1.1. Estructura del café	16
2.1.2. Procesos del café	18
2.1.3. Proceso de secado de café.....	19
2.1.4. Secado de café natural.....	21
2.1.5. Determinación de la humedad del café.....	21

2.1.6.	Calidad del café.....	24
2.1.7.	Variedades del café.....	25
2.1.8.	Conceptos de control en procesos térmicos.....	26
2.1.9.	Manufactura inteligente en la Industria 4.0	27
2.2.	Marco conceptual.....	29
CAPÍTULO III HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES		31
3.1.	Hipótesis general.....	31
3.2.	Hipótesis específicas.....	31
3.3.	Operacionalización de variables.....	32
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		33
4.1.	Tipo y diseño de la investigación.....	33
4.2.	Unidad de análisis.....	33
4.3.	Matriz de consistencia.....	36
CAPÍTULO V DESARROLLO DE LA TESIS		38
5.1.	Recolección de datos.....	38
5.1.1.	Instalación del sensor de humedad ambiental.....	38
5.1.2.	Implementación de la nube IoT	39
5.1.3.	Datos en el período sin café.....	45
5.1.4.	Datos del primer proceso de secado	46
5.1.5.	Datos del segundo proceso de secado.....	48
5.2.	Procesamiento de datos.....	50
5.2.1.	Procesamiento en el período sin café.....	50
5.2.2.	Procesamiento de los procesos de secado	52
5.3.	Análisis de la información	53

5.3.1.	Ubicación de sensores y actuadores en el secador	53
5.3.2.	Algoritmo de control inicial.....	55
5.3.3.	Análisis en el período sin café.....	57
5.3.4.	Análisis del primer proceso de secado.....	75
5.3.5.	Propuesta del algoritmo de control.....	97
5.3.6.	Análisis del segundo proceso de secado.....	104
CAPÍTULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		122
6.1.	Análisis de resultados.....	122
6.2.	Discusión de resultados.....	126
6.3.	Contrastación de las hipótesis.....	127
CONCLUSIONES		129
RECOMENDACIONES.....		132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		134
ANEXOS		139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Cronograma del sistema de secado de café.....	9
Figura 2.	Relación entre la humedad de grano de café en % y el tiempo en días para el secado tradicional y secado solar autónomo indirecto a temperaturas de 30, 40 y 50 °C.....	12
Figura 3.	Tejidos que conforman el cerezo de café.	17
Figura 4.	Ubicación de la canastilla en el secador.....	23
Figura 5.	Mapa político administrativo del departamento de Junín.....	34
Figura 6.	Prototipo de secador solar de la CAC La Florida.	35
Figura 7.	Sensor de humedad ambiental RHT-WM instalado.....	38
Figura 8.	Configuración de jumpers internos e instalación eléctrica del sensor de humedad ambiental.	39
Figura 9.	Topología de red del prototipo de secador solar.....	40
Figura 10.	Conexión de nodos para la implementación de la nube.....	43
Figura 11.	Configuración del nodo función.	43
Figura 12.	Aplicación Monitor de Insights Hub.	45
Figura 13.	Arbusto de cafeto con cafés en distintos grados de maduración.....	46
Figura 14.	Cafés prefermentados en bolsa.	49
Figura 15.	Datos de los aspectos para el día 6 de junio de 2023.	51
Figura 16.	Datos procesados desde el 6 al 12 de junio de 2023.	52
Figura 17.	Datos de los aspectos para la semana del 15 al 21 de junio de 2023.	52
Figura 18.	Datos procesados desde el 15 de junio al 5 de julio de 2023.	53

Figura 19.	Ubicación de sensores y actuadores en el secador solar de café.	54
Figura 20.	Diagrama de los bloques de programa principales.....	56
Figura 21.	Diagrama del algoritmo de control inicial para una zona del prototipo de secador solar.	57
Figura 22.	Temperaturas de la zona 1 el 6 de junio de 2023.	59
Figura 23.	Temperaturas de la zona 2 el 6 de junio de 2023.	60
Figura 24.	Diagrama de cajas y bigotes de los sensores de temperatura 1, 5, 7 y 11 del 6 al 12 de junio de 2023.	61
Figura 25.	Diagrama de cajas y bigotes de los sensores de temperatura 2, 6, 8 y 12 del 6 al 12 de junio de 2023.	62
Figura 26.	Diagrama de cajas y bigotes de los sensores de temperatura 3, 4, 9 y 10 del 6 al 12 de junio de 2023.	63
Figura 27.	Diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado por los sensores de temperatura para la zona 1 y 2 el 6 de junio de 2023.	64
Figura 28.	Diagrama de cajas y bigotes de la diferencia de temperatura para cada zona del 6 al 12 de junio de 2023.....	65
Figura 29.	Temperatura promedio para ambas zonas en el 6 de junio de 2023.	66
Figura 30.	Diagrama de cajas y bigotes de las temperaturas promedio para ambas zonas del 6 al 12 de junio de 2023.	67
Figura 31.	Matriz de correlación para las temperaturas y su promedio en la zona 1 del 6 al 12 de junio de 2023.	68

Figura 32.	Matriz de correlación para las temperaturas y su promedio en la zona 2 del 6 al 12 de junio de 2023.	69
Figura 33.	Temperaturas 3, 4, 9, 10 y promedios de ambas zonas el 6 de junio de 2023.	70
Figura 34.	Diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado por los sensores de temperatura 3, 4, 9, 10 y promedios de ambas zonas el 6 de junio de 2023.	71
Figura 35.	Radiación 1 y 2 el 6 de junio de 2023.	72
Figura 36.	Radiación 1 y 2 en la semana del 6 al 12 de junio de 2023 desde las 00 h hasta las 09 h.	73
Figura 37.	Radiación 1 y 2 en la semana del 6 al 12 de junio de 2023 desde las 14 h hasta las 24 h.	74
Figura 38.	Radiación 2 escalada y temperatura promedio de la zona 1 el 6 de junio de 2023.	75
Figura 39.	Diagrama de cajas y bigotes de la temperatura promedio de la zona 1 en el primer período de secado.	77
Figura 40.	Diagrama de cajas y bigotes de la humedad ambiental en el primer período de secado.	78
Figura 41.	Radiación 1 y 2 en el primer período de secado desde las 00 h hasta las 09 h.	79
Figura 42.	Radiación 1 y 2 en el primer período de secado desde las 14 h hasta las 24 h.	80

Figura 43.	Radiación 2 escalada y radiación 1 el 30 de junio de 2023.....	81
Figura 44.	Radiación 2 escalada, humedad ambiental y temperatura promedio de la zona 1 el 30 de junio de 2023.....	82
Figura 45.	Humedad ambiental y temperaturas promedio de ambas zonas el 30 de junio de 2023.....	83
Figura 46.	Radiación 2 escalada, humedad ambiental y temperatura promedio de la zona 1 el 15 de junio de 2023.....	84
Figura 47.	Humedad ambiental y temperaturas promedio de ambas zonas el 16 de junio de 2023.....	85
Figura 48.	Radiaciones y potencia del motor 1 el 18 de junio de 2023.	86
Figura 49.	Radiaciones y potencia del motor 1 el 19 de junio de 2023.	87
Figura 50.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 19 de junio de 2023.	88
Figura 51.	Velocidad de aire en los cuatro sensores el 19 de junio de 2023.....	89
Figura 52.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 y 3 el 4 de julio de 2023.....	90
Figura 53.	Matriz de correlación para las potencias de los motores y las velocidades de aire el 4 de julio de 2023.	91
Figura 54.	Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas a lo largo del primer período de secado.	92
Figura 55.	Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas el 16 de junio de 2023.....	93

Figura 56.	Variación de la masa de la muestra en la balanza 3 del 29 de junio al 5 de julio de 2023.	94
Figura 57.	Variación estimada del contenido de humedad estimado en el primer período de secado.	96
Figura 58.	Comparación de las tendencias exponencial y polinómica de grado 2 para el contenido de humedad estimado en el primer período de secado.....	97
Figura 59.	Pantalla HMI propuesta para el control manual de motores.	98
Figura 60.	Diagrama en escalera del criterio de radiación.....	99
Figura 61.	Diagrama en escalera del criterio de temperatura.	100
Figura 62.	Diagrama en escalera del encendido por tiempo.	101
Figura 63.	Diagrama de variación de las variables e intervalos de control.....	103
Figura 64.	Diagrama de flujo del algoritmo de control propuesto.	104
Figura 65.	Diagrama de cajas y bigotes de la temperatura promedio de la zona 1 en el segundo período de secado.....	106
Figura 66.	Diagrama de cajas y bigotes de la humedad ambiental en el segundo período de secado.	107
Figura 67.	Radiación 1 y 2 en el segundo período de secado.	108
Figura 68.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 7 de julio de 2023.	109
Figura 69.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 8 de julio de 2023.	110

Figura 70.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 10 de julio de 2023.	111
Figura 71.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 11 de julio de 2023.	112
Figura 72.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 21 de julio de 2023.	113
Figura 73.	Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas, potencia del motor 1 escalada y radiación 2 escalada el 25 de julio de 2023.	114
Figura 74.	Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas a lo largo del segundo período de secado.	115
Figura 75.	Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas el 8 de julio de 2023.	116
Figura 76.	Variación de la masa de la muestra en la balanza 3 del 21 al 27 de julio de 2023.	117
Figura 77.	Variación de las masas de las muestras en las balanzas 1, 2 y 3 para el 14 y 15 de julio de 2023.	118
Figura 78.	Variación de la masa de la muestra en la balanza 3 para el 21, 22 y 23 de julio de 2023.	119
Figura 79.	Variación estimada del contenido de humedad estimado en el segundo período de secado.	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Procesos involucrados en cada método de beneficio del café.	19
Tabla 2.	Resumen de características de las variedades de café.	26
Tabla 3.	Principales equipos presentes en el prototipo de secador solar.	36
Tabla 4.	Matriz de consistencia de la investigación "Propuesta de mejora basada en el análisis del algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar para controlar la temperatura, humedad y masa del café natural en una cooperativa cafetalera"	37
Tabla 5.	Aspectos y variables creados.	41
Tabla 6.	Tipo de activo creado.	42
Tabla 7.	Activos creados.	42
Tabla 8.	Direcciones, nombres e identificadores de las variables.	44
Tabla 9.	Masa inicial de café en balanzas para el primer proceso de secado.	47
Tabla 10.	Masa inicial de café en balanzas para el segundo proceso de secado. ...	49
Tabla 11.	Ubicación de sensores según el nivel, cama y zona.	55
Tabla 12.	Cantidad de puntos de datos en el período sin café.	58
Tabla 13.	Cantidad de puntos de datos en el primer período de secado.	76
Tabla 14.	Masa de la muestra en la balanza 2 a las 16 h en el primer período de secado.	95
Tabla 15.	Cantidad de puntos de datos en el segundo período de secado.	105
Tabla 16.	Masa de la muestra en la balanza 3 a las 16 h en el segundo período de secado.	120
Tabla 17.	Características relacionadas al sistema IoT en los procesos analizados.	123

PRÓLOGO

En el Capítulo I de la presente investigación, se explica el alcance de la tesis en base a cómo se realizará la investigación para resolver la realidad problemática actual. Se describe la realidad problemática relacionada principalmente a la inconsistente calidad del café debido a condiciones inadecuadas en el secado. Se plantea el problema general, los problemas específicos, el objetivo general y los objetivos específicos. Al final del capítulo, se resumen antecedentes investigativos relacionados en el ámbito internacional y nacional.

En el Capítulo II, se describe el marco teórico en forma de resúmenes de investigaciones importantes relacionadas al café, como lo son su estructura, sus procesos, el proceso de secado, el café natural, la determinación de la humedad, la calidad y las variedades, también se revisan conceptos de control de procesos térmicos y manufactura inteligente. Al final del capítulo, se presenta el marco conceptual con la interpretación de diversos términos según la presente investigación.

En el Capítulo III, se plantea la hipótesis general y las hipótesis específicas. Al final del capítulo, se realiza la operacionalización de variables donde se identifica la variable dependiente, la variable independiente y los indicadores de la variable independiente.

En el Capítulo IV, se describe metodológicamente el tipo y diseño de la presente investigación, además se especifica la unidad de análisis describiendo detalladamente las características del prototipo de secador solar. Al final del capítulo,

se plantea la matriz de consistencia donde se organizan los problemas, objetivos, hipótesis, variables, indicadores e instrumentos de recolección de datos.

En el Capítulo V, se desarrolla la tesis desde la instalación del sensor de humedad. Se detalla la configuración del sistema IoT para la recolección de datos de los sensores en tres períodos. En el primer período se analizaron los datos sin café, en los siguientes se analizaron los datos con una carga de más de 100 kg de café. También se analizó el algoritmo de control y se propuso una mejora.

En el Capítulo VI, se analizan los resultados obtenidos en los tres períodos. Se discuten los resultados obtenidos en comparación con otras investigaciones y se contrastan las hipótesis con los resultados obtenidos.

Finalmente, se presentaron las conclusiones en base al cumplimiento de los objetivos de la investigación, se detallaron las recomendaciones para futuras investigaciones y se adjuntaron los anexos con los datos recolectados.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El correcto proceso de secado de café determina una buena calidad en la bebida, un exceso de contenido de humedad al final de este proceso produce presencia de moho en el período de almacenamiento. Un defecto de contenido de humedad final reduce la masa total de los granos, por lo que adquieren un menor valor sin aumentar su calidad. A pesar de que el contenido de humedad final sea el adecuado, si el secado se realizó de forma brusca, el interior del grano permanece húmedo, por lo tanto, crece moho en los días posteriores. La presencia de moho afecta negativamente la calidad del café debido a que produce el defecto fenol, detectado por los catadores al momento de calificar la puntuación del café.

La mayor parte de la producción cafetalera está destinada a los cafés lavados, sin embargo, los cafés naturales de calidad son más valorados y escasos en el mercado nacional e internacional. Con el objetivo de obtener la mayor calidad, en su cosecha

se utilizan cerezos seleccionados maduros de color rojizo de las zonas medias o altas y de variedades especiales. Las características adecuadas de temperatura, humedad ambiental y tiempo de secado para los cafés naturales son distintos en comparación con los cafés lavados. Las precipitaciones y el exceso de radiación solar directa afectan el proceso de secado, por esta razón, es importante una adecuada infraestructura postcosecha.

El rol de la presente investigación es el de resolver la realidad problemática actual, al analizar el algoritmo y los datos del prototipo de secador solar para controlar la temperatura, humedad ambiental y la masa de cafés naturales. La justificación de la presente investigación se basa en el beneficio de las cooperativas cafetaleras que procesen café natural debido a que se obtendrá una mejor calidad al controlar efectivamente las variables.

1.2. Descripción del problema de investigación

Uno de los objetivos fundamentales al implementar las buenas prácticas en la etapa de postcosecha de granos es el de minimizar las pérdidas de calidad, sin embargo, las temperaturas excesivas en el proceso de secado aumentan el riesgo de afectar la calidad de los granos. Otro parámetro crítico que afecta la calidad del grano es la elevada tasa de secado, la delimitación de estos parámetros depende de la clase de grano y su utilización final (Abadía et al., 2013).

Según Borém et al. (2018), la falta de cuidado en la cosecha y el secado del café, producen en la vía seca menores calidades de bebida en comparación con la vía húmeda. El alto contenido de azúcar en el mesocarpio dificulta la velocidad de secado

e incrementa los riesgos de fermentos. Secar el café natural a una temperatura de 45 °C produce un daño térmico que reduce la calidad de la bebida. Secar el café natural a una temperatura de 35 °C con una alta tasa de secado, reduce la calidad sensorial. La bebida de café presenta un sabor rancio cuando las temperaturas de secado son demasiado altas debido a que se producen daños estructurales en la semilla del café, esto afecta de forma negativa a su calidad. De la misma forma, la calidad también resulta afectada negativamente por el sabor a vinagre a causa de un secado a bajas temperaturas debido a fermentaciones indeseadas (Henao, 2016).

El café peruano cuenta con una limitada capacidad para mantener el mismo nivel de calidad sensorial en taza, requerida por los consumidores en los mercados de cafés especiales. La limitada infraestructura de postcosecha, especialmente en el proceso de secado, es una de las principales razones que explican su inconsistencia. El secado del grano de café a la intemperie produce riesgos de contaminación, exposición a lluvias, elevada humedad y presencia de hongos. (DS N° 010-2019-MINAGRI).

De acuerdo a la Guía de Implementación de la Norma Técnica Peruana NTP 209.312:2020 (2020), un inadecuado proceso de secado, fase final y crítica, afecta la calidad e inocuidad de la bebida de café. Cuando la actividad de agua en los granos de café está entre los valores 0,80 y 0,95, se generan condiciones propicias para el desarrollo de hongos que producen Ocratoxina A (OTA), un metabólico fúngico tóxico.

Largo (2020) concluyó que, en los sistemas de secado artesanales, los ácidos grasos y sacarosa, compuestos químicos importantes en la formación de sabor y aroma,

disminuyen significativamente debido al prolongado tiempo de secado al sol. Las condiciones ambientales como precipitaciones, baja energía solar disponible y alta nubosidad generan largos períodos de secado de café. En la noche, se presentan pausas prolongadas en el proceso de secado de café lo que influye negativamente en su calidad.

El proceso de secado del café natural requiere entre 10 y 21 días, más tiempo en comparación con el secado del café lavado. El mucílago, que no es removido en la vía seca, es una capa muy higroscópica la cual produce un alto riesgo de fermentación secundaria. Los cafés naturales presentan frecuentemente defectos de color semejantes al verde, moho y tierra (Haile & Kang, 2019).

De acuerdo a Bawa et al. (2023), un rastrillaje ineficiente en el proceso de secado causa la presencia de moho, los trabajadores experimentan fatiga al realizar este trabajo debido a la exposición directa al sol. Temperaturas no óptimas extienden el tiempo de secado, retardar este proceso produce fermentación, lo que afecta negativamente a la calidad del café.

El secado de café es afectado por la disponibilidad de agua sus granos, la cual resulta influenciada por su grado de maduración. Se produce un deterioro del producto al secar granos con un desarrollo heterogéneo debido a que se genera un secado no uniforme. Una reducción acelerada de actividad de agua produce un deterioro en los granos inmaduros (Velásquez et al., 2020).

Situmorang et al. (2023) indica que, en una cámara de secado de café, cuando el contenido de agua de un material es bajo, la tasa de secado se satura a una

temperatura y velocidad de aire constantes. Una velocidad de aire baja no es suficiente para secar café con alto contenido de humedad. La difusión del agua desde el centro del material en dirección a la superficie es lenta en cafés con un bajo contenido de agua cuando no hay un flujo de aire. Secar el café natural a una temperatura mayor de 45° daña la calidad del café y cambia a color negro los cafés inmaduros, lo que reduce su valor en el mercado.

Por lo tanto, la formulación del problema general de la presente investigación es la siguiente:

¿En qué medida un inadecuado algoritmo de control en un prototipo de secador solar influye negativamente en el control de la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural en una cooperativa cafetalera?

A continuación, se formulan los problemas específicos de la presente investigación:

¿De qué forma la ubicación de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en un prototipo de secador solar influye en la representación de los parámetros del proceso de secado del café natural?

¿De qué forma las relaciones entre las variables registradas en un prototipo de secador solar influyen en el comportamiento del proceso de secado del café natural?

¿De qué forma las condiciones ambientales y operativas en un prototipo de secador solar influyen en el avance del proceso de secado del café natural?

1.3. Objetivos del estudio

Se presenta el objetivo general y objetivos específicos de la presente investigación.

1.3.1. Objetivo general

Analizar el algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar y proponer una mejora para el correcto control de la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural en una cooperativa cafetalera.

1.3.2. Objetivos específicos

Determinar la ubicación adecuada de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en un prototipo de secador solar para la correcta representación de los parámetros del proceso de secado del café natural.

Determinar las relaciones entre las variables registradas en un prototipo de secador solar para establecer el comportamiento del proceso de secado del café natural.

Determinar las condiciones ambientales y operativas adecuadas en un prototipo de secador solar para mejorar el avance del proceso de secado del café natural.

1.4. Antecedentes investigativos

Los antecedentes investigativos relacionados a la presente investigación se organizan en los ámbitos internacional, nacional y local.

1.4.1. Antecedentes internacionales

Vásquez, L. C. & Cuervo, G. (2022), en el trabajo de grado titulado “Diseño de un secador de café con control automático energizado con un sistema solar fotovoltaico para zonas rurales del departamento de Antioquia”, establecen que los factores más relevantes que influyen en el precio del café, a nivel nacional e internacional, son la humedad contenida, la calidad del café y la forma de secado. El diseño del secador de café pergamino con control automático está basado en la cantidad de café a secar,

la radiación solar y el porcentaje de humedad contenida; estos parámetros determinaron el dimensionamiento y selección de componentes. Realizan una evaluación de parámetros, tales como, el espacio requerido, la contaminación, el costo y la eficiencia para determinar que la estructura idónea es la del secador solar en lámina y vidrio. El secador propuesto cuenta con resistencias eléctricas y un sistema de ventilación, ambos energizados por el sistema solar fotovoltaico, estos componentes se seleccionaron debido a un balance termodinámico. Los autores proponen una mejora en el secado de café, enfocándose en el sistema fotovoltaico y bajos costos, sin embargo, no se logra implementar ni demostrar la conservación o mejora de la calidad del café. Tampoco se analiza el algoritmo necesario para el correcto funcionamiento del sistema, a pesar de ello, se enfatiza en la importancia de establecer un control con una variable más que la humedad, como lo es la temperatura.

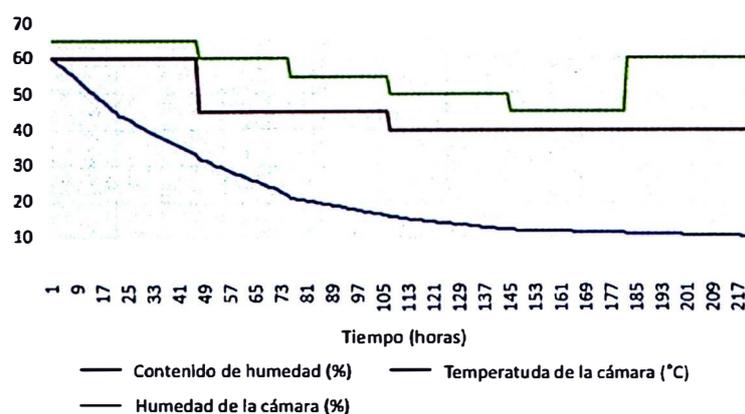
López A., Osorio, C. & Taborda, D. (2022), en el trabajo de grado titulado "Implementación de control lógico programable para maquina secadora de café de nivel personal", desarrollan una máquina secadora de café de nivel personal utilizando el hardware controlador Amp1-G. Propusieron una estructura de bajo peso utilizando perfiles aluminio; seleccionaron el motor, sensor de humedad y sensor de temperatura. Consideran un proceso que inicia con una señal y termina cuando el operario verifique que el café tenga una humedad entre 10 y 12%, de forma que se garantice la mejor calidad. Sostienen un algoritmo de control enfocado en la temperatura, si el valor es menor o igual a 50 °C, entonces los ventiladores y la

resistencia se encienden durante 5 minutos, al terminar el tiempo, si la temperatura supera el valor umbral, entonces los actuadores no se encienden, este ciclo se repite constantemente. Los autores proponen un algoritmo de control sencillo enfocándose en la temperatura máxima como límite, sin embargo, el sensor de humedad solo determina el fin del proceso y no interviene en el secado. Tampoco se logra demostrar la conservación o mejora de la calidad del café, no se utiliza energía solar y la capacidad está limitada a 5 kilogramos de café por proceso de secado.

Situmorang, Z., & Wardoyo, R. (2023), en el artículo titulado "Extended Fuzzy Rule Suram for Coffee Drying System", proponen utilizar el algoritmo de la regla difusa sombría extendida que agrega dos variables adicionales relacionadas a la velocidad del viento debido a que afecta la energía capturada por el colector. Se observa en la Figura 1., que el secado de café cuenta con un cronograma de secado en función del contenido de humedad de los granos, de esta forma se establecen los valores de temperatura y humedad de la cámara. El objetivo de cada proceso es optimizar el tiempo y la energía disponible al utilizar al máximo la energía solar disponible para reducir la calefacción eléctrica. El algoritmo de la regla difusa sombría se utiliza en el secado de café Arábica modificando las funciones de membresía triangulares y trapezoidales en el rango de 0,5 a 1. Realizan el proceso de fusificación para la temperatura ambiental, el cambio de la temperatura ambiental, la humedad ambiental y el cambio de la humedad ambiental. Los parámetros de salida son las compuertas, el calefactor y el aspersor; estos se activan y desactivan por diversos tiempos según las condiciones de la cámara en humedad y temperatura. Estos

parámetros cuentan con 16 condiciones de funcionamiento divididas en dos grupos de 8 a velocidades de viento superiores e inferiores a $2,8 \text{ m/s}$. El algoritmo de control para la cámara de secado inicia ingresando el contenido de humedad inicial de los granos de café y según el cronograma de secado determina la temperatura y humedad necesarias en la cámara. Si la temperatura es menor, se activa el calefactor hasta alcanzar su valor de operación, luego inicia el control con lógica difusa según la condición de velocidad de viento. El proceso termina cuando se completa el cronograma o se alcanza el contenido de humedad de grano de café deseado, el tiempo entre mediciones es de 5 minutos. Los autores concluyen que el prototipo utiliza el 40,86% de la energía solar requerida y reducen el tiempo de secado de 21 a 7 días considerando múltiples variables internas y externas; sin embargo, no se evalúa la calidad del café luego del proceso y la capacidad del prototipo solo es de 100 kilogramos.

Figura 1. Cronograma del sistema de secado de café.



Fuente: Situmorang, Z., & Wardoyo, R. (2023). Extended Fuzzy Rule Suram for Coffee Drying System.

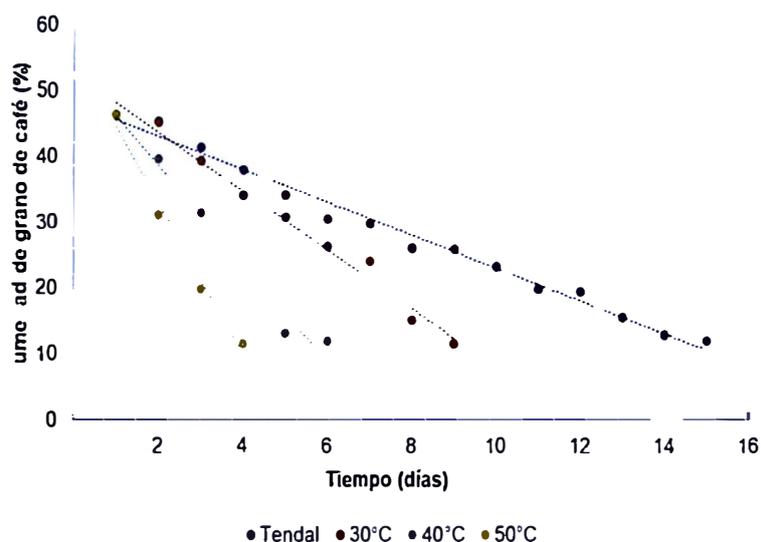
Tigre, K. E., & Zumba, J. D. (2022) en el trabajo de investigación titulado “Estudio de la pasarela inteligente IoT 2040 de SIEMENS y desarrollo de un manual de prácticas de laboratorio orientadas al aprendizaje de los sistemas de automatización” desarrollan un manual de laboratorio con cinco aplicaciones en base a los equipos de marca Siemens Simatic PLC S7-1500, convertidor estándar Sinamics G120 y Simatic IoT2040. Se instaló la imagen y configuró la pasarela IoT, luego se enviaron los datos utilizando diversas plataformas IoT como FreeBoard, ThingsBoard, MindSphere y Ubidots. Las principales características del sistema operativo abierto IoT MindSphere son la ciberseguridad en la conexión, visualización en la nube, análisis de datos y disponibilidad a nivel mundial. Para un correcto envío de datos, se debe configurar el PLC con los sensores y controladores del sistema, los nodos en Node-RED y la plataforma IoT. Los autores proponen la conexión con cuatro plataformas IoT, sin embargo, MindSphere ofrece mayor robustez y seguridad.

1.4.2. Antecedentes nacionales

Camayo, B., Manyari, G., De La Cruz, E., Place, L., Gavilán, M., & Quispe, M. (2022), en el artículo titulado “Deshidratado del café en el secador solar autónomo y tradicional – Tarma”, determinan los diferentes efectos que se obtienen utilizando el secado tradicional con el secado solar, utilizan como referencia la calidad química y organoléptica del café pergamino Catimor. El secado tradicional se realizó entre las 8:00 a. m. hasta las 5:00 p. m., con interrupciones en las precipitaciones; y el secado solar se analizó a las temperaturas de 30, 40 y 50 °C. El parámetro de control se consideró para una humedad menor a 12%, posteriormente, los cafés se tostaron y

molieron para realizar el análisis de calidad con tres catadores certificados. Sostienen que el secado solar reduce los tiempos del proceso, y la temperatura seleccionada para el secado de café según la preferencia de los catadores es de 40 °C. La capacidad del secador solar autónomo indirecto es de 20 kilogramos, utiliza aire calentado por dos reflectores planos e incorpora sensores de temperatura, humedad, peso y ventiladores; la información de los sensores es registrada en tiempo real. Se observa en la Figura 2., que el secado tradicional se prolonga hasta los 15 días, mientras que el secado solar está comprendido entre los 4 y 9 días, a menor temperatura de secado el tiempo aumenta. Los autores recomiendan el secador solar autónomo indirecto debido a las ventajas en tiempo y calidad, de la misma forma proponen una temperatura de trabajo de 40 °C para obtener una mejora calidad sustentada en los resultados de los catadores. Sin embargo, el algoritmo solo se basa en mantener una temperatura constante y no analiza otros factores como la tasa de secado, tampoco se secan cantidades grandes de café debido a que solo se utiliza una muestra de 5 kilogramos para cada caso.

Figura 2. Relación entre la humedad de grano de café en % y el tiempo en días para el secado tradicional y secado solar autónomo indirecto a temperaturas de 30, 40 y 50 °C.



Fuente: Camayo, B., et al. (2022). Deshidratado del café en el secador solar autónomo y tradicional – Tarma.

Huamán, L., & Mamani, E. (2019), en la tesis titulada “Diseño e implementación de un prototipo de secador de café automatizado”, sostienen la utilización de un sistema de control realimentado para el secado de café pergamino, determinan una temperatura estable de 45 °C para un secado uniforme. Proponen un secador con capacidad de 500 gramos de granos de café con el que se obtiene un tiempo de secado de 20 horas hasta un 11% de humedad. Indican que el proceso de secado al sol es lento debido a que solo se cuenta con 8 horas diarias de luz solar y se extiende por las precipitaciones. Utilizan una placa de desarrollo Arduino Nano para el control del sistema que activa la resistencia eléctrica y el ventilador, el algoritmo utiliza un control Proporcional Integral Derivativo (PID) que actúa en la variable temperatura

hasta obtener el valor de referencia. Los autores declaran que la integración de la humedad del café es uno de los inconvenientes debido a que este valor es obtenido por un dispositivo externo, la humedad se mide al inicio del proceso y posteriormente cada hora hasta identificar un valor entre 10 y 12%. Recomiendan utilizar el control PID y adquirir un entendimiento completo de las variables a controlar para obtener buenos resultados, sin embargo, el algoritmo solo se determina por mantener una temperatura constante y no analiza otros factores como la humedad ambiental. Tampoco utilizan grandes cantidades de café ni se logra demostrar la conservación o mejora de la calidad del café.

Barzola Cárdenas, A., Quiñones Huatangari, L., Vásquez Ochoa, B., Pérez Guevara, I. & Díaz Torres, M. (2020), en el artículo titulado “Estimación de humedad de café pergamino utilizando un secador solar automatizado, mediante modelos matemáticos en Jaén-Perú”, estiman la humedad del café pergamino en un secador solar automatizado a través de cinco modelos matemáticos determinados por softwares de análisis de datos. El secador solar automatizado regula la temperatura y humedad internas a través de un controlador que activa la extracción del aire húmedo cuando se está sobre el rango de temperatura fijado, así como activa la calefacción del aire a través de un colector solar cuando se está dentro del rango fijado. Utilizan 504 kilogramos de café cerezo maduro seleccionado de la variedad Catimor, obtuvieron una matriz con las variables tiempo de secado, temperatura, interna, temperatura externa, humedad interna, humedad externa y humedad del grano. Analizaron y seleccionaron las variables más influyentes en la humedad del

grano, el modelo lineal utilizó la temperatura interna y el tiempo de secado; los otros cuatro modelos no lineales utilizaron solo el tiempo de secado. Los autores concluyen que los cinco modelos presentan un buen ajuste, sin embargo, solo están considerando una o dos de las cinco variables propuestas y no se realiza un segundo proceso de secado para validar los modelos obtenidos. El algoritmo de control del prototipo de secador solar se basa principalmente en mantener el rango de valores de la temperatura y humedad internas a través de la activación y desactivación de los actuadores, no se considera otro tipo de control como el proporcional ni otras variables como la velocidad del aire.

1.4.3. Antecedentes locales

Fernández De La Cruz, M. A. (2019), en la tesis titulada “Diseño y simulación de un algoritmo de control predictivo generalizado con restricciones y su impacto en el proceso de secado de granos”, propone el Control Predictivo Generalizado (GPC) con restricción de limitación monótona a la salida y lo compara con los controles PID y GPC. Determina los parámetros del controlador PID utilizando el primer método de Ziegler-Nichols, simula la respuesta del proceso al escalón unitario obteniendo varios sobreimpulsos y un tiempo largo de establecimiento, se explica debido al retardo presente en el proceso. Diseña la señal de control del GPC sin modificaciones, simula la respuesta del proceso al escalón unitario obteniendo un sobreimpulso de 36,80%, pero un mayor tiempo de establecimiento comparado con el control PID. Diseña la señal de control del GPC con restricción de comportamiento monótono en la salida, simula la respuesta del proceso al escalón unitario obteniendo un tiempo de

establecimiento de 70 segundos, menor en comparación con los anteriores controles, y una respuesta sin sobreimpulso. El autor sugiere utilizar el GPC con restricciones en la implementación de una planta, sin embargo, solo se considera una variable a controlar, tampoco se implementó el control en un secador real, y no se limitó la señal de salida del controlador PID.

CAPÍTULO II

MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Marco teórico

El marco teórico de la presente investigación se presenta como resúmenes de investigaciones importantes organizados por temas relacionados al café.

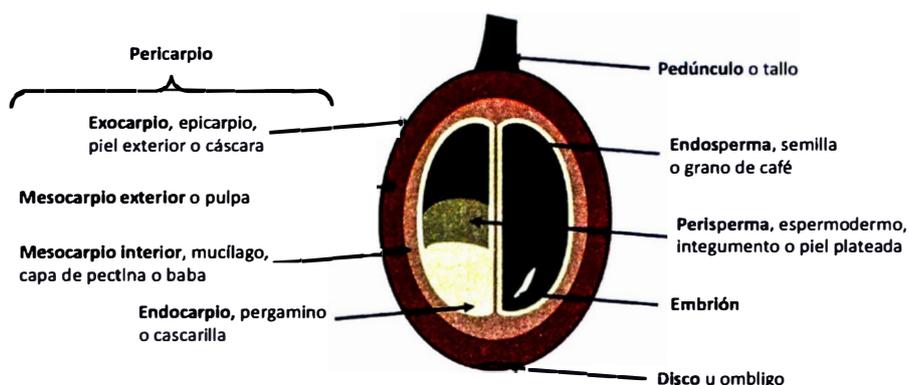
2.1.1. Estructura del café

De Castro, R. D., & Marraccini, P. (2006), en el artículo titulado “Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development”, indican que las especies de café que representan la mayoría del mercado son Arábica y Robusta, ambas variedades presentan un mesocarpio carnoso y un endocarpio delgado. Cuando el café está maduro, solo la capa externa del perisperma, también llamada piel plateada, se mantiene rodeando al endosperma o grano que, luego de los procesos postcosecha, es vendido en el mercado internacional como café verde.

Los autores plantean que el pericarpio contribuye considerablemente con el desarrollo de los granos de café y está conformado por tres tejidos: exocarpio,

mesocarpio y endocarpio. Durante el desarrollo del café, el exocarpio o piel exterior permanece de color verde hasta antes de madurar cuando cambia a color amarillo y finalmente rojo; el cambio de color es importante porque es el principal criterio de maduración. El mesocarpio contiene principalmente azúcar y agua, cuenta con un espesor entre 0,2 a 5 mm. El mesocarpio externo o pulpa está conformado por células parénquima y el mesocarpio interno es llamado mucílago en frutas maduras. El endocarpio, también llamado pergamino, es un tejido delgado y duro encargado de proteger las semillas de enzimas digestivas. El perisperma, también denominado integumento o espermodermo, en la etapa madura se presenta como una película fina plateada de 70 μm de grosor. Durante el proceso germinativo del café, el endosperma funciona como un tejido de almacenamiento que acumula reservas de nutrientes que serán transportadas por el embrión. Un resumen de la ubicación y denominación de los diversos tejidos que conforman el cerezo de café se observa en la Figura 3.

Figura 3. Tejidos que conforman el cerezo de café.



Fuente: De Castro, R. D., & Marraccini, P. (2006). Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development.

2.1.2. Procesos del café

Puerta Q., G. I. (1999), en el artículo titulado “Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café”, establece que existen tres métodos de beneficio del café, por vía húmeda, por vía semihúmeda y por vía seca. El beneficio del café por vía húmeda se compone de los siguientes procesos: recolección, despulpado, remoción del mucílago, lavado, secado y trillado; el color del café almendra es verde. El beneficio del café por vía seca o natural comprende el secado del cerezo y la posterior remoción de la cáscara; el color del café almendra es marrón. El beneficio del café por vía semihúmeda o “Honey” está compuesto por los procesos de despulpado y secado. El resumen de los procesos involucrados en cada método de beneficio de café se observa en la Tabla 1. La autora describe la importancia del proceso de recolección y selección en el aroma y sabor de la bebida, debido al estado de madurez de los granos, cuando están verdes o sobremaduros, estos favorecen el defecto fermento. El proceso de despulpado no se debe realizar luego de un período largo con la cosecha y la máquina debe estar calibrada para evitar la separación incompleta de la pulpa. El proceso remoción del mucílago se realiza mecánicamente o por fermentación natural con enzimas pectolíticas. La fermentación natural consiste en depositar los granos de café despulpados en tanques entre 12 a 18 horas, al emplear preparaciones enzimáticas se logra disminuir el tiempo del proceso, factor crítico para el aroma y sabor. El proceso de lavado elimina los productos de fermentación que producen sabor agrio a la bebida. El proceso de secado permite la conservación de la calidad del café durante los procesos posteriores, en contenidos de humedad

superiores a 13% proliferan hongos, por lo que 12% constituye el punto de equilibrio. Finalmente, el café seco se empaca, almacena, trilla y clasifica; según el gusto del consumidor, se determina el tiempo de tostación, la molienda y preparación de la bebida.

Tabla 1. Procesos involucrados en cada método de beneficio del café.

Métodos	Despulpado	Remoción del mucílago	Lavado	Secado	Trillado
Vía húmeda (lavado)	Sí, se obtiene café baba	Sí	Sí, se obtiene café pergamino húmedo	Sí, se obtiene café pergamino seco	Sí, se obtiene café de color verde
Vía semihúmeda ("Honey")		No	No	Sí	Sí, se obtiene café de diversos colores
Vía seca (natural)	No	No	No	Sí	Sí, se obtiene café de color o marrón

Fuente: Puerta Q., G. I. (1999). Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café.

2.1.3. Proceso de secado de café

Ghosh, P., & Venkatachalapathy, N. (2014), en el artículo titulado "Processing and drying of coffee—a review", describen la importancia del proceso de secado debido a que determina características como color y sabor para la bebida; se utilizan dos principales técnicas de secado de café: secado solar y secado mecánico. El contenido de humedad del café cosechado está entre 55% y 60%, luego del secado debe disminuir a valores entre 10% y 12%; este proceso debe ser uniforme para garantizar la calidad y evitar proliferación de bacterias durante el almacenamiento. Las curvas

de secado del café en capa fina son representadas según simulaciones matemáticas y dependen de la variedad, condiciones ambientales y los procesos postcosecha.

Los autores establecen que el secado solar o natural requiere de más energía si el café no es despulpado con anterioridad debido a que se remueve agua y tejidos que inhiben la pérdida de agua. El secado en patios de concreto cuenta con una ligera pendiente para drenar el agua; para el proceso de café natural, el tiempo de secado varía entre 12 a 21 días, los cerezos se cubren en las horas de mayor calor y en las precipitaciones. El secado en cámaras evita la contaminación del café con el suelo, el tiempo de secado es menor debido a que las camas están expuestas a las corrientes de viento que remueven el aire saturado; la estructura está compuesta de madera ligera con paredes y techo de plástico translúcido, lo que genera un efecto invernadero. Este método aumenta la temperatura entre 10 a 15 °C, es necesario la utilización de ventiladores para remover el aire saturado de la humedad extraída de los cerezos, la cámara mantiene el café protegido de la lluvia y el rocío. Los autores definen el secado mecánico cuando los granos son calentados por el paso de aire caliente que también extrae la humedad, los cerezos deben mantener una temperatura controlada de menos de 45 °C para evitar el sobrecalentamiento; se han desarrollado secadores estáticos y rotatorios con diversas configuraciones. La fuente de energía principal para estos secadores son los combustibles, madera, cáscara de café y gases; el tiempo de secado varía entre 20 a 60 horas. En la industria del café, el secado mecánico se emplea como segunda fase en el proceso de secado, su principal desventaja es el secado no homogéneo.

2.1.4. Secado de café natural

Alves, R. C., Rodrigues, F., Antónia Nunes, M., Vinha, A. F., & Oliveira, M. B. P. P. (2017), en el artículo titulado “State of the art in coffee processing by-products”, destacan la importancia de utilizar cerezos maduros para el beneficio seco, debido a que los cerezos inmaduros o sobremaduros producen defectos en la calidad final. La selección y separación de cerezos se realiza en la cosecha y el acopio, la característica principal de los cerezos maduros es su color rojizo. Los cerezos se secan lo más pronto posible sin realizar otro proceso previo, se distribuyen en capas finas sobre las camas y se rastrillan de forma periódica en todo el proceso para lograr un secado uniforme. El proceso de secado al sol finaliza entre 3 y 4 semanas cuando la humedad del grano alcanza un valor menor a 12%, en medio del proceso los granos de café se desprenden del pergamino. Terminando el secado, se trilla el café, en este proceso se retiran las capas exteriores, así como otras impurezas, dejando solo los granos listos para ser almacenados. La calidad sensorial de la bebida mejora si el café se deja descansar por unos meses antes del trillado.

2.1.5. Determinación de la humedad del café

Martines, E., & Lira, L. (2010), en el artículo titulado “Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos”, indican que la humedad es la cantidad de agua que contiene un material. La masa total de este material está constituida por materia seca y agua. El agua contenida en el material aumenta si es absorbida o disminuye si es evaporada, sin embargo, la materia seca permanece constante. La humedad es una propiedad extensiva porque depende de la cantidad

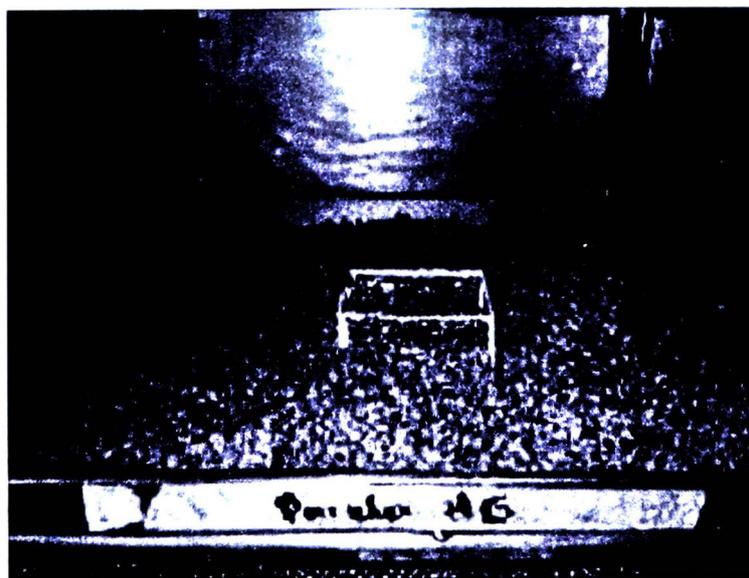
del material, su medición representa una dificultad en el comercio de granos donde se utilizan grandes cantidades. El contenido de humedad es la expresión de la humedad por unidad de masa, es una propiedad intensiva que no depende de la cantidad de material y se utiliza en una muestra de grandes masas de granos sin alterar su valor. Los autores sostienen que el contenido de humedad se expresa en base seca o en base húmeda. El contenido de humedad en base seca se determina con el cociente de la masa de agua presente en el material y la masa seca, sin embargo, esta expresión no permite identificar cuando un material está saturado en agua. El contenido de humedad en base húmeda se determina con el cociente entre la masa de agua presente en el material y la masa total, tal como se indica en la Ecuación 2.1. Cuando el contenido de humedad en base húmeda es 0%, indica que el material no contiene masa de agua; cuando el valor es 100%, indica que el material solo está constituido por masa de agua. Esta es la expresión de humedad que se utilizará para los cerezos en el presente trabajo de investigación.

$$\%H_{bh} = \frac{m_{agua}}{m_{total}} 100 \quad (2.1.)$$

Jurado C., J. M., Montoya R., E. C., Oliveros T., C. E., & Garcia A., J. (2009), en el artículo titulado "Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café", sostienen que el contenido de humedad de los granos de café se mide con métodos directos, como el método de la estufa, radiación infrarroja, microondas y destilación; o indirectos, basados en características como la capacitancia, resistencia eléctrica, resonancia de microondas y humedad relativa. Sin

embargo, la mayoría de estos métodos se basan en la constante dieléctrica del grano, por lo que no deben presentarse gradientes interiormente, este estado es logrado al dejar los granos en reposo por un tiempo mayor a cuatro horas. También existen otros métodos que no son afectados por los gradientes, sin embargo, son costosos y destructivos. Los autores proponen el método Gravimet, el cual es económico, sencillo y se basa en la conservación de la materia seca en el proceso de secado. Como se aprecia en la Figura 4., se utiliza una muestra de 200 g de café sano y escurrido, con un contenido de humedad de 53%, en una canastilla de 12 x 12 x 5 cm, se ubica en medio de la cama de café a secar, y con una balanza digital se pesa el café diariamente. Cuando el valor de la masa del café está entre 104 y 105 g, el contenido de humedad en base húmeda del café está entre 10 y 12 %.

Figura 4. Ubicación de la canastilla en el secador.



Fuente: Jurado C., J. M., et al. (2009). Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café.

2.1.6. Calidad del café

Febrianto, N. A., & Zhu, F. (2023), en el artículo titulado “Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties”, establecen que la calidad del café se analiza de en base a sus propiedades físicas, químicas y sensoriales. Las características físicas influyen en las propiedades sensoriales, los cafés con pocos defectos y libres de elementos externos son considerados de alta calidad. El mercado no establece una clara clasificación respecto a la calidad del café basada en sus características químicas y actividad biológica, sin embargo, estas características influyen significativamente en las propiedades sensoriales. El precio del café está determinado principalmente por su calidad sensorial, una bebida compleja, balanceada y agradable es considerada de alta calidad.

Mendoza Marcillo, B. F., Pincay Menéndez, J. D., & Bravo Zamora, R. C. (2023), en el artículo titulado “Influencia de la cosecha de café maduro y verde sobre la calidad física y organoléptica del café (*Coffea arábica* L.)”, indican que el análisis sensorial del café es realizado por un panel de expertos catadores guiándose de los protocolos establecidos por la “Specialty Coffee Association” (SCA), en español Asociación de Cafés Especiales. En el proceso de catación se evalúan las siguientes características organolépticas: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad, balance, taza limpia, dulzor, y el puntaje del catador. Cada característica se evalúa en la escala de 0 a 10 puntos; la calificación sensorial general se evalúa en la escala de 0 a 100 puntos. Para los cafés arábigos, los cafés especiales obtienen un puntaje final

igual o mayor de 80 puntos; de 80 a 84,99 puntos la clasificación es muy buena; de 85 a 89,99 puntos la clasificación es excelente; de 90 a 100 puntos la clasificación es excepcional. Los autores sostienen que los frutos cosechados inmaduros afectan negativamente a las características organolépticas del café en el puntaje final de taza, sin embargo, los frutos maduros presentan atributos frutales, cítricos, panela y achocolatados.

2.1.7. Variedades del café

Boot, W. (2006), en el artículo titulado “Variety is the spice of coffee. Geisha and other varieties”, sostiene que la cantidad y calidad son los aspectos más importantes que se deben balancear al elegir una variedad de café, un alto rendimiento no implica altos puntos en taza. La variedad arábica Typica o criollo produce cafés de alta calidad en bajo volumen, en alturas elevadas aumenta la intensidad de su acidez resonante. La variedad arábica Bourbon se descubrió en la isla Reunión, presenta un sabor ácido brillante con un regusto vino dulce, en alturas elevadas presentan propiedades aromáticas florales. La variedad arábica Caturra se descubrió en Brasil, es una mutación de la variedad Bourbon, cuando se podan y fertilizan continuamente, producen altos volúmenes y alta calidad. La variedad arábica Catuai presenta un alto rendimiento y resistencia a la caída de sus frutos cuando se presentan vientos fuertes y lluvia, los métodos de fertilización naturales intensifican su dulzura. La variedad Catimor se creó en Portugal por un cruce de la variedad Híbrido de Timor y Caturra, presenta resistencia contra enfermedades y alto rendimiento. La variedad arábica Geisha proviene de Etiopía, presenta resistencia ante la roya del café, aroma floral,

regusto dulce y acidez tamarindo. En la Tabla 2., se observa un resumen con las características de las variedades de café.

Tabla 2. Resumen de características de las variedades de café.

Variedad de café	Rendimiento	Calidad	Resistencia
Typica	Bajo	Alta	
Bourbon		Alta	
Caturra	Alto	Alta	
Catuai	Alto	Alta	A la caída de sus frutos
Catimor	Alto		Contra enfermedades
Geisha		Alta	Ante la roya del café

Fuente: Boot, W. (2006). Variety is the spice of coffee. Geisha and other varieties.

2.1.8. Conceptos de control en procesos térmicos

Wade, H. L. (2017) en el libro titulado “Basic and advanced regulatory control: System design and application”, expresa la forma general de una función de transferencia de primer orden según la Ecuación 2.2.

$$FT = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.2.)$$

Donde el parámetro K llamado ganancia de estado estacionario es la relación entre el cambio en la salida y la cantidad del cambio en la entrada. El parámetro τ llamado constante de tiempo es el indicador de qué tan rápido la salida alcanza el equilibrio debido a un cambio escalón en la entrada, la métrica para determinar τ es el tiempo requerido para que la salida alcance el 63.2% del equilibrio. Luego de transcurrido un tiempo de 5τ desde el cambio escalón en la entrada, el sistema dinámico estará en equilibrio, debido a que la salida alcanza el 99.6% del cambio en estado estacionario. Sin embargo, los procesos industriales comúnmente presentan un retardo en el tiempo o tiempo muerto debido a un movimiento físico de masa o

energía. Los procesos con estas características se denominan de primer orden más tiempo muerto (FOPDT) y su función de transferencia se describe en la Ecuación 2.3.

$$FT = \frac{\theta}{\tau s + 1} \quad (2.3.)$$

Donde el parámetro θ representa la cantidad de tiempo muerto del sistema. La relación θ/τ indica qué tan sencillo es controlar el lazo. Si el tiempo muerto es mucho más pequeño que la constante de tiempo, el lazo es sencillo de controlar. En cambio, si el tiempo muerto es mucho más grande que la constante de tiempo, el lazo se vuelve complicado de controlar, en estos casos se aplican técnicas de compensación de tiempo muerto. Considerando las características dinámicas, un proceso autoregurable alcanza el equilibrio si todas las entradas son fijas. En un proceso térmico, la temperatura aumentará o disminuirá hasta que las tasas de salida y entrada de calor sean iguales, debido a esto la mayoría de lazos de control de temperatura son autoregurables. Los lazos de control de temperatura usualmente son lentos, libres de ruido y con tiempo muerto debido al tiempo de transporte de una corriente que fluye. Por estos motivos, un lazo de control de temperatura se aproxima a un modelo FOPTD.

2.1.9. Manufactura inteligente en la Industria 4.0

Kishorre, V., Abinash, M., & Rao, L. B. (2021), en el artículo titulado "Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A case study of siemens industry", establecen que la Industria 4.0 impacta en el diseño de fábricas inteligentes, donde se mejora y transforma la automatización de los sistemas de manufactura. Una

comunicación constante entre los humanos y máquinas mejora la productividad debido a la toma de decisiones inteligentes. Los sistemas de manufactura inteligente presentan como características el autoaprendizaje, grandes cantidades de datos, minimizar los costos y reducir tiempos. Una de las tecnologías clave para la manufactura inteligente es el Internet de las Cosas Industrial (IIoT), este término se deriva de la aplicación del IoT en procesos industriales, se aplica al conectar los sensores a la nube para mejorar la productividad con la interpretación de los datos. La Inteligencia Artificial (IA) es la imitación, mejora o reemplazo de la inteligencia humana por las computadoras; el Aprendizaje Automático (ML) es un subconjunto de la IA que consiste en la aplicación de técnicas estadísticas para la mejora de una tarea específica; el Aprendizaje Profundo (DL) es un subconjunto del ML que provee de herramientas para el análisis de grandes cantidades de datos. La inteligencia de datos involucra técnicas de análisis avanzadas con el objetivo de procesar las grandes cantidades de datos generados por los dispositivos y sensores. Los sistemas ciberfísicos integran conocimiento práctico y de algoritmos analíticos basados en datos. Un gemelo digital es un sistema que monitorea y revisa el estado de un sistema real, recibe información en tiempo real para un análisis y toma de decisión en base a simulaciones, predicción y optimización. La computación en la nube permite el almacenamiento y capacidad computacional de forma remota y accesible; estos sistemas brindan software de procesamiento y programas comerciales acondicionados.

2.2. Marco conceptual

Beneficio: transformación del café cereza en café pergamino seco.

Café: semilla del cafeto, aproximadamente un centímetro de largo.

Cama: superficie donde se tiende el café para ser secado.

Cámara: bóveda cerrada donde se seca el café.

Capa: cada una de los tejidos que cubren los granos del café.

Calidad: conjunto de propiedades del café que determinan su valor de venta.

Cerezo(a): café maduro, de color rojizo.

Curva: representación gráfica de una variable respecto a otra variable.

Maduro: dicho del café que ha alcanzado el grado de desarrollo adecuado para ser cosechado.

Natural: proceso del café que consiste en secarlo directamente luego de la cosecha, sin realizar otro proceso previo o quitar alguna de sus capas.

Pergamino: capa interior del café de color amarillo, recubre a la piel plateada.

Potencia: se mide en porcentaje e indica qué tan rápido giran los motores, 0% significa que los motores no giran y 100% significa que giran a máxima velocidad.

Puntos: unidad que determina la calidad de la bebida de café.

Rastrillar: remover el café que se está secando para lograr un proceso uniforme en todos los granos.

Secador: estructura o máquina que extrae la humedad los cerezos.

Sano: dicho del café no atacado por mancha de hierro, sin presencia de flotes, sin granos brocados, sin frutos secos, pulpa u otras impurezas.

Solar: secador que utiliza principalmente la energía del sol para secar los cerezos.

Trillar: en un lote de sacos de café, determinar el porcentaje real de café descartando la maleza y el moho.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1. Hipótesis general

El análisis del algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar permitirá el correcto control de la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural en una cooperativa cafetalera.

3.2. Hipótesis específicas

La determinación de la ubicación adecuada de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en un prototipo de secador solar permitirá la correcta representación de los parámetros del proceso de secado del café natural.

La determinación de las relaciones entre las variables registradas en un prototipo de secador solar permitirá establecer el comportamiento del proceso de secado del café natural.

La determinación de las condiciones ambientales y operativas en un prototipo de secador solar mejorará el avance del proceso de secado del café natural.

3.3. Operacionalización de variables

A continuación, se detallan las variables de la presente investigación, así como los indicadores para la variable independiente.

Variable dependiente (y): temperatura, humedad ambiental y masa del café natural

Variable independiente (x): análisis del algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar

Indicadores de la variable independiente:

Temperatura (°C)

Humedad ambiental (%)

Masa del café natural (g)

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y diseño de la investigación

La presente investigación con respecto al enfoque es de tipo aplicada porque la propuesta de mejora está basada en el análisis del algoritmo y los datos. Se realizará una contextualización del análisis para el prototipo de secador solar.

La presente investigación con respecto al alcance es de tipo correlacional porque se identificará el grado de relación que existe entre las variables y los efectos que generan sus cambios, esto permite estimar predicciones de sus valores.

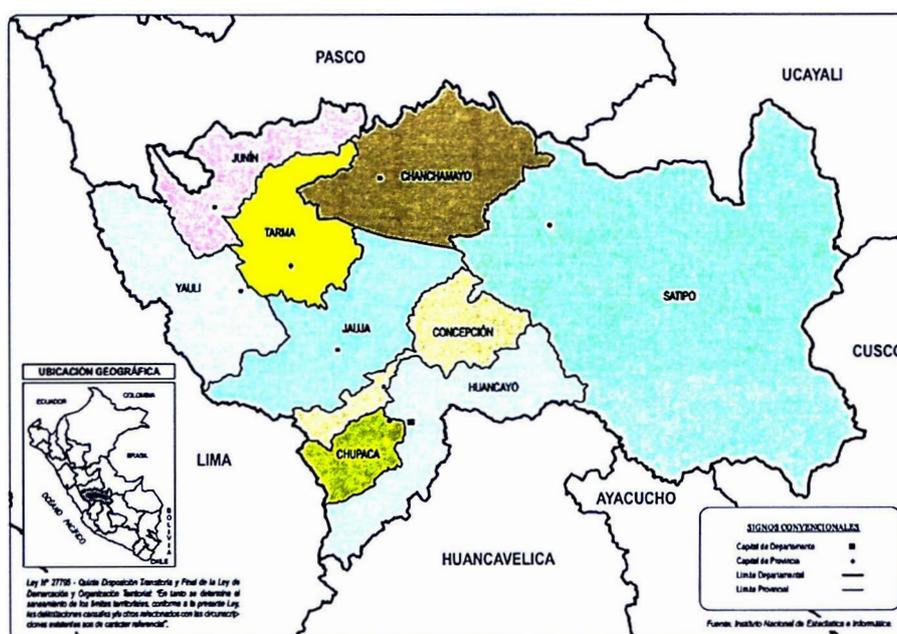
El diseño de la presente investigación es experimental porque las variables serán manipuladas y estarán controladas, también se compararán los resultados obtenidos entre los diferentes procesos propuestos.

4.2. Unidad de análisis

La CAC La Florida, fue fundada el 30 de octubre de 1966, según el padrón 2023, documento interno de la CAC La Florida, se cuenta con 610 socios productores de

café. La cooperativa se ubica en el Centro Poblado La Florida (CP La Florida), distrito de Perené, provincia de Chanchamayo, departamento de Junín en el centro del Perú, como se aprecia en la Figura 5. El CP La Florida se ubica a 743 m.s.n.m. en la región natural Rupa Rupa o selva alta; caracterizada por cavernas naturales, cerros rocosos, quebradas, laderas, lomas, pongos y valles (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI],2018).

Figura 5. Mapa político administrativo del departamento de Junín.



Fuente: INEI. (2020). Perú: Principales Indicadores Departamentales 2009-2020.

La CAC La Florida ofrece diversos servicios a sus asociados, entre ellos está el servicio de secado que se realiza en el patio o en camas africanas. Se observa en la Figura 6., el prototipo de secador solar de la presente investigación, el cual estuvo en operación por primera vez en el secado de la cosecha de café natural el mes de junio de 2023. Es una estructura de maderas y calaminas que cuenta con 30 camas para secar el

café, distribuidas en dos zonas de tres niveles cada una. Sus coordenadas geográficas aproximadas son las siguientes $10^{\circ}49'03,2''S$ $75^{\circ}07'35,5''W$.

Figura 6. Prototipo de secador solar de la CAC La Florida.



Fuente: Elaboración propia.

Cada cama de secado cuenta con una dimensión de 1,20 metros de ancho por 1,77 metros de largo y está soportada por cuatro resortes en sus extremos. El prototipo de secador solar cuenta con sensores, actuadores, un controlador y otros equipos, los cuales son descritos en la Tabla 3. El café es calentado por la energía solar incidente en la cámara y reflejada por los laterales; los ventiladores, dos de ingreso y dos de salida, son los únicos actuadores sobre la cámara de secado, estos se accionan según la lectura de los sensores. Se cuenta con un ducto por cada ventilador, estos distribuyen el aire en los tres niveles.

Tabla 3. Principales equipos presentes en el prototipo de secador solar.

Equipo	Modelo/Marca	Descripción general	Cantidad
Sensor de temperatura	TEMP-WM NOVUS	Rango de -50 a 120 °C	11
Sensor de humedad ambiental	RHT-WM NOVUS	Rango de 0 a 100 %	1
Sensor de radiación	EP 0304 TECMES	Rango de 0 a 1400 W/m ²	2
Sensor de velocidad de aire	EE650 E+E ELEKTRONIK	Rango de 0 a 20 m/s	4
Balanza	WTC 200 RADWAG	Máxima capacidad de 200 g	3
VFD	CFW500 WEG	Frecuencia de salida de 0 a 500 Hz	4
PLC	SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/RLY SIEMENS	14 entradas digitales 24 V DC 10 salidas digitales relé 2 A 2 entradas analógicas 0-10 V DC	1
Módulo de entradas analógicas	SM 1231 SIEMENS	4 entradas analógicas	5
Módulo de salidas analógicas	SM 1232 SIEMENS	2 salidas analógicas	2
Módulo de comunicación RS232	CM 1241 SIEMENS	1 interfaz RS 232C (V.24)	1
Módulo Internet de las Cosas	SIMATIC IOT2040 SIEMENS	1 GB DDR3 RAM 2 puertos Ethernet RJ45	1
Interfaz humano máquina (HMI)	KTP400 BASIC SIEMENS	Pantalla de 4,3'' con panel táctil Interfaz PROFINET	1

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se cuentan con fuentes DC, guardamotores, interruptores termomagnéticos, cajas de paso, canaletas ranuradas, regletas de puesta a tierra, rieles DIN, tuberías, conectores de tuberías, borneras y cables. Todos los equipos están ubicados en el interior del recinto, los que están relacionados al control se ubican dentro de un tablero eléctrico con grado de protección IP66. El prototipo está energizado con 220 V AC, cuenta pozo a tierra y conexión cableada a internet.

4.3. Matriz de consistencia

Se observa en la Tabla 4., la matriz de consistencia de la presente investigación.

Tabla 4. Matriz de consistencia de la investigación “Propuesta de mejora basada en el análisis del algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar para controlar la temperatura, humedad y masa del café natural en una cooperativa cafetalera”.

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables		Indicadores de la variable independiente	Técnicas e instrumentos de recolección de datos
			Dependiente	Independiente		
¿En qué medida un inadecuado algoritmo de control en un prototipo de secador solar influye negativamente en el control de la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural en una cooperativa cafetalera?	Analizar el algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar y proponer una mejora para el correcto control de la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural en una cooperativa cafetalera.	El análisis del algoritmo y los datos en un prototipo de secador solar permitirá el correcto control de la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural en una cooperativa cafetalera.				
¿De qué forma la ubicación de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en un prototipo de secador solar influye en la representación de los parámetros del proceso de secado del café natural?	Determinar la ubicación adecuada de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en un prototipo de secador solar para la correcta representación de los parámetros del proceso de secado del café natural.	La determinación de la ubicación adecuada de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en un prototipo de secador solar permitirá la correcta representación de los parámetros del proceso de secado del café natural.	Control de temperatura, humedad ambiental y masa del café natural	Análisis del algoritmo y datos en un prototipo de secador solar	Temperatura (°C) Humedad ambiental (%) Masa del café natural (g)	Reporte de cosecha de cafés Registro de lectura de los sensores Reporte de mediciones manuales
¿De qué forma las relaciones entre las variables registradas en un prototipo de secador solar influyen en el comportamiento del proceso de secado del café natural?	Determinar las relaciones entre las variables registradas en un prototipo de secador solar para establecer el comportamiento del proceso de secado del café natural.	La determinación de las relaciones entre las variables registradas en un prototipo de secador solar permitirá establecer el comportamiento del proceso de secado del café natural.				
¿De qué forma las condiciones ambientales y operativas en un prototipo de secador solar influyen en el avance del proceso de secado del café natural?	Determinar las condiciones ambientales y operativas adecuadas en un prototipo de secador solar para mejorar el avance del proceso de secado del café natural.	La determinación de las condiciones ambientales y operativas en un prototipo de secador solar mejorará el avance del proceso de secado del café natural.				

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

DESARROLLO DE LA TESIS

5.1. Recolección de datos

5.1.1. Instalación del sensor de humedad ambiental

La variable humedad ambiental es importante en el proceso de secado de cafés naturales, pero el sistema originalmente carecía de este sensor, por lo que se instaló el sensor de humedad ambiental en reemplazo del sensor de temperatura 4 en la zona 1, como se observa en la Figura 7.

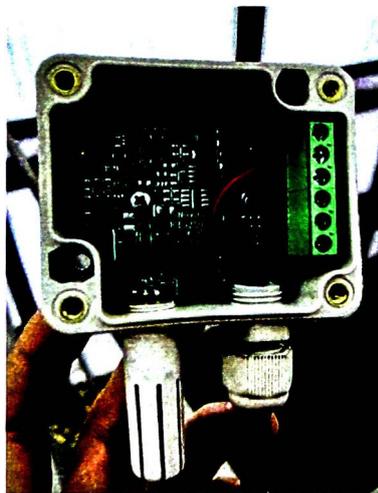
Figura 7. Sensor de humedad ambiental RHT-WM instalado.



Fuente: Elaboración propia.

Se cambió la configuración de los jumpers internos J4 en la posición A y J5 en la posición B para obtener solo la salida de humedad ambiental en OUT1. Se instaló el positivo de la fuente DC, cable rojo, en la bornera 5 y se instaló la entrada analógica del PLC, cable negro, en la bornera 6 tal como se observa en la Figura 8.

Figura 8. Configuración de jumpers internos e instalación eléctrica del sensor de humedad ambiental.



Fuente: Elaboración propia.

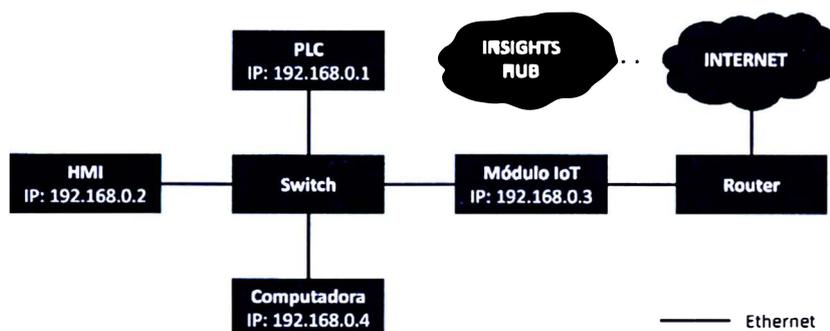
Se programó el PLC para omitir el valor del sensor de temperatura 4 en el cálculo de la temperatura promedio de la zona 1. Ambos sensores envían una señal de 0 a 20 mA y presentan un rango de medición por defecto de 0 a 100 unidades, por lo que no fue necesario modificar los escalamientos en la conversión analógica a digital.

5.1.2. Implementación de la nube IoT

Para el proceso de recolección de datos, se desarrolló un flujo en Node-RED para comunicar el PLC con el módulo IoT y así enviar los datos detectados por los sensores

a la nube de Siemens Insights Hub. Las direcciones IP y la topología de red entre el PLC, HMI, módulo IoT y la computadora se observa en la Figura 9.

Figura 9. Topología de red del prototipo de secador solar.



Fuente: Elaboración propia.

Se conectó la computadora a la red del PLC, se configuró su dirección IP a 192.168.0.4, luego se accedió al módulo IoT a través del software PuTTY y se instaló la versión 2.1.1 del nodo node-red-contrib-s7 mediante el terminal. Es importante considerar esta versión debido a que la versión 3.1.0 genera fallas al utilizar el módulo IOT2040. También se instaló el nodo node-red-contrib-mindconnect para enviar información a la nube de Siemens.

Se creó una cuenta de inicio gratuita en Insights Hub, en este paquete de aplicaciones, se empezó con la configuración de la aplicación Gestor de Activos. En la sección de librería, se crearon cuatro aspectos dinámicos, cada uno de los aspectos contiene seis variables, tal como se observa en la Tabla 5. Las variables de los aspectos se agrupan según su asociación lógica, sin embargo, debido a la limitación en el número de aspectos y variables se reorganizaron. El tipo de datos para todos los aspectos es Double, no se limitó su longitud ni se estableció un valor por defecto.

Tabla 5. Aspectos y variables creados.

Aspecto e ID	Variable	Significado
coffee ID: iiotiyaz.coffee	b1	Balanza 1
	b2	Balanza 2
	b3	Balanza 3
(parámetros del café)	r1	Sensor de radiación 1
	r2	Sensor de radiación 2
	v3	Sensor de velocidad de aire 3
	m1	Giro del motor 1
motor ID: iiotiyaz.motor	m2	Giro del motor 2
	m3	Giro del motor 3
	m4	Giro del motor 4
	v1	Sensor de velocidad de aire 1
(parámetros de los motores)	v2	Sensor de velocidad de aire 2
	t1	Sensor de temperatura 1
tz1 ID: iiotiyaz.tz1	t2	Sensor de temperatura 2
	t3	Sensor de temperatura 3
	t5	Sensor de temperatura 5
	t6	Sensor de temperatura 6
	hum	Sensor de humedad ambiental
(temperaturas de la zona 1)	t7	Sensor de temperatura 7
	t8	Sensor de temperatura 8
tz2 ID: iiotiyaz.tz2	t9	Sensor de temperatura 9
	t11	Sensor de temperatura 11
	t12	Sensor de temperatura 12
	v4	Sensor de velocidad de aire 4
(temperaturas de la zona 2)		

Fuente: Elaboración propia.

En el aspecto coffee se crearon tres variables relacionadas a las balanzas que registraron la masa del café para diferentes muestras, también se crearon dos variables relacionadas a los sensores de radiación en cada zona y una variable del sensor de velocidad de aire. En el aspecto motor se crearon cuatro variables que indican en qué porcentaje están girando los motores de inyección y extracción para ambas zonas, así como dos variables de los sensores de velocidad de aire. En el aspecto tz1 se crearon cinco variables que indican la temperatura de diversos puntos en la zona 1 y una variable del sensor de humedad ambiental. En el aspecto tz2 se crearon cinco variables que indican la temperatura de diversos puntos en la zona 2 y una variable del sensor de velocidad de aire.

En la sección de librería, se creó un tipo de activo y se agregaron los cuatro aspectos creados anteriormente. A cada aspecto se le asigna un nombre referencial, sin embargo, su vinculación con los aspectos creados anteriormente se determina por su ID, tal como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Tipo de activo creado.

Tipo	Nombre	ID del aspecto
coffee_asset ID: iiotiyaz.coffee_asset	coffee_aspect	iiotiyaz.coffee
	motor_aspect	iiotiyaz.motor
	tz1_aspect	iiotiyaz.tz1
	tz2_aspect	iiotiyaz.tz2

Fuente: Elaboración propia.

En la sección de activos, se creó un activo de tipo MindConnectLib y otro activo de tipo coffee_asset según la Tabla 7. Se configuró el activo asset_mind con un perfil de seguridad que establece una clave de 256 bits para dispositivos ligeros, se generó una clave de incorporación y se copió en el portapapeles.

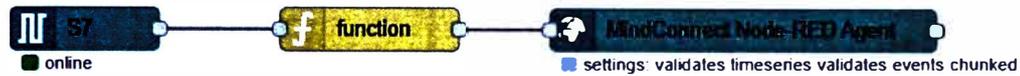
Tabla 7. Activos creados.

Activo	Tipo
asset_mind	MindConnectLib ID: core.mclib
asset_coffee	coffee_asset ID: iiotiyaz.coffee_asset

Fuente: Elaboración propia.

Desde la computadora, se accedió a Node-RED que se ejecuta en el módulo IoT a través de la dirección <http://192.168.0.3:1880> y se realizó la conexión de nodos según la Figura 10. Se configuró el nodo MindConnect y se pegó la clave de incorporación generada, de esta forma se conecta el nodo con el activo.

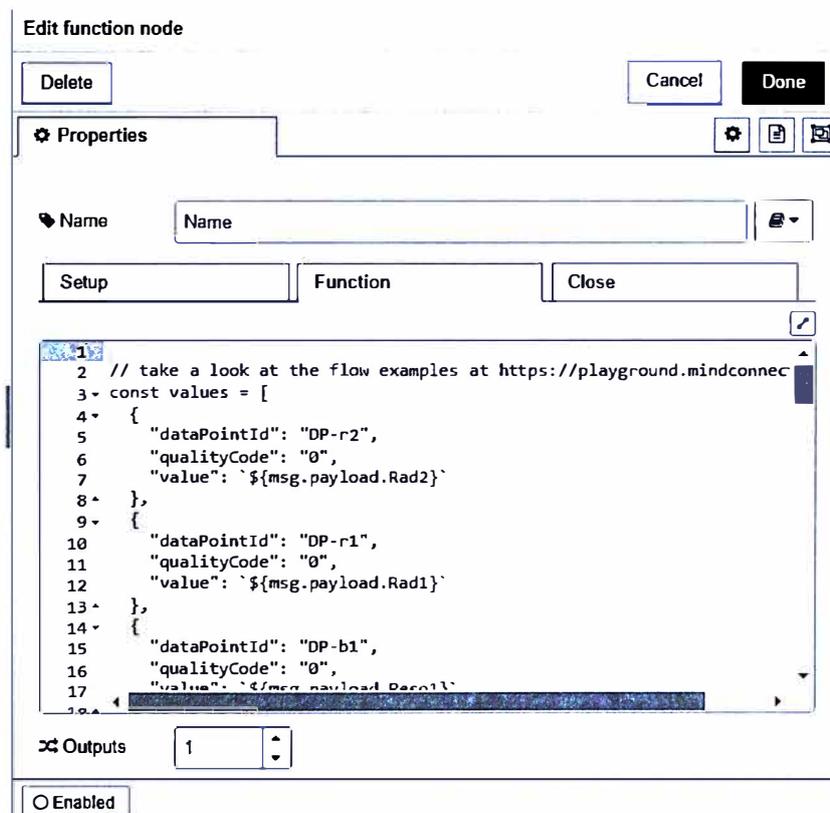
Figura 10. Conexión de nodos para la implementación de la nube.



Fuente: Elaboración propia.

En el nodo MindConnect, se configuró de forma automática la fuente de datos y asignaciones del activo asset_coffe. Como se observa en la Figura 11., se configuró el nodo de función según la plantilla de serie temporal, esta función establece el formato correcto para que los valores de los sensores del PLC sean detectados por el nodo MindConnect.

Figura 11. Configuración del nodo función.



Fuente: Elaboración propia.

Se observa la relación entre la base de datos del PLC, los nombres de las variables en Node-RED y los identificadores de los puntos de datos en la Tabla 8. Finalmente, se desplegó el código de Node-RED y se verificó que el nodo MindConnect esté en línea, así como el agente asset_mind.

Tabla 8. Direcciones, nombres e identificadores de las variables.

Dirección Node-RED	Nombre Node-RED	ID punto de dato
DB1,REAL0	Flujo1	DP-v1
DB1,REAL4	Flujo2	DP-v2
DB1,REAL8	Flujo3	DP-v3
DB1,REAL12	Flujo4	DP-v4
DB1,REAL16	Temp1	DP-t1
DB1,REAL20	Temp2	DP-t2
DB1,REAL24	Temp3	DP-t3
DB1,REAL28	Hum	DP-hum
DB1,REAL32	Temp5	DP-t5
DB1,REAL36	Temp6	DP-t6
DB1,REAL40	Temp7	DP-t7
DB1,REAL44	Temp8	DP-t8
DB1,REAL48	Temp9	DP-t9
DB1,REAL52	Temp10	
DB1,REAL56	Temp11	DP-t11
DB1,REAL60	Temp12	DP-t12
DB1,REAL72	Rad1	DP-r1
DB1,REAL76	Rad2	DP-r2
DB1,REAL80	TempZ1	
DB1,REAL84	TempZ2	
DB9,REAL264	Peso1	DP-b1
DB9,REAL524	Peso2	DP-b2
DB9,REAL528	Peso3	DP-b3
DB21,REAL6	Mot_1Vel	DP-m1
DB22,REAL6	Mot_2Vel	DP-m2
DB23,REAL6	Mot_3Vel	DP-m3
DB24,REAL6	Mot_4Vel	DP-m4

Fuente: Elaboración propia.

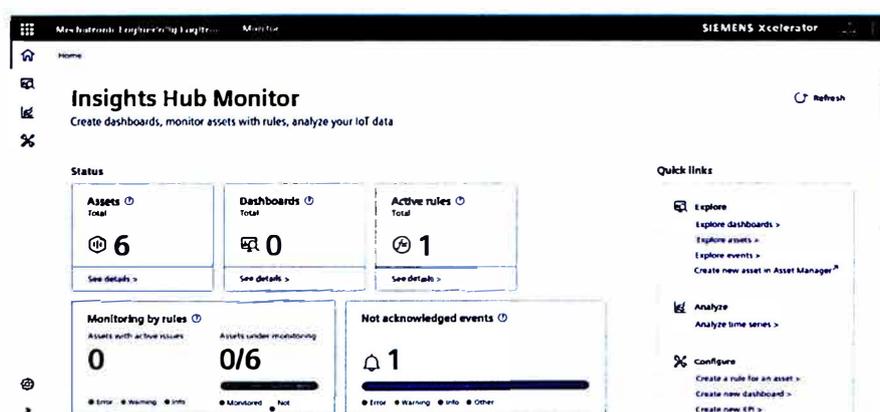
Las variables del sensor de temperatura 10 y los dos promedios de temperaturas en cada zona son registradas por el PLC y el HMI, pero no se envían al nodo MindConnect debido a que se el límite de variables por activo es 24.

5.1.3. Datos en el período sin café

En la semana desde el 6 hasta el 12 de junio de 2023, el sistema estuvo enviando y almacenando los datos de los 12 sensores de temperatura, 2 promedios de temperatura correspondientes a cada zona y 2 sensores de radiación con una frecuencia aproximada de 10 segundos entre cada registro de datos. En este período no se realizó ninguna acción de control, tampoco se secó café, los motores permanecieron apagados y el sensor de humedad ambiental no estaba disponible, por lo que la disposición de variables y aspectos fue distinta a la final.

En el paquete de aplicaciones de Insights Hub, se abrió la aplicación Monitor como se observa en la Figura 12., se seleccionó la opción de mostrar el detalle del estado de los activos, se seleccionó el activo asset_coffee y los datos de todos sus aspectos se exportaron en formato "Comma-Separated Values" (CSV).

Figura 12. Aplicación Monitor de Insights Hub.



Fuente: Elaboración propia.

La exportación se realizó en cada uno de los días por separado debido a que el proceso está limitado como máximo a 10 000 puntos de dato por archivo, se generaron 3 archivos correspondientes a cada aspecto por cada día de la semana. En

el Anexo 1 se observa una captura de pantalla del archivo CSV que contiene los datos de temperatura promedio y radiación enviados a la nube durante todo el día 6 de junio de 2023.

5.1.4. Datos del primer proceso de secado

El día 14 de junio de 2023 se realizó la cosecha de los cafés en el fundo Santa Elena a 1575 m.s.n.m., las variedades recolectadas fueron Pache, Catuai y Catimor. Luego de la cosecha, se descartaron los cafés por el método de la flotación, quedando al fondo los cafés con mayor densidad y flotando los cafés con defectos. Como se observa en el Anexo 2, quedaron 104,5 kg de café cerezo que fueron transportados a la CAC La Florida en cuatro jabas. En la Figura 13., se observa un arbusto de cafeto del fundo Santa Elena con cafés en distintos grados de maduración identificados por su color; los cafés completamente rojos están maduros. A pesar del proceso de flotación, permanecieron cafés sobremaduros, inmaduros y con defectos.

Figura 13. Arbusto de cafeto con cafés en distintos grados de maduración.



Fuente: Elaboración propia.

Al día siguiente, se realizó una selección manual donde se descartaron los cafés que no presentaban una coloración completamente rojiza, este proceso es importante porque los cerezos no maduros reducen la calidad final de los cafés de especialidad. En total se descartó 24,5 kg de café no maduro, el café no descartado fue distribuido en cuatro camas, cada una con 20,0 kg aproximadamente. Según sus dimensiones, el área de cada cama (A_{cama}) es de 2,12 m², por lo que su densidad superficial (σ) se representa en la Ecuación 5.1.

$$\sigma = \frac{\text{Masa de café en la cama}}{A_{cama}} = \frac{20 \text{ kg}}{2,124 \text{ m}^2} = 9,416 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (5.1.)$$

En cada balanza se colocó una canastilla de plástico de base cuadrada con 12,5 cm de lado y 0,0156 m² de área (A_c), adicionalmente se configuró la tara. La densidad superficial en la canastilla debe ser similar a la que se calculó en las camas para mantener una homogeneidad en la muestra, por lo tanto, la masa de café (m_c) que se debe depositar se calcula en la Ecuación 5.2.

$$m_c = \sigma * A_c = \left(9,416 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)(0,0156 \text{ m}^2) = 0,147 \text{ kg} \quad (5.2.)$$

Se distribuyó en cada canastilla una masa de muestra de 150 gramos aproximadamente, tal como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. Masa inicial de café en balanzas para el primer proceso de secado.

Canastilla	Masa de café (g)
1	150,28
2	150,57
3	150,09

Fuente: Elaboración propia.

Se recopilaron datos del prototipo desde las 12:00 m. cuando inició el proceso de secado hasta que terminó, en el paquete de aplicaciones de Insights Hub, se abrió la aplicación Monitor. En la pantalla de inicio se seleccionó la opción de mostrar el detalle del estado de los activos, se seleccionó el activo asset_coffee y todos sus aspectos se exportaron en formato CSV. La exportación se realizó en grupos de 7 días, cada grupo generó 4 archivos correspondientes a cada aspecto. En el Anexo 3 se observa una captura de pantalla del archivo CSV que contiene los datos de las tres balanzas, dos radiaciones y una velocidad de aire enviados a la nube durante toda la semana del 15 al 21 de junio de 2023.

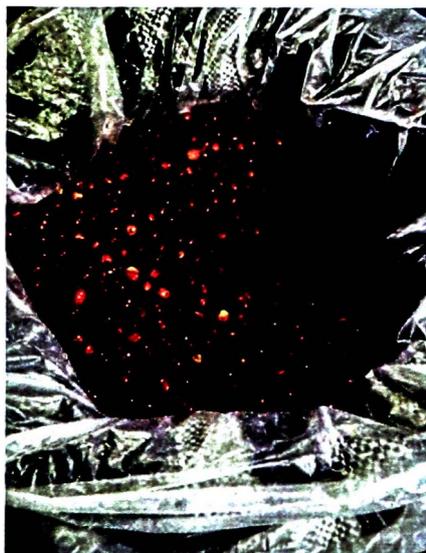
El 1 de julio de 2023 se realizó una medición manual de humedad de los granos de café con una muestra de 100 gramos, se obtuvo un resultado de 22,5%. El 7 de julio de 2023 se realizó otra medición y se obtuvo un resultado de 14,0%.

5.1.5. Datos del segundo proceso de secado

El día 3 de julio de 2023 se realizó la cosecha de los cafés en Alto Chincarmas a 1350 m.s.n.m., la variedad recolectada fue Caturra. Luego de la cosecha, se descartaron los cafés por el método de la flotación, se prefermentó una parte en un cilindro durante dos días y el resto se prefermentó en una bolsa durante un día. El día 7 de julio de 2023, se transportaron los cafés fermentados a la CAC La Florida en nueve jabas medio llenas. Las 7 jabas correspondientes a la fermentación en cilindro contenían una masa de café de 103 kg, y las 2 jabas correspondientes a la fermentación en bolsa contenían una masa de café de 29 kg. En la Figura 14., se observa los granos de café contenidos en la bolsa, se aprecia los distintos grados de maduración identificados

por su color. Se realizó el proceso de prefermentación en los cafés naturales para aumentar su calidad en taza, los cafés en bolsa registraron un pH inicial de 5,2 y los cafés en cilindro registraron un pH inicial de 4,8.

Figura 14. Cafés prefermentados en bolsa.



Fuente: Elaboración propia.

Los cafés prefermentados en bolsa se distribuyeron en la cama 1 del nivel 3 en la zona 2. Los cafés prefermentados en cilindro se distribuyeron en las camas 2, 3, 4 y 5 del nivel 3 en la zona 2, cada una con 25,75 kg aproximadamente. Se distribuyó en cada canastilla una masa de muestra de 150 gramos aproximadamente, tal como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Masa inicial de café en balanzas para el segundo proceso de secado.

Canastilla	Masa de café (g)
1	150,85
2	150,58
3	150,61

Fuente: Elaboración propia.

Se recopilaron datos del prototipo desde las 4:00 p. m. cuando inició el proceso de secado hasta que terminó, en el paquete de aplicaciones de Insights Hub, se abrió la aplicación Monitor. En la pantalla de inicio se seleccionó la opción de mostrar el detalle del estado de los activos, se seleccionó el activo asset_coffee y todos sus aspectos se exportaron en formato CSV. La exportación se realizó en grupos de 7 días, cada grupo generó 4 archivos correspondientes a cada aspecto. En el Anexo 5 se observa una captura de pantalla del archivo CSV que contiene los datos de las tres balanzas, dos radiaciones y una velocidad de aire enviados a la nube durante toda la semana del 7 al 13 de julio de 2023.

El 26 de julio de 2023 se realizó una medición manual de humedad de los granos de café, se obtuvo un resultado de 11,7%. Se trilló una muestra de 350 g y se obtuvo un rendimiento de 54,0%.

5.2. Procesamiento de datos

5.2.1. Procesamiento en el período sin café

Se creó una nueva hoja de cálculo y se copiaron las columnas de tiempo, dos radiaciones y dos temperaturas promedio del aspecto coffe_aspect. Se abrieron los archivos de datos de tz1_aspect y tz2_aspect, las columnas de las temperaturas se copiaron en el nuevo archivo. Tal como se observa en la Figura 15., todos los datos comparten la misma marca temporal, de esta forma se obtuvo un solo archivo para el primer día.

Figura 15. Datos de los aspectos para el día 6 de junio de 2023.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	time	rad1	rad2	temp1	temp2	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11
2	2023-06-06T00:04:45Z	2.61346588	6.86034298	20.7573795	20.9418411	20.8912029	20.5584488	20.9924774	20.8043976	20.4899416	20.8478012	20.5584488	21.4462829	21.1588554	20.9997101	20.2
3	2023-06-06T00:15:16Z	-6.53765993	6.86034298	20.754545	20.915812	20.8912029	20.5584488	20.9997101	20.8116322	20.4427071	20.8478012	20.5479818	21.4317787	21.1443863	20.9997101	20.2
4	2023-06-06T00:25:48Z	1.14329054	6.86034298	20.7453213	20.9185793	20.8912029	20.4861107	20.9997101	20.8043976	20.4899416	20.8478012	20.5227797	21.4120369	21.1443863	21.0141773	20.2
5	2023-06-06T00:36:55Z	2.45012338	6.86034298	20.7429104	20.9201933	20.8839703	20.4716434	20.9997101	20.8043976	20.4899416	20.8478012	20.5078125	21.3907351	21.1443863	20.9924774	20.2
6	2023-06-06T00:47:24Z	-1.14329054	6.86034298	20.7417099	20.9141123	20.8912022	20.4571762	20.9997101	20.8043976	20.4899416	20.8478012	20.5150471	21.3541679	21.1443863	20.9997101	20.2
7	2023-06-06T00:59:91Z	1.47007346	6.86034298	20.7429104	20.9153194	20.8922029	20.4716434	20.9924774	20.8116322	20.4427071	20.8478012	20.5150471	21.3614006	21.1588554	20.9997101	20.2
8	2023-06-06T01:10:69Z	5.71895232	6.86034298	20.7332668	20.9141102	20.8095003	20.4899416	20.9924774	20.8116322	20.4427071	20.8478012	20.5078125	21.3614006	21.1443863	20.9997101	20.2
9	2023-06-06T01:21:36Z	1.14329054	6.86034298	20.7344723	20.9129047	20.8478012	20.4571762	20.9997101	20.8043976	20.4899416	20.8478012	20.5150471	21.3614006	21.1371517	20.9997101	20.2
10	2023-06-06T01:32:05Z	-1.14329054	6.86034298	20.7187977	20.9129047	20.8043978	20.4137776	20.9924774	20.8043978	20.4571762	20.8478012	20.4933453	21.3541679	21.1443863	21.0141773	20.2
11	2023-06-06T01:42:78Z	4.08251758	6.86034298	20.7175922	20.9141102	20.8116322	20.3848381	20.9997101	20.8116322	20.4571762	20.8478012	20.4933453	21.3614006	21.1443863	21.0141773	20.2
12	2023-06-06T01:53:51Z	1.30873794	6.86034298	20.7127705	20.9165211	20.7971649	20.3776254	20.9924774	20.8043976	20.4571762	20.8478012	20.4933453	21.3614006	21.1443863	20.9997101	20.2
13	2023-06-06T02:04:16Z	-4.08251758	6.86034298	20.7151814	20.9149611	20.7826977	20.3848381	20.9997101	20.8188648	20.4571762	20.8478012	20.4933453	21.3541679	21.1443863	21.0141773	20.2
14	2023-06-06T02:14:87Z	-4.57256215	6.86034298	20.7151814	20.9211428	20.7971649	20.3701709	20.9997101	20.8188648	20.4571762	20.8478012	20.4861107	21.3541679	21.1443863	21.0141773	20.2
15	2023-06-06T02:26:48Z	1.14329054	6.86034298	20.7055159	20.9165211	20.7647304	20.3486691	20.9924774	20.8188648	20.4571762	20.8478012	20.4933453	21.3541679	21.1299191	20.9997101	20.2
16	2023-06-06T02:38:68Z	3.92013606	6.86034298	20.7103377	20.9177665	20.7754631	20.3486691	20.9997101	20.8333321	20.4571762	20.8478012	20.4933453	21.3541679	21.1226845	20.9997101	20.2
17	2023-06-06T02:50:16Z	-3.26682997	6.86034298	20.7127888	20.9225483	20.7754631	20.3486691	20.9997101	20.8333321	20.4716434	20.8478012	20.4933453	21.3614006	21.1007846	21.0141773	20.2
18	2023-06-06T03:02:59:55Z	1.14329054	6.86034298	20.711565	20.9129047	20.7647304	20.3486691	20.9997101	20.8333321	20.478878	20.8478012	20.4933453	21.3614006	21.0648155	20.9997101	20.2
19	2023-06-06T03:15:16Z	1.47007346	6.86034298	20.711565	20.9129047	20.7754631	20.3486691	20.9924774	20.8333321	20.478878	20.8478012	20.4933453	21.3614006	21.0507483	20.9997101	20.2
20	2023-06-06T03:27:83Z	-1.14329054	6.86034298	20.711565	20.9129047	20.7647304	20.3486691	20.9924774	20.8333321	20.478878	20.8478012	20.4933453	21.3614006	21.0507483	21.0141773	20.2
21	2023-06-06T03:39:09Z	-1.14329054	6.86034298	20.711565	20.9129047	20.7647304	20.3486691	20.9997101	20.8478012	20.478878	20.8478012	20.4933453	21.3522316	21.0507483	21.0141773	20.2
22	2023-06-06T03:51:30Z	1.30873794	6.86034298	20.7127888	20.9225483	20.7754631	20.3486691	20.9924774	20.8478012	20.478878	20.8478012	20.4933453	21.3522316	21.0507483	21.0141773	20.2

Fuente: Elaboración propia.

Se guardó el archivo y se repitió el procedimiento para los seis días restantes de la semana. Se redondearon los datos a un decimal debido a la resolución de los sensores, se dividió el texto de la columna de tiempo en dos columnas correspondientes a la fecha y hora. El tiempo registrado en cada dato considera la Hora del Meridiano de Greenwich (GMT), por lo que, para convertirlo en tiempo de Perú, se restó 5 horas a cada registro antes de la medianoche y se sumó 19 horas a cada registro después de esa hora. Se procesaron los datos de tiempo para los seis días siguientes utilizando la misma conversión. Como se observa en la Figura 16., se creó un nuevo archivo y se copiaron todos los datos de cada día uno debajo de otro. Finalmente, se exportó el archivo el formato CSV.

Figura 16. Datos procesados desde el 6 al 12 de junio de 2023.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Procesamiento de los procesos de secado

Se creó una nueva hoja de cálculo y se copiaron las columnas del aspecto coffe_aspect. Se abrieron los archivos de datos de motor_aspect, tz1_aspect y tz2_aspect, las columnas de las variables se copiaron y ordenaron según su relación en el nuevo archivo. Tal como se observa en la Figura 17., todos los datos comparten la misma marca temporal, de esta forma se obtuvo un solo archivo para la primera semana.

Figura 17. Datos de los aspectos para la semana del 15 al 21 de junio de 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Se guardó el archivo y se repitió el procedimiento para las otras dos semanas del proceso. Se redondearon los datos a un decimal debido a la resolución de los sensores, se dividió el texto de la columna de tiempo en dos columnas correspondientes a la fecha y hora. Se procesaron los datos de fecha y tiempo para las tres semanas utilizando la misma conversión que se realizó con los datos sin café. Como se observa en la Figura 18., se creó un nuevo archivo y se copiaron todos los datos de cada semana uno debajo de otro. Se insertaron dos columnas y se realizó el cálculo para determinar las temperaturas promedio para cada zona en cada punto de tiempo. Finalmente, se exportó el archivo en formato CSV, estos pasos se repitieron para cada proceso de secado.

Figura 18. Datos procesados desde el 15 de junio al 5 de julio de 2023.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
1	fecha	hora	b1	b2	r1	r2	m1	m2	m3	m4	v1	v2	v3	v4	hum	temp1	t1	t2	t3	t5	t6	temp2	t7	t8	t9		
2	15/06/2023	00:00:37	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.1	0.1	78.3	20.7	20.7	20.2	21.0	20.6	21.1	20.8	20.4	21.1	20.8	
3	15/06/2023	00:01:40	15.7	10.5	19.2	21.1	9.5	5.1	5.2	5.1	5.3	0.1	0.1	0.2	0.2	78.4	20.7	20.7	20.2	21.0	20.6	21.1	20.8	20.4	21.1	20.8	
4	15/06/2023	00:02:40	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.2	0.0	78.4	20.7	20.7	20.2	20.9	20.6	21.0	20.8	20.4	21.1	20.8	
5	15/06/2023	00:03:43	15.7	10.5	19.2	21.2	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.2	0.0	78.2	20.7	20.7	20.1	20.9	20.6	21.0	20.7	20.4	21.1	20.8	
6	15/06/2023	00:04:42	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.1	0.0	78.3	20.6	20.7	20.1	20.9	20.6	21.0	20.8	20.4	21.1	20.8	
7	15/06/2023	00:05:45	15.7	10.5	19.2	21.2	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.1	0.1	78.2	20.6	20.7	20.2	20.9	20.6	21.0	20.8	20.4	21.1	20.8	
8	15/06/2023	00:06:44	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.2	0.0	78.2	20.7	20.7	20.2	20.9	20.6	21.0	20.8	20.4	21.1	20.8	
9	15/06/2023	00:07:47	15.7	10.5	19.2	21.4	10.8	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.1	0.1	78.3	20.7	20.7	20.2	20.9	20.6	20.9	20.7	20.4	21.1	20.7	
10	15/06/2023	00:08:49	15.7	10.5	19.2	21.8	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.2	0.0	78.3	20.6	20.7	20.1	20.9	20.6	21.0	20.7	20.4	21.0	20.7	
11	15/06/2023	00:09:49	15.7	10.5	19.2	21.1	9.8	5.1	5.2	5.1	5.3	0.1	0.1	0.1	0.1	78.5	20.7	20.7	20.2	20.9	20.6	21.0	20.7	20.4	21.0	20.8	
12	15/06/2023	00:10:49	15.7	10.5	19.2	21.7	10.0	5.1	5.2	5.2	5.3	0.1	0.0	0.0	0.0	78.4	20.7	20.7	20.2	20.9	20.6	21.0	20.7	20.4	21.0	20.8	
13	15/06/2023	00:11:51	15.7	10.5	19.2	26.0	7.8	5.1	5.2	5.2	5.3	0.2	0.1	0.1	0.1	78.4	20.7	20.7	20.2	20.9	20.6	21.0	20.7	20.4	21.0	20.8	
14	15/06/2023	00:12:51	15.7	10.5	19.2	22.4	10.0	5.1	5.2	5.2	5.3	0.1	0.1	0.1	0.0	78.7	20.7	20.7	20.3	20.9	20.6	20.9	20.4	20.4	21.1	20.8	
15	15/06/2023	00:13:53	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.7	5.3	0.0	0.0	0.0	0.1	78.9	20.7	20.7	20.3	20.9	20.6	21.0	20.7	20.4	21.1	20.8	
16	15/06/2023	00:14:53	15.7	10.5	19.2	21.1	9.0	5.0	5.2	5.1	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	78.9	20.7	20.7	20.3	20.9	20.6	21.0	20.7	20.4	21.1	20.8	
17	15/06/2023	00:15:55	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0	20.7	20.7	20.3	20.9	20.6	21.0	20.8	20.4	21.1	20.9	
18	15/06/2023	00:16:55	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.0	0.0	0.0	0.1	79.1	20.7	20.7	20.4	21.0	20.6	21.0	20.8	20.5	21.1	20.9	
19	15/06/2023	00:18:02	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.2	0.0	79.3	20.7	20.7	20.4	21.0	20.5	21.0	20.8	20.5	21.1	20.9	
20	15/06/2023	00:18:58	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.0	0.1	79.2	20.7	20.7	20.5	21.0	20.4	20.9	20.8	20.5	21.1	20.9	
21	15/06/2023	00:20:00	15.7	10.5	19.2	21.2	10.0	5.1	5.2	5.3	5.3	0.2	0.0	0.1	0.0	79.5	20.7	20.7	20.5	21.0	20.5	20.9	20.8	20.5	21.2	20.9	
22	15/06/2023	00:21:02	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.2	0.1	79.6	20.7	20.8	20.5	21.0	20.5	21.0	20.8	20.5	21.1	20.9	
23	15/06/2023	00:22:03	15.7	10.5	19.2	21.1	10.0	5.1	5.2	5.1	5.3	0.2	0.1	0.1	0.1	79.6	20.7	20.7	20.5	21.0	20.5	21.0	20.8	20.5	21.1	20.9	

Fuente: Elaboración propia.

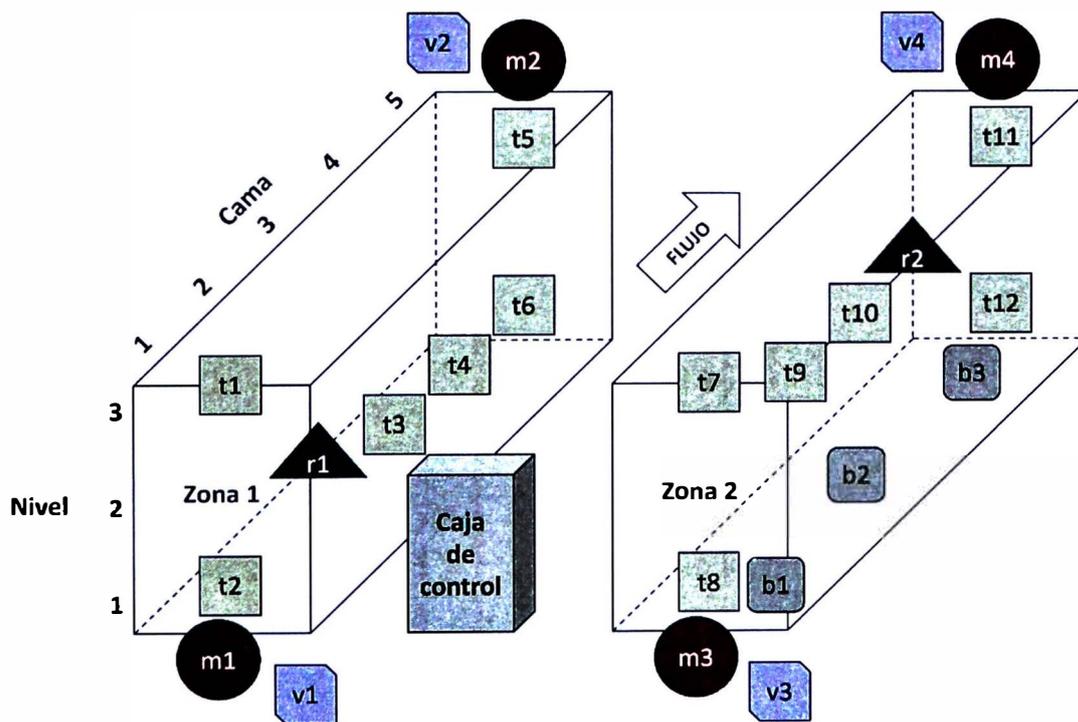
5.3. Análisis de la información

5.3.1. Ubicación de sensores y actuadores en el secador

La ubicación de los sensores y actuadores se observa en la Figura 19., el secador se divide en dos zonas, la zona 1 está ubicada a la izquierda de la caja de control y la zona 2 a su derecha. Cada zona está conformada por 3 niveles y cada nivel está

conformado por 5 camas, el aire fluye en dirección desde la cama 1 hasta la cama 5. El motor m1 y sensor de velocidad de aire v1 corresponden con el ventilador de inyección de aire de la zona 1. El motor m2 y sensor de velocidad de aire v2 corresponden con el ventilador de extracción de aire de la zona 1. El motor m3 y sensor de velocidad de aire v3 corresponden con el ventilador de inyección de aire de la zona 2. El motor m4 y sensor de velocidad de aire v4 corresponden con el ventilador de extracción de aire de la zona 2.

Figura 19. Ubicación de sensores y actuadores en el secador solar de café.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11., se observa la ubicación de los sensores de temperatura, radiación y balanzas según el nivel y la cama para cada zona del secador. Los sensores se distribuyen en diferentes posiciones para analizar la variación de las variables. Para los procesos de secado, el sensor de temperatura t4 fue reemplazado por el sensor

de humedad ambiental hum y no se configuró el envío de datos a la nube del sensor de temperatura t10 debido a la restricción del número de variables.

Tabla 11. Ubicación de sensores según el nivel, cama y zona.

Dispositivo	Zona	Nivel	Cama
Sensor de temperatura t1	1	3	1
Sensor de temperatura t2	1	1	1
Sensor de temperatura t3	1	2	2 y 3
Sensor de temperatura t4	1	2	3 y 4
Sensor de temperatura t5	1	3	5
Sensor de temperatura t6	1	1	5
Sensor de radiación r1	1	1	3
Sensor de temperatura t7	2	3	1
Sensor de temperatura t8	2	1	1
Sensor de temperatura t9	2	2	2 y 3
Sensor de temperatura t10	2	2	3 y 4
Sensor de temperatura t11	2	3	5
Sensor de temperatura t12	2	1	5
Sensor de radiación r2	2	3	3
Balanza b1	2	1	1
Balanza b2	2	1	3
Balanza b3	2	1	5

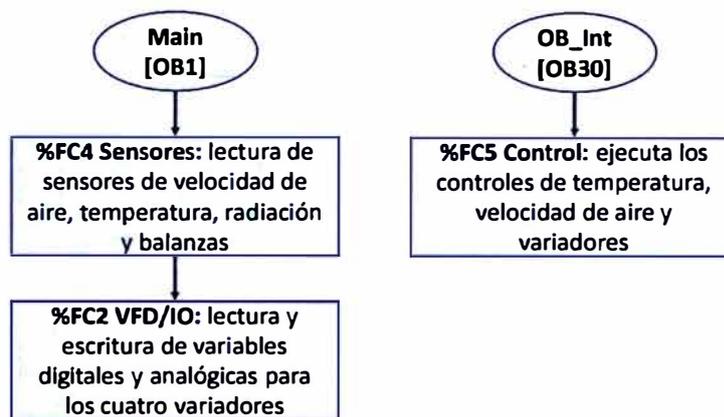
Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Algoritmo de control inicial

La programación del PLC considera dos bloques de programa principales, como se observa en la Figura 50., ambos bloques se ejecutan de forma constante cuando el PLC está en estado de ejecución. El bloque Main ejecuta las funciones Sensores y VFD/IO; la función Sensores realiza la lectura de los cuatro sensores de velocidad de aire, doce sensores de temperatura, dos sensores de radiación y tres balanzas. Para la lectura de cada sensor se realiza una conversión de las señales análogas recibidas y un escalamiento para obtener los valores de las variables en su correcta dimensión según su hoja técnica. La función VFD/IO realiza la lectura de las señales digitales y analógicas enviadas por el VFD, del mismo modo también realiza la escritura digital y

analógica. El bloque OB_Int corresponde a una interrupción temporal y se ejecuta cada 100 ms, dentro de este bloque está la función Control, la cual ejecuta un algoritmo de control en cascada.

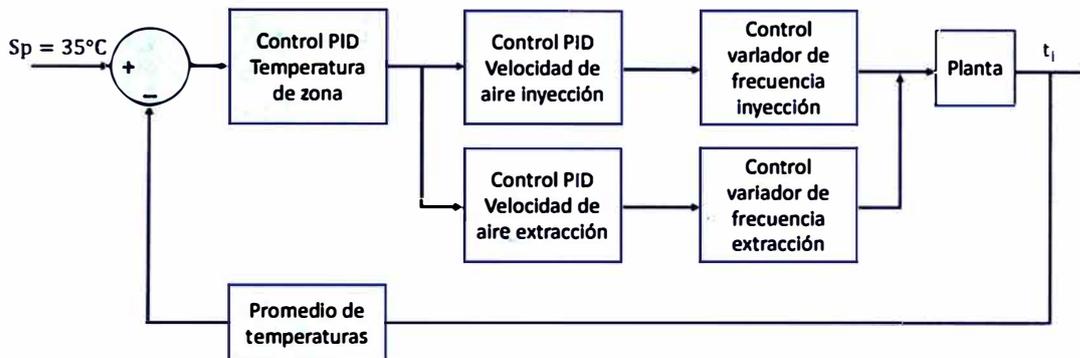
Figura 20. Diagrama de los bloques de programa principales.



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 21., el algoritmo de control inicial para el secador solar está basado en el control en cascada de temperatura, velocidad de aire y motores para cada zona de forma idéntica. Se calcula el valor promedio de los seis sensores de temperatura de la zona y se realiza un control PID que determina la velocidad de aire necesaria para obtener la temperatura objetivo. Esta velocidad de aire es el valor objetivo en otros dos controles PID para los motores de inyección y extracción, la señal de control determina la velocidad a la que deben girar los motores y este valor es enviado a los VFD para que controlen a los motores en la velocidad objetivo. Los parámetros de todos los controles PID fueron sintonizados automáticamente con el software TIA Portal. Los motores están acoplados a los ventiladores y al girar actúan sobre las temperaturas (t_i) de la planta.

Figura 21. Diagrama del algoritmo de control inicial para una zona del prototipo de secador solar.



Fuente: Elaboración propia.

El control está limitado por una condición que apaga los motores si la temperatura media es menor por un grado a la temperatura objetivo, esto implica que no se recibe suficiente calor para subir la temperatura. Si el valor de la temperatura media supera la temperatura objetivo, los motores se vuelven a activar y ejecutan el ciclo de control. En el HMI presenta botones para intercambiar entre control automático y manual de los motores, de forma predeterminada el control es manual al iniciar el sistema. Los sensores de radiación y balanzas solo registran datos, pero no intervienen en el control de las otras variables.

5.3.3. Análisis en el período sin café

En el período sin café, el sistema IoT recolectó 53843 puntos de datos, cada uno con una diferencia de 10 segundos aproximadamente. Se consideró esta frecuencia para detallar de forma precisa el comportamiento de las variables y probar la robustez del sistema IoT. Sin embargo, para disminuir el tiempo de generación de gráficos, en los siguientes análisis se consideró una frecuencia de 1 minuto entre puntos de datos

aproximadamente. La cantidad total de puntos de datos registrados en cada día de la semana sin café se observa en la Tabla 12., los días 8, 9 y 10 de junio de 2023, se presentaron cortes de energía eléctrica de más de 4 minutos por lo que se registraron menos datos en total. El día 12 de junio de 2023 presentó la menor cantidad de datos debido el sistema IoT dejó de enviar información a las 17:58, este problema se solucionó al día siguiente reiniciando el sistema. A causa de los cortes de energía eléctrica y el requerimiento del reinicio del sistema en caso se deje de enviar la información, se cambió la configuración para que el control inicie en modo automático por defecto, en caso contrario se tendría que volver a configurar el control en el HMI para cada ocasión.

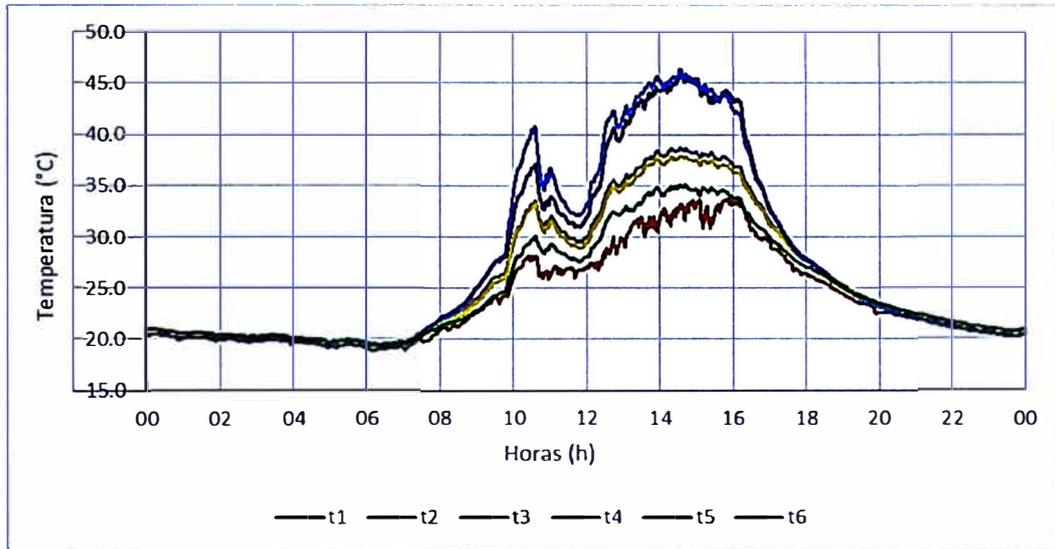
Tabla 12. Cantidad de puntos de datos en el período sin café.

Día	Cantidad de puntos de datos
6 de junio de 2023	7981
7 de junio de 2023	7984
8 de junio de 2023	7959
9 de junio de 2023	7959
10 de junio de 2023	7967
11 de junio de 2023	7998
12 de junio de 2023	5995

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 22., se graficaron las temperaturas de la zona 1, las temperaturas 1 y 5 presentaron los mayores valores con un máximo de 46,3 °C a las 14:34 aproximadamente, esto se debe a que ambos sensores se ubican en el nivel 3 que está más arriba. Las temperaturas 2 y 6 presentaron los menores valores con un máximo de 35,2 °C a las 14:42 aproximadamente, esto se debe a que ambos sensores se ubican en el nivel 1 que está más abajo. Las temperaturas 3 y 4 presentan valores intermedios con un máximo de 38,7 °C a las a las 14:34 aproximadamente.

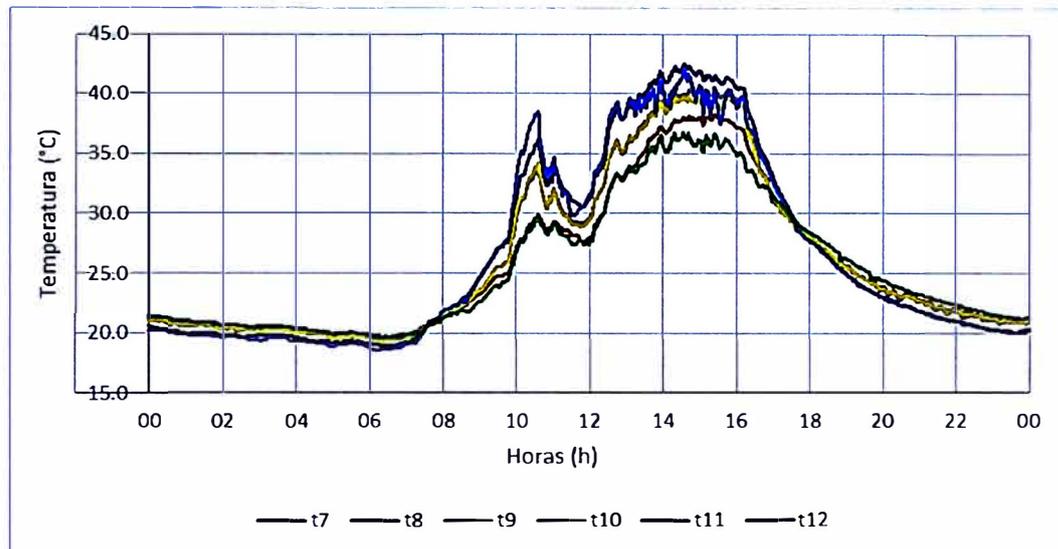
Figura 22. Temperaturas de la zona 1 el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 23., se graficaron las temperaturas de la zona 2, las temperaturas 7 y 11 presentaron los mayores valores con un máximo de 42,5 °C a las 14:34 aproximadamente, esto se debe a que ambos sensores se ubican en el nivel 3 que está más arriba. Las temperaturas 8 y 12 presentaron los menores valores con un máximo de 38,3 °C a las 15:24 aproximadamente, esto se debe a que ambos sensores se ubican en el nivel 1 que está más abajo. Las temperaturas 9 y 10 presentan valores intermedios con un máximo de 40,6 °C a las a las 15:24 aproximadamente.

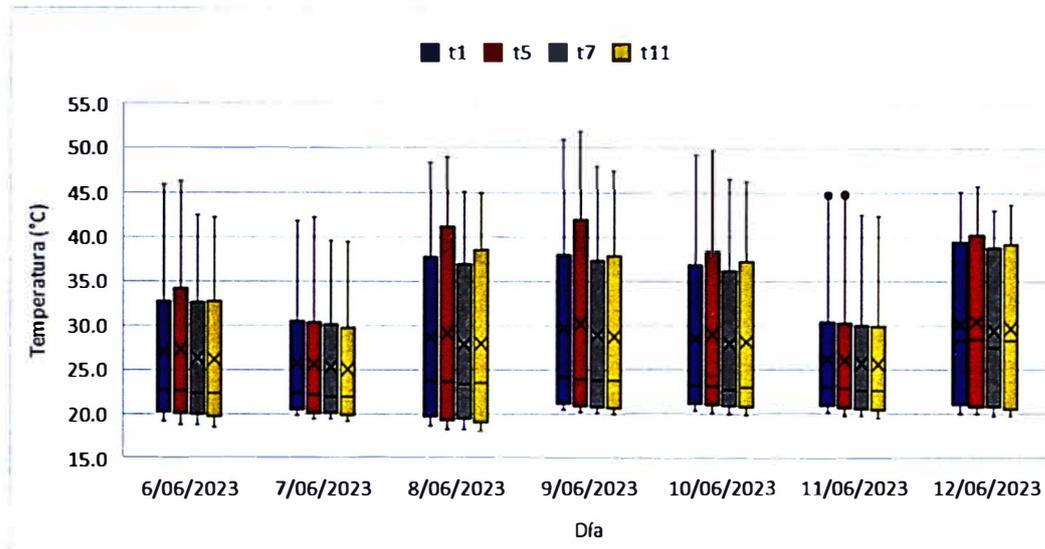
Figura 23. Temperaturas de la zona 2 el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24., se realizó el diagrama de cajas y bigotes para los sensores de temperatura 1, 5, 7 y 11, los cuales se ubican en el nivel 3. Los sensores 1 y 5, correspondientes a la zona 1 presentan temperaturas mayores que los sensores 7 y 11 de la zona 2. El sensor 1 que se ubica la cama 1, más cercana al ventilador inyector de aire, presenta temperaturas menores que el sensor 5 que se ubica en la cama 5, más cercana al ventilador de extracción de aire. Sin embargo, los sensores 7 y 12 presentan temperaturas similares a lo largo de la semana.

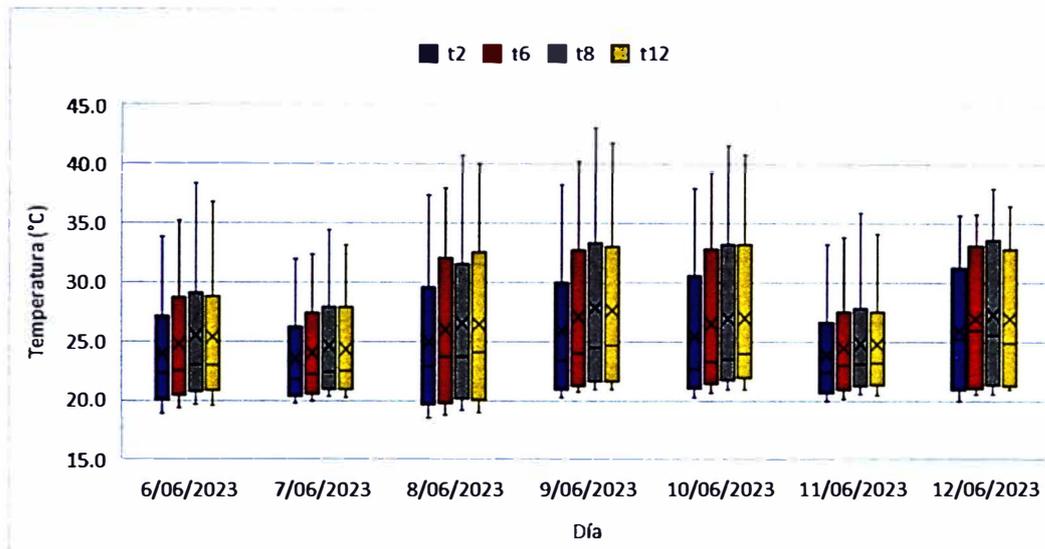
Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes de los sensores de temperatura 1, 5, 7 y 11 del 6 al 12 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 25., se realizó el diagrama de cajas y bigotes para los sensores de temperatura 2, 6, 8 y 12, los cuales se ubican en el nivel 1. Los sensores 8 y 12, correspondientes a la zona 2 presentan temperaturas mayores que los sensores 2 y 6 de la zona 1. El sensor 8 que se ubica la cama 1, más cercana al ventilador inyector de aire, presenta mayores temperaturas que el sensor 12 que se ubica en la cama 5, más cercana al ventilador de extracción de aire. Sin embargo, el sensor 2 que se ubica la cama 1, más cercana al ventilador inyector de aire, presenta menores temperaturas que el sensor 6 que se ubica en la cama 5, más cercana al ventilador de extracción de aire.

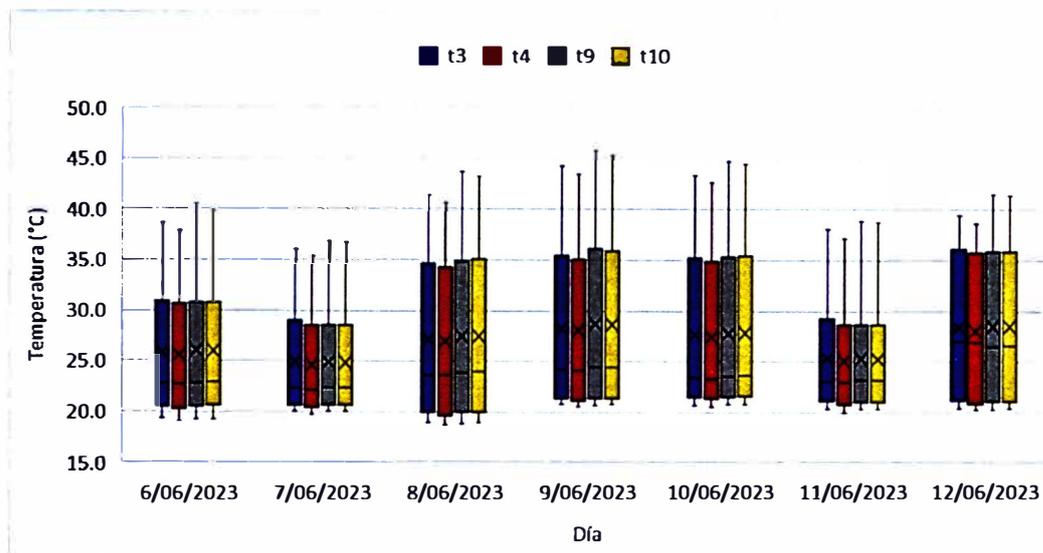
Figura 25. Diagrama de cajas y bigotes de los sensores de temperatura 2, 6, 8 y 12 del 6 al 12 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26., se realizó el diagrama de cajas y bigotes para los sensores de temperatura 3, 4, 9 y 10, los cuales se ubican en el nivel 2. Los sensores 9 y 10, correspondientes a la zona 2 presentan temperaturas mayores que los sensores 3 y 4 de la zona 1. Los cuatro sensores presentan temperaturas similares a lo largo de la semana.

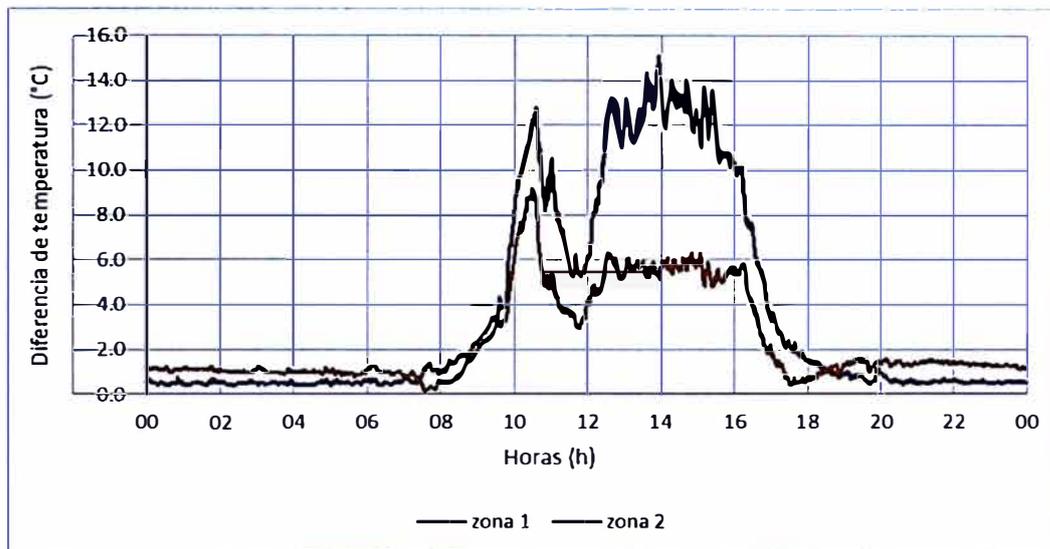
Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes de los sensores de temperatura 3, 4, 9 y 10 del 6 al 12 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se calculó la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado por los sensores de temperatura para la zona 1 y 2. Se graficó la diferencia para todo el día 6 de junio de 2023 como se observa en la Figura 27., aproximadamente entre las 07 h y 19 h, la diferencia para la zona 1 es mayor que la diferencia para la zona 2, sin embargo, en el complemento del día, los sensores de la zona 1 presentan menor divergencia entre sí mismos en comparación con los sensores de la zona 2. Estas tendencias se repiten a lo largo de la semana.

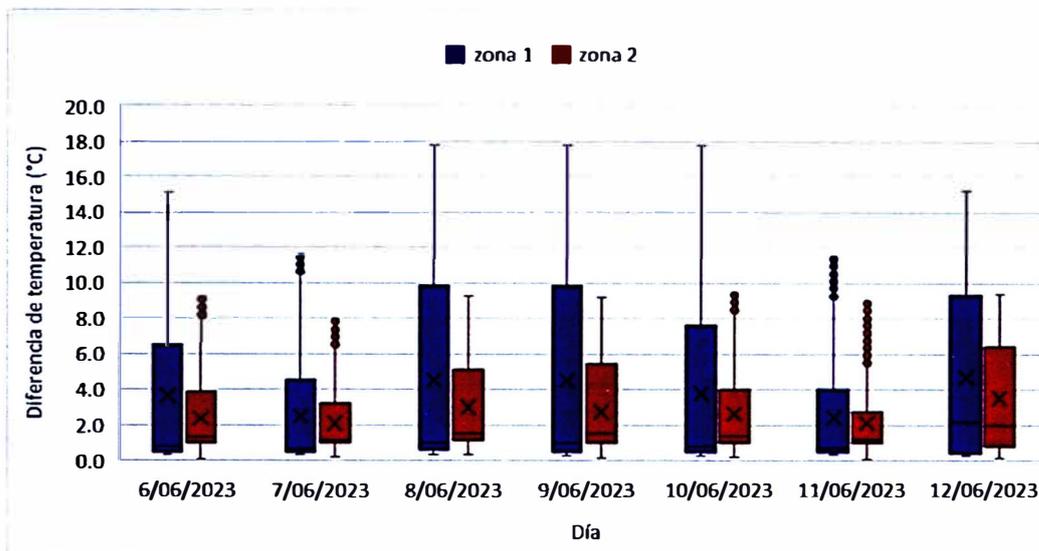
Figura 27. Diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado por los sensores de temperatura para la zona 1 y 2 el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se calculó la diferencia de temperatura entre el valor máximo y mínimo registrado por todos los sensores para cada zona y se realizó el diagrama de cajas y bigotes en la Figura 28., se aprecia que la zona 1 presenta mayor diferencia de valores de temperatura, mientras que la zona 2 presenta menor diferencia de valores de temperatura. Esto implica que la zona 2 presenta una distribución de temperaturas más homogénea que la zona 1, sin embargo, la variación de temperatura en diferentes niveles es considerable.

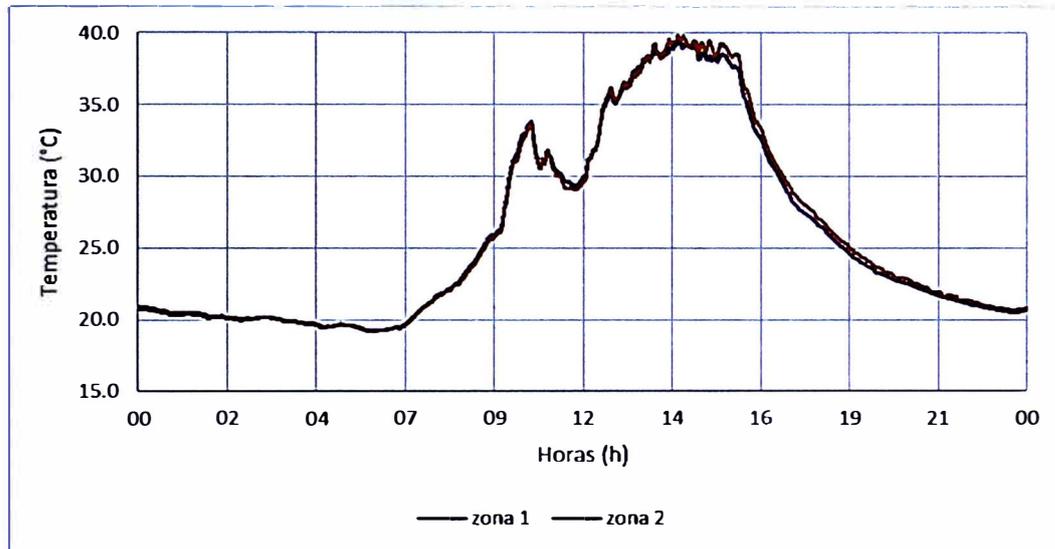
Figura 28. Diagrama de cajas y bigotes de la diferencia de temperatura para cada zona del 6 al 12 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 29., se observa la temperatura promedio para la zona 1 y 2 en el día 6 de junio de 2023, a pesar de las diferencias entre las temperaturas independientes para cada zona, se aprecia una alta similitud entre ambos gráficos. Esto indica que, como conjunto, ambas zonas presentan el mismo comportamiento, el promedio presenta la misma tendencia que cada temperatura independientemente. La diferencia entre ambos valores promedios presenta un máximo de 1,3 °C a las 15:23; sin embargo, no significativo considerando la precisión de los sensores. Estas observaciones se repiten a lo largo de la semana, por lo tanto, se estableció un algoritmo con solo el promedio de temperaturas de la zona 1, considerando que se presentará un comportamiento similar en el promedio de temperaturas de la zona 2.

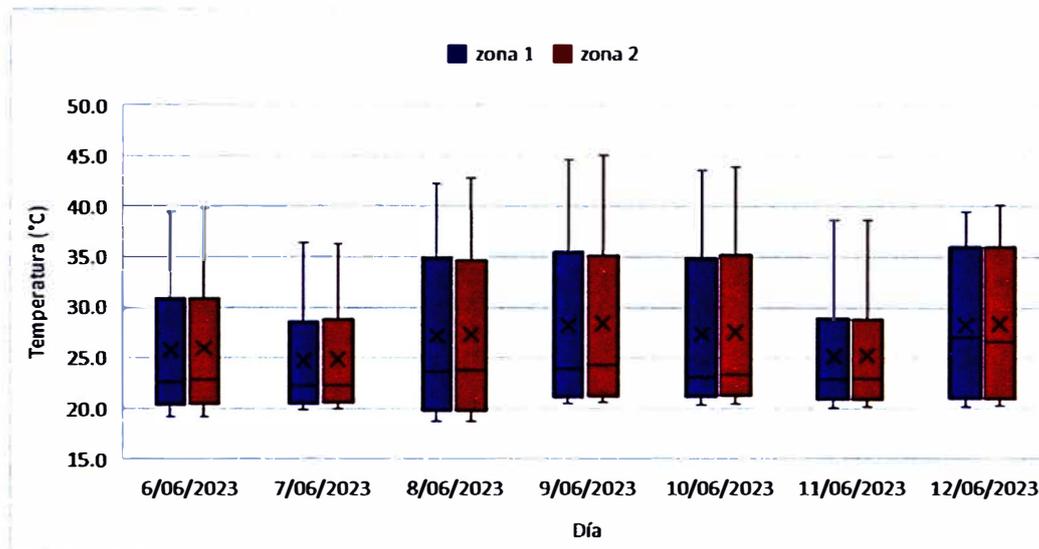
Figura 29. Temperatura promedio para ambas zonas en el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30., se realizó el diagrama de cajas y bigotes de las temperaturas promedio para la zona 1 y 2. Se aprecia que ambos promedios presentan temperaturas máximas y mínimas similares a lo largo de la semana. También se mantiene la tendencia presentada por cada grupo de sensores.

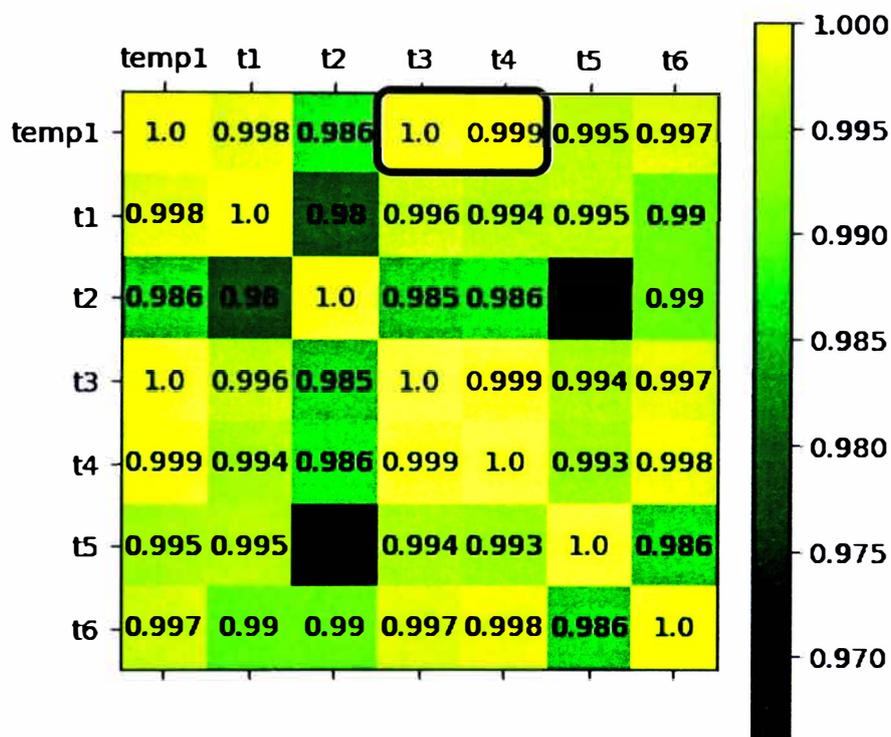
Figura 30. Diagrama de cajas y bigotes de las temperaturas promedio para ambas zonas del 6 al 12 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se graficó la matriz de correlación de Pearson para las temperaturas y su promedio en la zona 1, como se observa en la Figura 31., todas las temperaturas se están altamente correlacionadas con su promedio, sin embargo, las temperaturas 3 y 4 presentan los máximos valores de correlación.

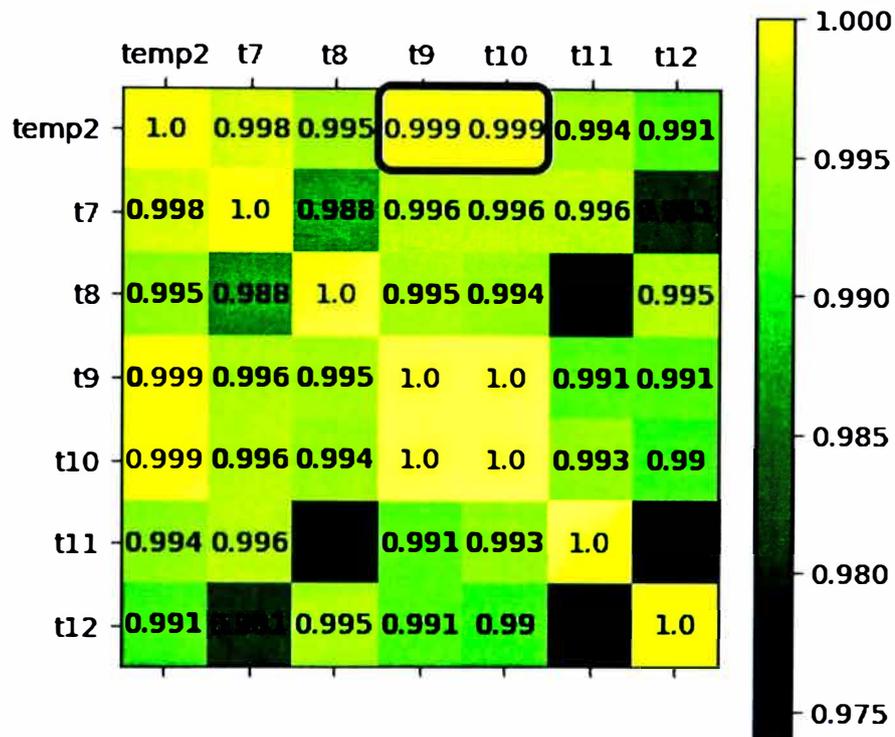
Figura 31. Matriz de correlación para las temperaturas y su promedio en la zona 1 del 6 al 12 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se graficó la matriz de correlación de Pearson para las temperaturas y su promedio en la zona 2, como se observa en la Figura 32., todas las temperaturas se están altamente correlacionadas con su promedio, sin embargo, las temperaturas 9 y 10 presentan los máximos valores de correlación.

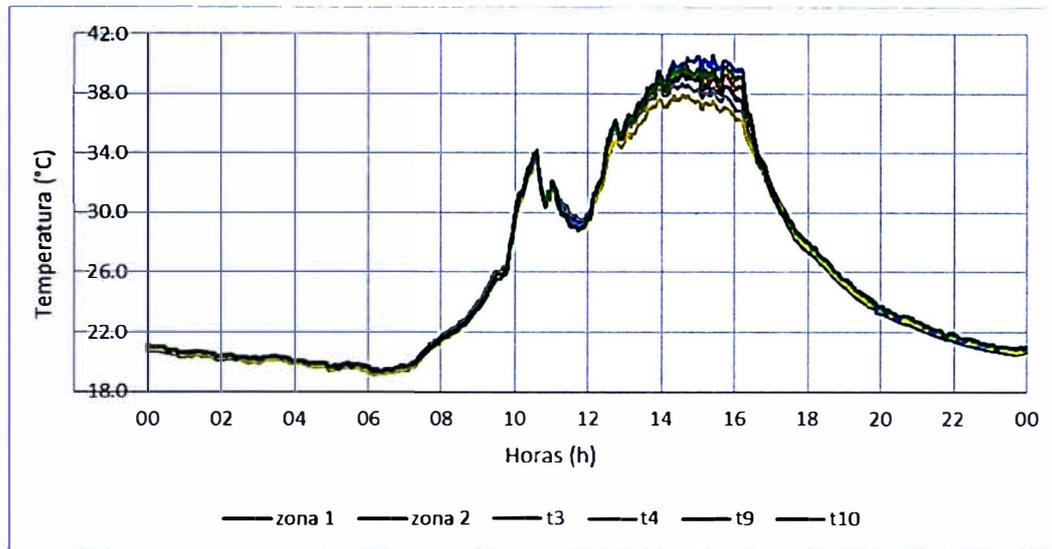
Figura 32. Matriz de correlación para las temperaturas y su promedio en la zona 2 del 6 al 12 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 33., los valores de las temperaturas 3, 4, 9 y 10, así como las temperaturas promedio de ambas zonas, presentan un comportamiento similar a lo largo del día 6 de junio de 2023. Se evidencia la alta correlación que presentan las 6 variables.

Figura 33. Temperaturas 3, 4, 9, 10 y promedios de ambas zonas el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se calculó la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado por los sensores de temperatura 3, 4, 9, 10 y promedios de ambas zonas. Se graficó la diferencia para todo el día 6 de junio de 2023 como se observa en la Figura 34., la máxima diferencia es de 3,6 °C a las 16:11. Antes de las 12 h y después de las 17 h, la diferencia de temperaturas no es significativa. Estas tendencias se repiten a lo largo de la semana, la máxima diferencia se registró el 9 de junio de 2023 con un valor de 4,4 °C a las 16:40. Por lo tanto, las temperaturas 3, 4, 9 y 10 representan correctamente el comportamiento de la cámara, debido a que presentan poca diferencia respecto a los promedios. Por este motivo, se reemplazó el sensor 4 con el sensor de humedad ambiental, porque está ubicado en una posición central que permite representar correctamente la humedad ambiental en la cámara. De la misma forma, se eliminó

de las variables enviadas por IoT al sensor 10, debido a que afecta menos a la variación del promedio en la zona 2.

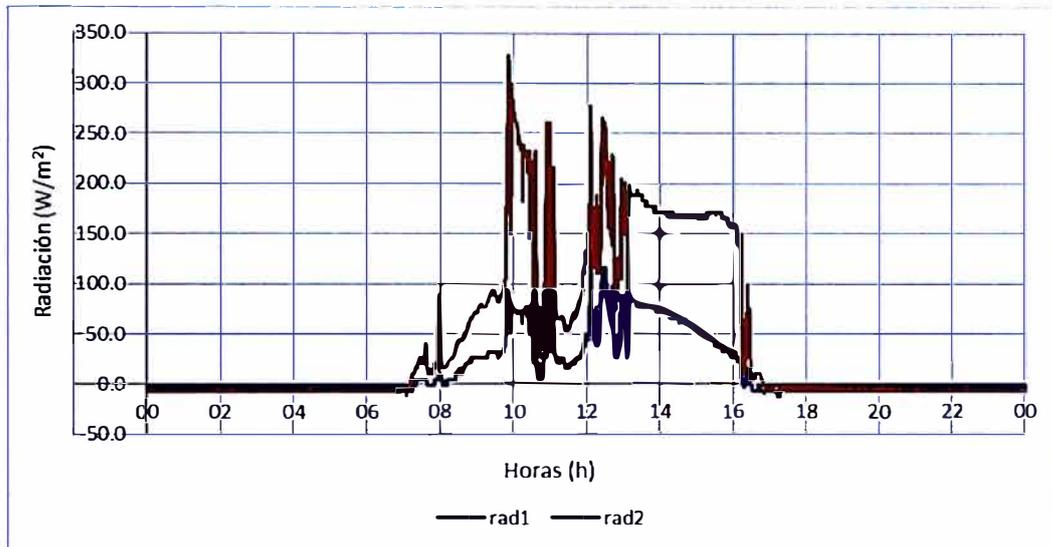
Figura 34. Diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado por los sensores de temperatura 3, 4, 9, 10 y promedios de ambas zonas el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el gráfico de los sensores de radiación en la Figura 35., se aprecia que el sensor 2, ubicado en el nivel 3, presenta mayores valores que el sensor 1, ubicado en el nivel 1. La tendencia se repite en toda la semana, esto se debe a que el nivel 3 recibe radiación directamente luego de pasar por las calaminas que conforman el techo, pero el nivel 1 se ubica debajo de las camas del nivel 2 y 3 por lo que la radiación recibida es menor. Por este motivo, los sensores ubicados en el nivel 3, al recibir mayor radiación, incrementan más su temperatura en comparación con los sensores ubicados en los niveles 1 y 2. Ambos sensores presentan la misma tendencia a lo largo del día.

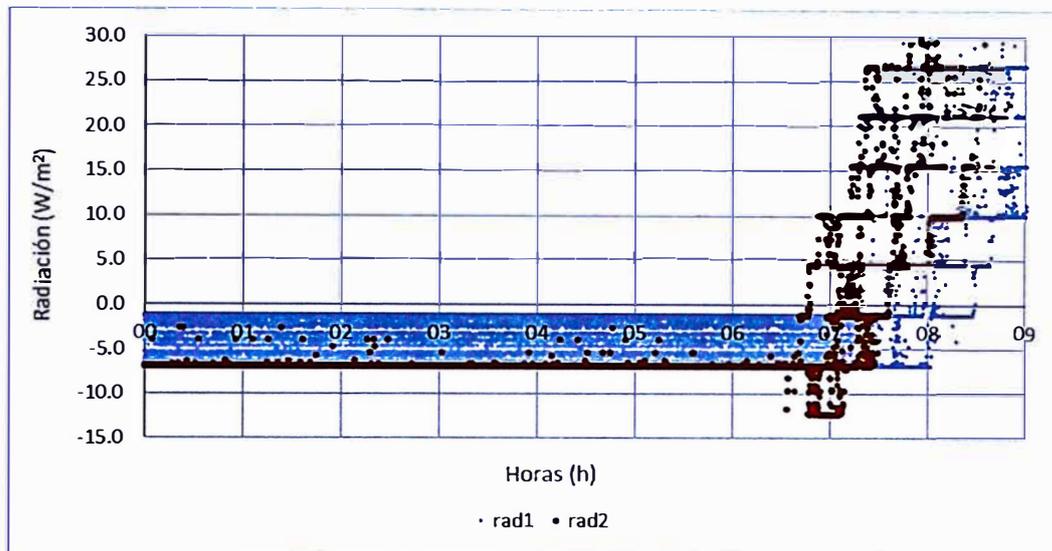
Figura 35. Radiación 1 y 2 el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 36., a lo largo de la semana del 6 al 12 de junio de 2023, los valores de radiación 1 y 2 son inferiores a 0 antes de las 06 h, los valores registrados por el sensor 1 presentan mayor ruido en comparación a los valores registrados por el sensor 2. Luego de las 06 h, la radiación registrada por ambos sensores comienza a incrementar gradualmente debido a la salida del sol.

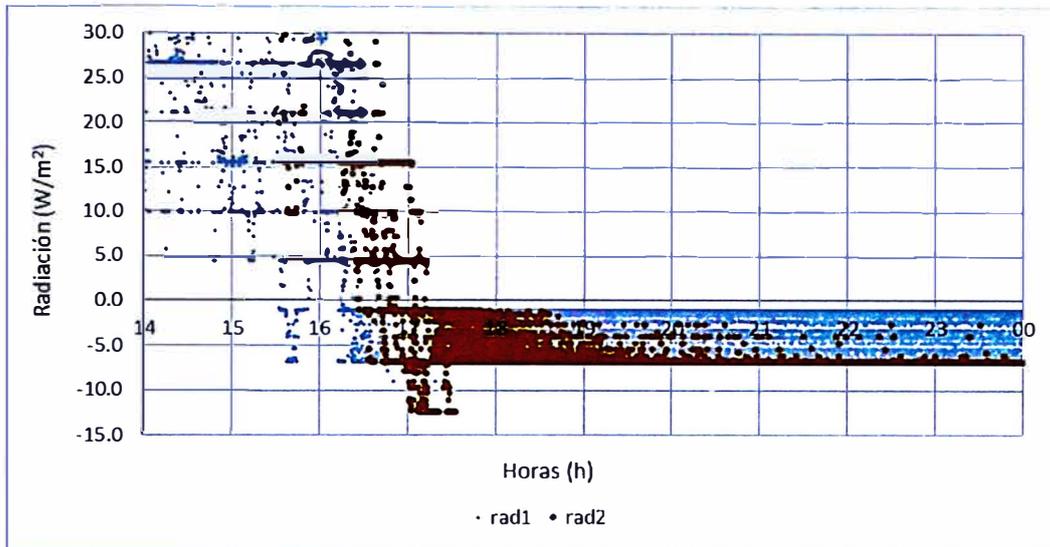
Figura 36. Radiación 1 y 2 en la semana del 6 al 12 de junio de 2023 desde las 00 h hasta las 09 h.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 37., a lo largo de la semana del 6 al 12 de junio de 2023, los valores de radiación 1 y 2 son inferiores a 0 después de las 18 h, los valores registrados por el sensor 1 presentan mayor ruido en comparación a los valores registrados por el sensor 2. Antes de las 18 h, la radiación registrada por el sensor 1 comienza a disminuir gradualmente, sin embargo, la radiación registrada por el sensor 2 disminuye bruscamente, esto se debe a que aproximadamente a esa hora el sol se oculta detrás de la montaña.

Figura 37. Radiación 1 y 2 en la semana del 6 al 12 de junio de 2023 desde las 14 h hasta las 24 h.

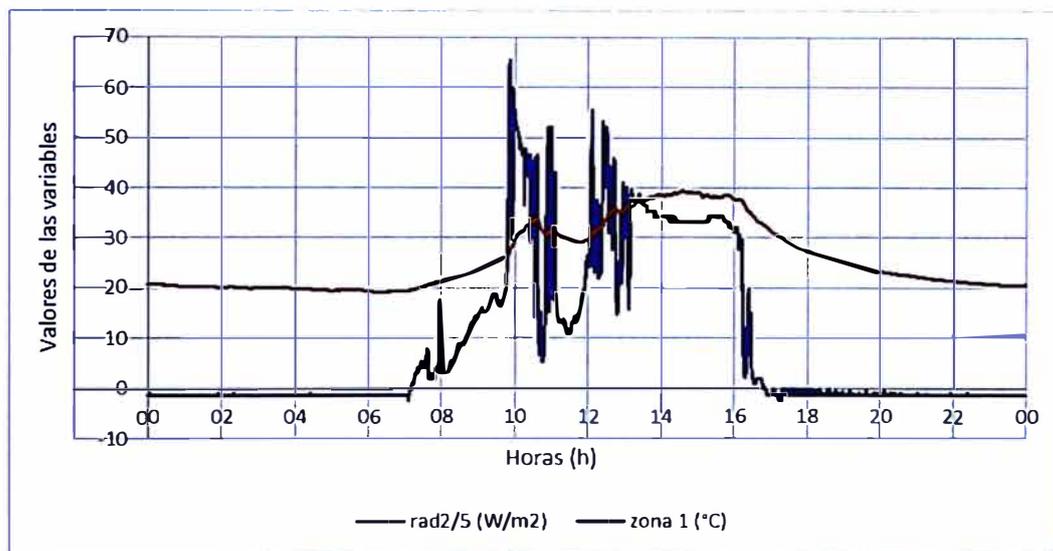


Fuente: Elaboración propia.

Se escaló el sensor de radiación 2 dividiendo sus valores entre 5 y se graficó junto a la temperatura promedio de la zona 1 el día 6 de junio de 2023, tal como se observa en la Figura 38., de esta forma ambas variables presentan un rango similar. Desde las 00 h hasta las 07 h, la radiación es menor que 0 y la temperatura disminuye ligeramente. Desde las 07 h hasta las 10 h, la radiación aumenta progresivamente, así como la temperatura. Desde las 10 h hasta las 16 h, cuando la radiación aumenta bruscamente, la temperatura aumenta con mayor pendiente, pero cuando la radiación cae bruscamente, la temperatura también disminuye. A las 16 h, la radiación presenta una caída significativa, cuando el sol se oculta detrás de la montaña, y luego permanece en valores inferiores a 0 hasta las 24 h; mientras tanto la temperatura disminuye progresivamente hasta el equilibrio térmico debido a que ya no recibe más energía por parte del sol. Cada día presenta curvas de temperatura

y radiación diferentes, sin embargo, todas siguen las mismas tendencias de radiación y temperatura; por lo tanto, hay una relación directa entre el aumento de la radiación y el aumento de la temperatura.

Figura 38. Radiación 2 escalada y temperatura promedio de la zona 1 el 6 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

5.3.4. Análisis del primer proceso de secado

Para el primer proceso de secado de café natural, se consideró un período de recolección de datos desde el 15 de junio de 2023 al 5 de julio de 2023, en total, el sistema IoT recolectó 26606 puntos de datos, cada uno con una diferencia de un minuto aproximadamente. La cantidad total de puntos de datos registrados en cada día del primer período de secado se observa en la Tabla 13., los días 16, 19 y 23 de junio, así como el 3 de julio de 2023, se presentaron interrupciones en el envío de datos mayores a un minuto por lo que se registraron menos datos en total. El día sábado 24 de junio de 2023 a las 19:33, el sistema IoT dejó de enviar información, el

domingo 25 de junio de 2023 solo se registró un dato y el día lunes 26 de junio de 2023 se reestableció la comunicación con el sistema IoT a las 15:14 al coordinar un reinicio del sistema.

Tabla 13. Cantidad de puntos de datos en el primer período de secado.

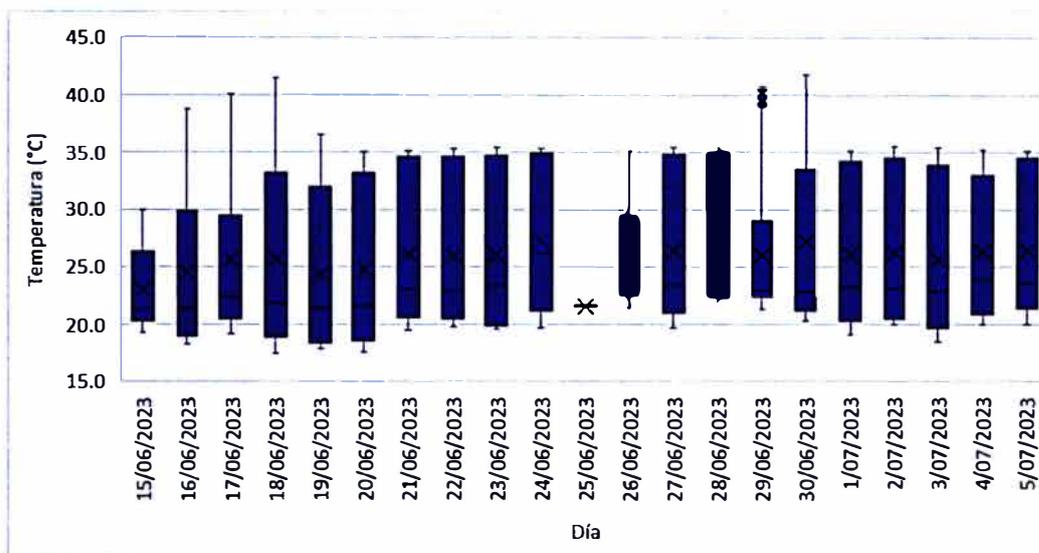
Día	Fecha	Cantidad de puntos de datos
1	15 de junio de 2023	1408
2	16 de junio de 2023	1343
3	17 de junio de 2023	1409
4	18 de junio de 2023	1402
5	19 de junio de 2023	1386
6	20 de junio de 2023	1407
7	21 de junio de 2023	1408
8	22 de junio de 2023	1406
9	23 de junio de 2023	1332
10	24 de junio de 2023	936
11	25 de junio de 2023	1
12	26 de junio de 2023	515
13	27 de junio de 2023	1408
14	28 de junio de 2023	1410
15	29 de junio de 2023	1403
16	30 de junio de 2023	1408
17	1 de julio de 2023	1408
18	2 de julio de 2023	1409
19	3 de julio de 2023	1396
20	4 de julio de 2023	1403
21	5 de julio de 2023	1408

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el diagrama de cajas y bigotes de la temperatura promedio de la zona 1, tal como se observa en la Figura 39., todos los cuartiles Q3 son inferiores a 35 °C. El día 15 de junio de 2023 se registró el menor cuartil Q3 de temperatura debido a la poca radiación registrada ese día. En seis días del proceso, la temperatura máxima superó los 36 °C. Cinco cuartiles Q1 son inferiores a 20 °C en los primeros 10 días, sin embargo, en los últimos 10 días solo un cuartil es inferior. La temperatura mínima en los primeros 10 días es 17,5 °C, sin embargo, en los últimos 10 días la temperatura mínima es 18,4 °C. Debido a la falla en el envío de datos del sistema IoT, el día 25 de

junio de 2023 no es significativo en el análisis porque solo se consideró un dato en todo el día.

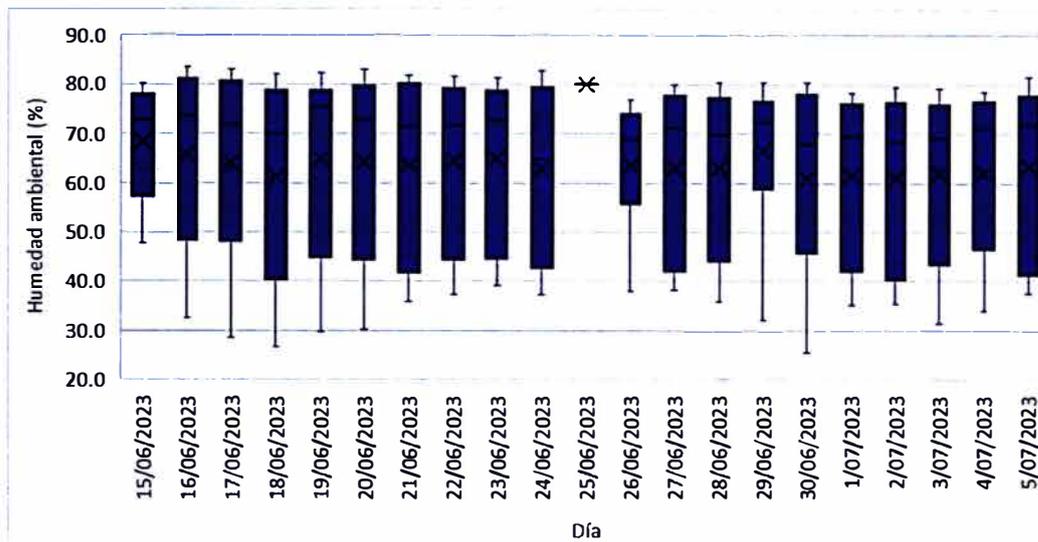
Figura 39. Diagrama de cajas y bigotes de la temperatura promedio de la zona 1 en el primer período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el diagrama de cajas y bigotes de la humedad ambiental, tal como se observa en la Figura 40., en los primeros 10 días, tres cuartiles Q3 son superiores a 80%, sin embargo, en los últimos 10 días ninguno supera 80%. Esta variación, así como el aumento de la temperatura, se deben a la instalación de un piso de cemento en el interior del secador. La humedad del suelo, debido a fuentes de agua subterráneas, se dirige al interior de la cámara, a causa de esto, la instalación del suelo resultó favorable para frenar este fenómeno. En todo el período de secado, el valor mínimo de humedad ambiental es de 25,4%.

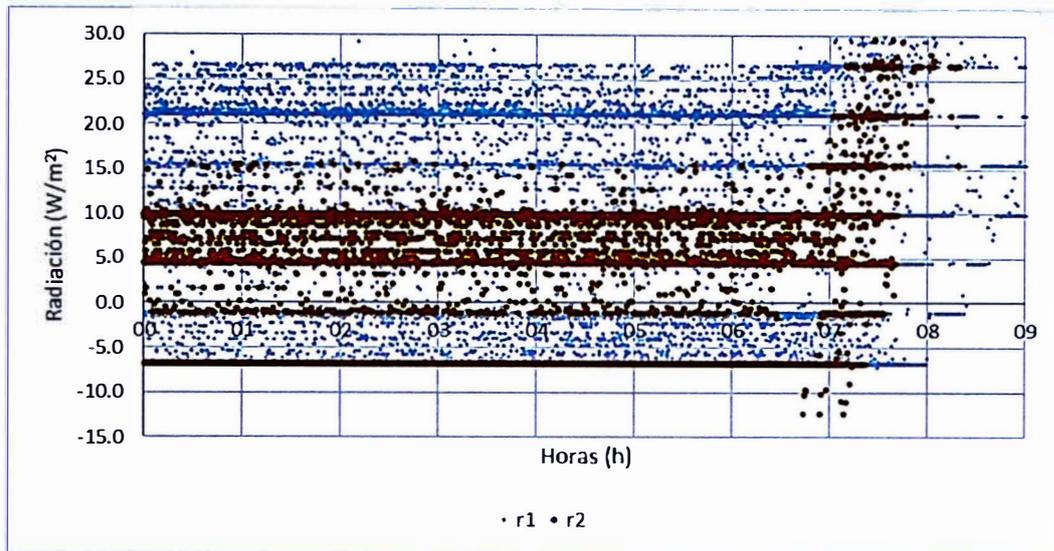
Figura 40. Diagrama de cajas y bigotes de la humedad ambiental en el primer período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 41., a lo largo del primer período de secado, los valores de radiación 1 y 2 presentan una variación significativa antes de las 06 h. Los valores registrados por el sensor 2 son más homogéneos en comparación con los valores registrados por el sensor 1. Antes de las 06 h, el valor máximo para el sensor 1 es de $32,0 \text{ W/m}^2$, sin embargo, el valor máximo para el sensor 2 es de $15,8 \text{ W/m}^2$.

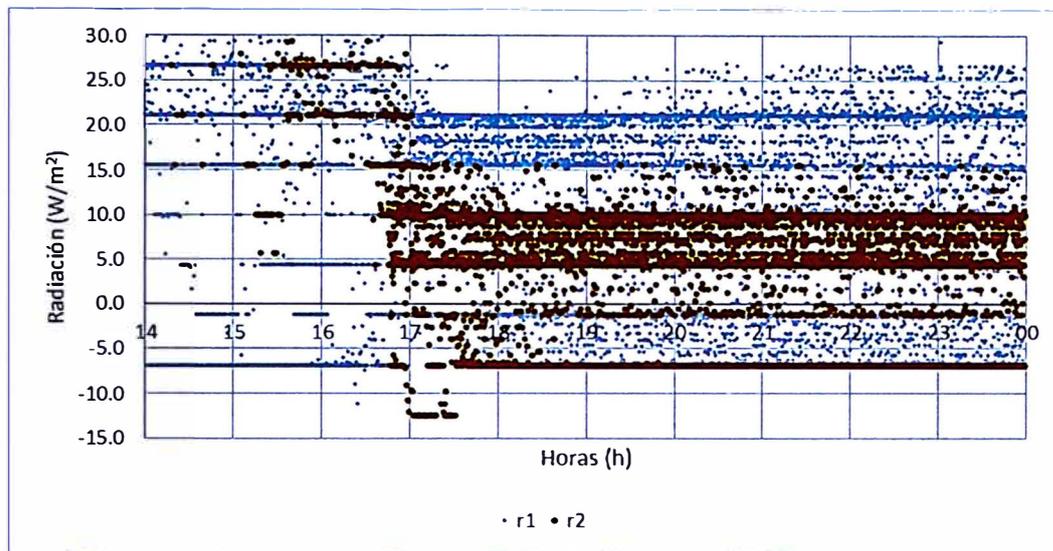
Figura 41. Radiación 1 y 2 en el primer período de secado desde las 00 h hasta las 09 h.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 42., a lo largo del primer período de secado, los valores de radiación 1 y 2 presentan una variación significativa después de las 18 h. Los valores registrados por el sensor 2 son más homogéneos en comparación con los valores registrados por el sensor 1. Después de las 18 h, el valor máximo para el sensor 1 es de $29,4 W/m^2$, sin embargo, el valor máximo para el sensor 2 es de $15,5 W/m^2$.

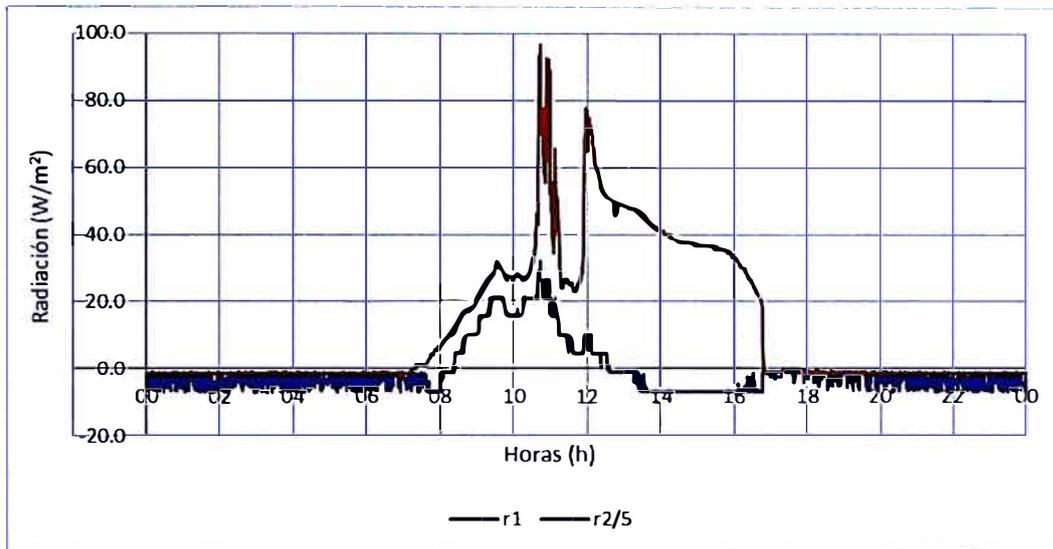
Figura 42. Radiación 1 y 2 en el primer período de secado desde las 14 h hasta las 24 h.



Fuente: Elaboración propia.

El día 30 de junio de 2023, los cuatro motores no funcionaron debido a una falla de subtensión en el circuito intermediario, se seleccionó este día para analizar el comportamiento del sistema con carga de café sin control. Se realizó la gráfica de los valores registrados por los sensores de radiación como se observa en la Figura 43., los valores del sensor 2 se dividieron entre 5 para compararlos con el otro sensor. Se aprecia que el sensor 2 presenta menor ruido que el sensor 1 en la madrugada y la noche; el sensor 2 describe con mayor detalle el comportamiento de la radiación, se aprecia claramente que, antes de las 17 h, ocurre una caída brusca debido a que el sol se oculta detrás de la montaña.

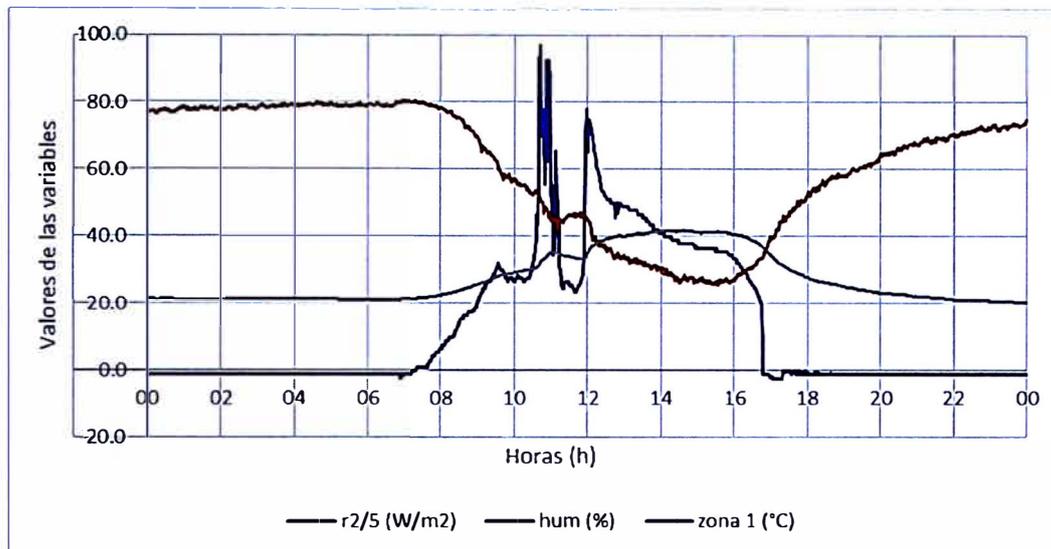
Figura 43. Radiación 2 escalada y radiación 1 el 30 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 44., se aprecia la variación de la radiación, humedad ambiental y temperatura promedio de la zona 1 el 30 de junio de 2023, cuando no se activaron los motores. El inicio del incremento de la radiación a las 07 h genera un aumento en la temperatura y disminución en la humedad ambiental. La temperatura presenta una tendencia inversa a la humedad ambiental, cuando la radiación disminuye a 0, la humedad ambiental incrementa y la temperatura disminuye. La temperatura es máxima a las 14:26 con un valor de 41,8 °C y es mínima a las 23:52 con un valor de 20,2 °C. La humedad ambiental es máxima a las 06:57 con un valor de 80,5% y es mínima a las 15:33 con un valor de 25,4%.

Figura 44. Radiación 2 escalada, humedad ambiental y temperatura promedio de la zona 1 el 30 de junio de 2023.

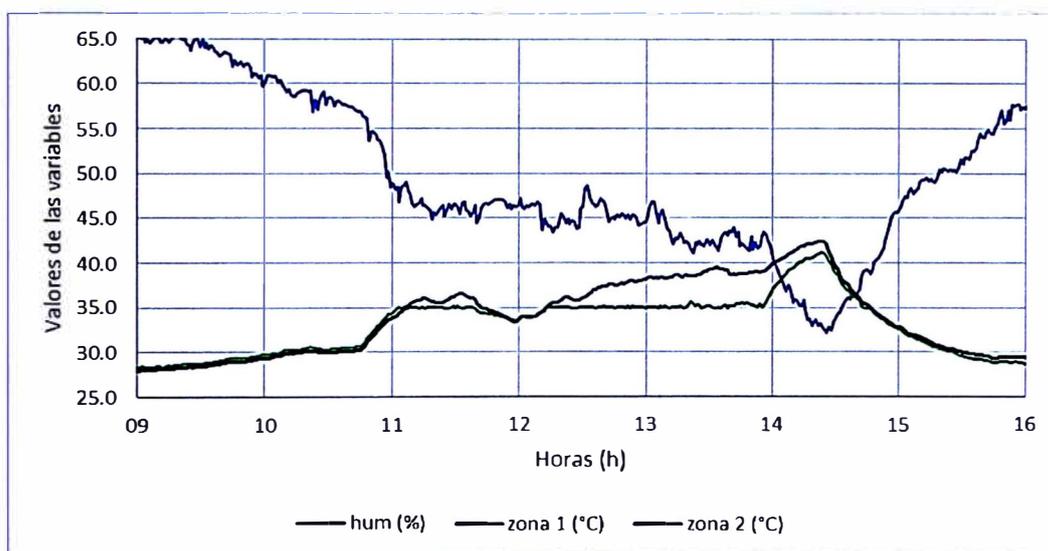


Fuente: Elaboración propia.

El día 29 de junio de 2023, solo estuvo funcionando el motor 1, pero falló por subtensión en el circuito intermediario a las 13:56. En la Figura 45., se aprecia la variación de la humedad ambiental y temperaturas promedio de ambas zonas el 30 de junio de 2023 entre las 09 h y 16 h. Se observa que ambas temperaturas mantienen un valor similar hasta 11 h cuando superan la temperatura objetivo de 35 °C, la zona 1 mantiene su temperatura debido al motor 1, pero la zona 2 eleva ligeramente su temperatura. Antes de las 12 h se produce una caída en ambas temperaturas debido a una disminución de la radiación, sin embargo, luego la temperatura 2 incrementa su valor mientras que la temperatura 1 permanece constante en la temperatura objetivo a causa del motor 1. A las 13:56 falla el motor 1, lo que produce que ambas temperaturas se eleven bruscamente, pero al ocultarse el sol, ambos valores disminuyen y permanecen similares. Esto implica la importancia

de los motores de inyección independientes en cada zona, debido a que la falta de uno desequilibra las temperaturas promedio en su respectiva zona, en este día, a pesar de que no funcionó el motor de extracción 1, la temperatura promedio 1 permaneció en el valor objetivo.

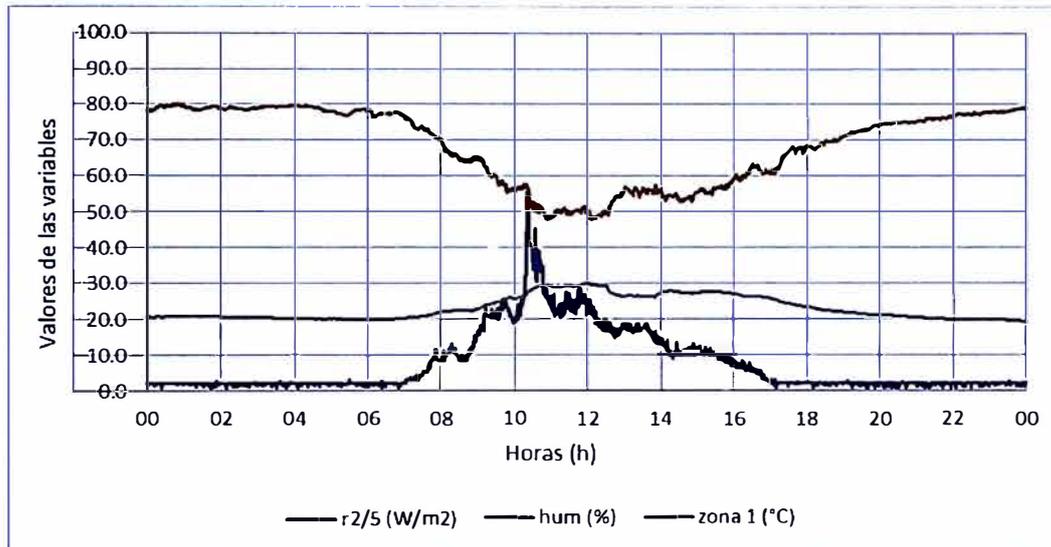
Figura 45. Humedad ambiental y temperaturas promedio de ambas zonas el 30 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 46., se aprecia la variación de la radiación, humedad ambiental y temperatura promedio de la zona 1 el 15 de junio de 2023, cuando la temperatura máxima fue de 30 °C. La baja temperatura máxima se deba a la baja radiación presentada ese día, alcanzando un máximo de solo $278,0 \text{ W/m}^2$ a las 10:21 como se aprecia en el Anexo 4. Debido a que los motores no se activaban a causa de la baja temperatura, los cuatro motores se activaron manualmente desde las 12:31 hasta las 13:48 para ventilar la cámara, este proceso es importante porque evita que se concentre la humedad extraída de los granos.

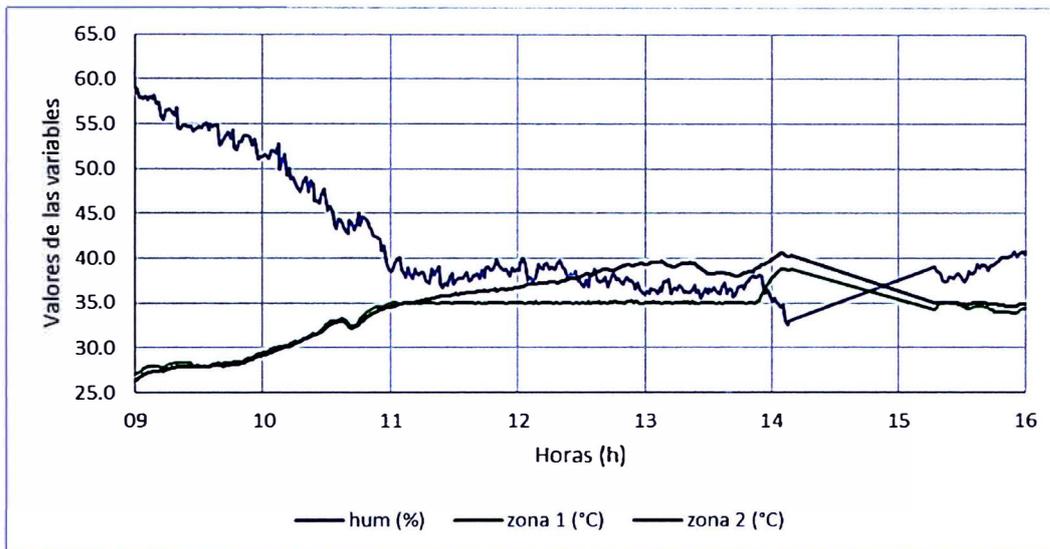
Figura 46. Radiación 2 escalada, humedad ambiental y temperatura promedio de la zona 1 el 15 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

El día 16 de junio de 2023, solo funcionaron los motores 1 y 2, pero fallaron a las 13:54. En la Figura 47., se aprecia la variación de la humedad ambiental y temperaturas promedio de ambas zonas el 16 de junio de 2023 entre las 09 h y 16 h. Se observa que ambas temperaturas mantienen un valor similar hasta 11 h cuando superan la temperatura objetivo de 35 °C, la zona 1 mantiene su temperatura debido al motor 1 y 2, pero la zona 2 eleva su temperatura. A las 13:52, los motores 1 y 2 dejan de funcionar por falla y ambas temperaturas promedio aumentan, presentando mayor pendiente la de la zona 1. A las 14:09 se presenta un corte de energía eléctrica y el sistema deja de funcionar hasta las 15:17 cuando regresa la energía eléctrica, para entonces la radiación ha disminuido y las temperaturas disminuyen su valor progresivamente.

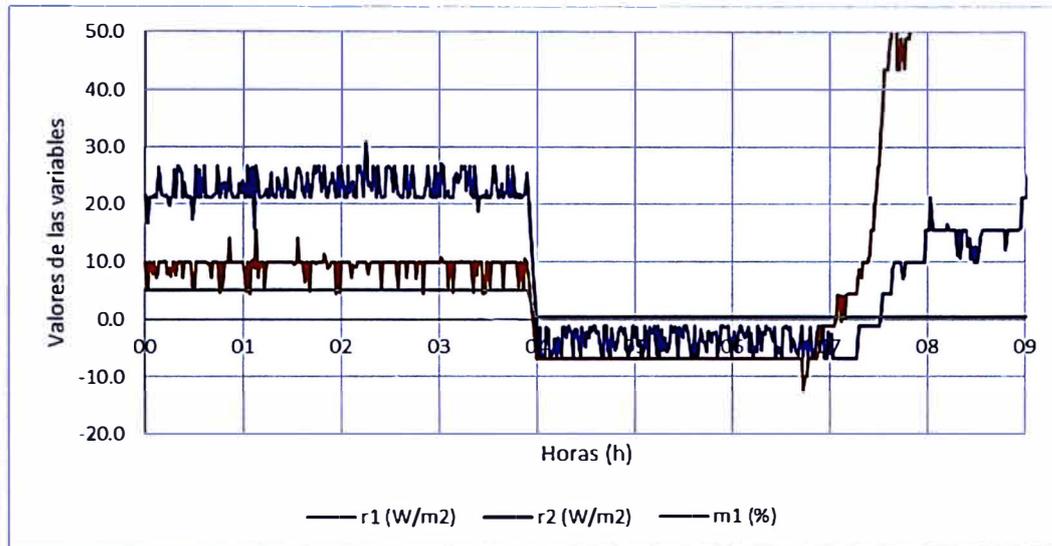
Figura 47. Humedad ambiental y temperaturas promedio de ambas zonas el 16 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

El día 18 de junio de 2023, los cuatro motores funcionaron a velocidad mínima con 5% de potencia hasta las 03:59, luego estuvieron inoperativos hasta finalizar el día. En la Figura 48., se aprecia la variación de las radiaciones y la potencia del motor 1 el 18 de junio de 2023 entre las 00 h y 09 h. Se observa que en el momento que se apagan los motores, disminuye el ruido para ambos valores de radiación. Esto implica que el funcionamiento de los motores afecta la lectura de los sensores de radiación, ambos sensores emiten una señal de voltaje a diferencia de los sensores de temperatura que emiten una señal de corriente.

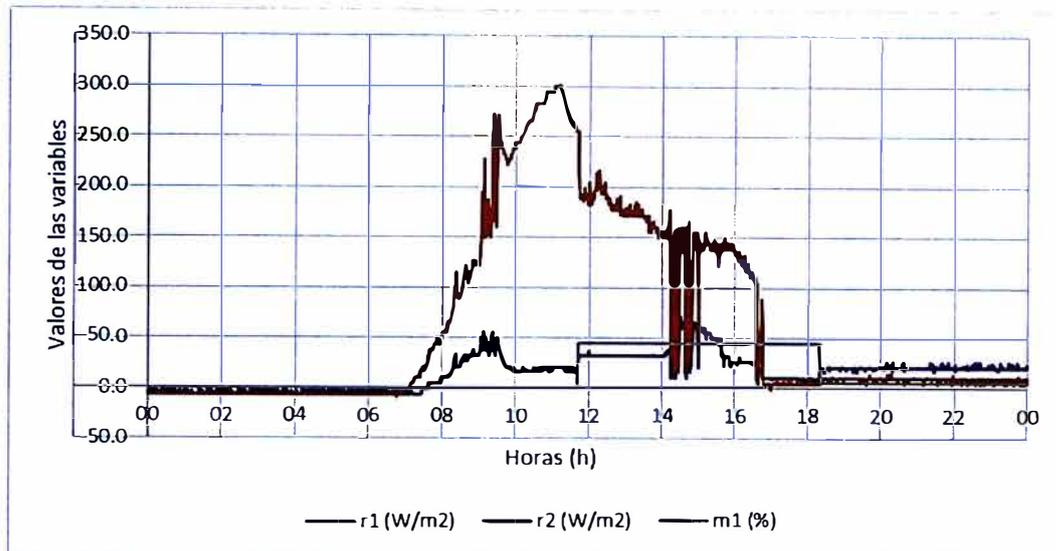
Figura 48. Radiaciones y potencia del motor 1 el 18 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

El día 19 de junio de 2023, los cuatro motores estuvieron inoperativos hasta las 11:44 cuando se reiniciaron sus códigos de falla y se activaron al 45% de potencia, sin embargo, el motor 2 se activó porque persistía la falla de subtensión. En la Figura 49., se aprecia la variación de las radiaciones y la potencia del motor 1 el 19 de junio de 2023. Se observa que en el momento que se encienden los motores, se produce una caída del valor de radiación 2 y una subida del valor de radiación 1. Desde la activación de los motores hasta las 14:01, la radiación registrada por el sensor 1 es casi constante con un valor de $32,2 \text{ W/m}^2$. Cuando se regresa al modo automático de los motores a las 18:20, ambos valores de radiación presentan una subida en sus valores registrados. Esto confirma que el funcionamiento de los motores afecta la lectura de los sensores de radiación y la variación es mayor en el sensor de radiación 1.

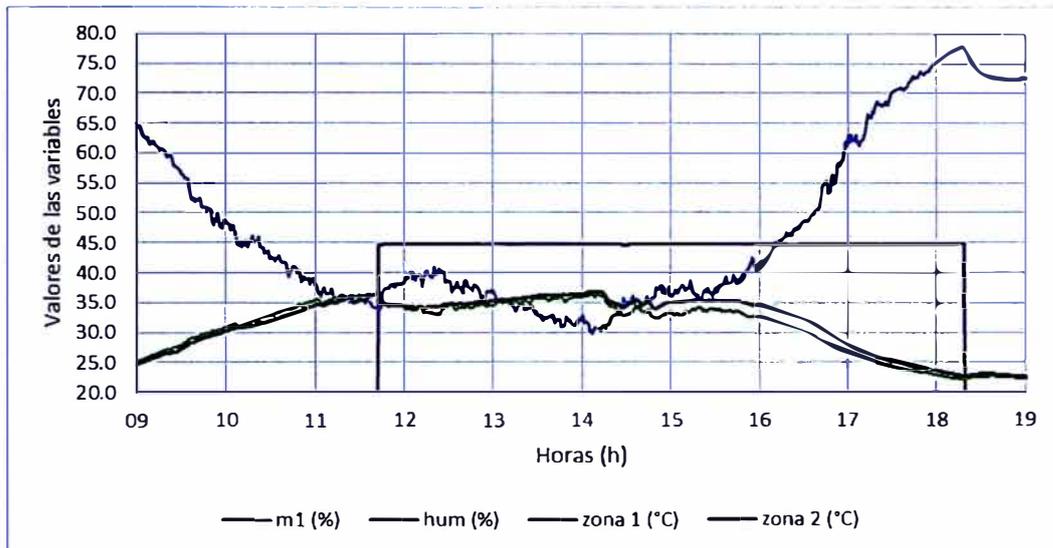
Figura 49. Radiaciones y potencia del motor 1 el 19 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 50., se aprecia la variación de la humedad, las temperaturas promedio de ambas zonas y la potencia del motor 1 el 19 de junio de 2023. Se observa que se activan los motores cuando la temperatura sobrepasa los 35 °C, a pesar que la potencia se mantuvo constante en 45%, la temperatura registró un valor máximo de 36,9 °C en la zona 2 a las 14:12. A partir de ese punto, los promedios divergen ligeramente hasta las 18 h cuando vuelven a converger, aunque ambos motores funcionaban en la zona 2, esta presentó mayores temperaturas en comparación con la zona 1 donde solo funcionaba el motor de inyección. Este comportamiento enfatiza la independencia de las zonas, un control independiente de motores para cada una, así como la relevancia del motor de inyección. Cuando se cambia al modo automático a las 18:20, se frena la velocidad de disminución de las temperaturas y se produce una caída en la humedad, esto se produce debido a la ausencia de radiación en esta hora por lo que ya no es favorable mantener encendidos los motores.

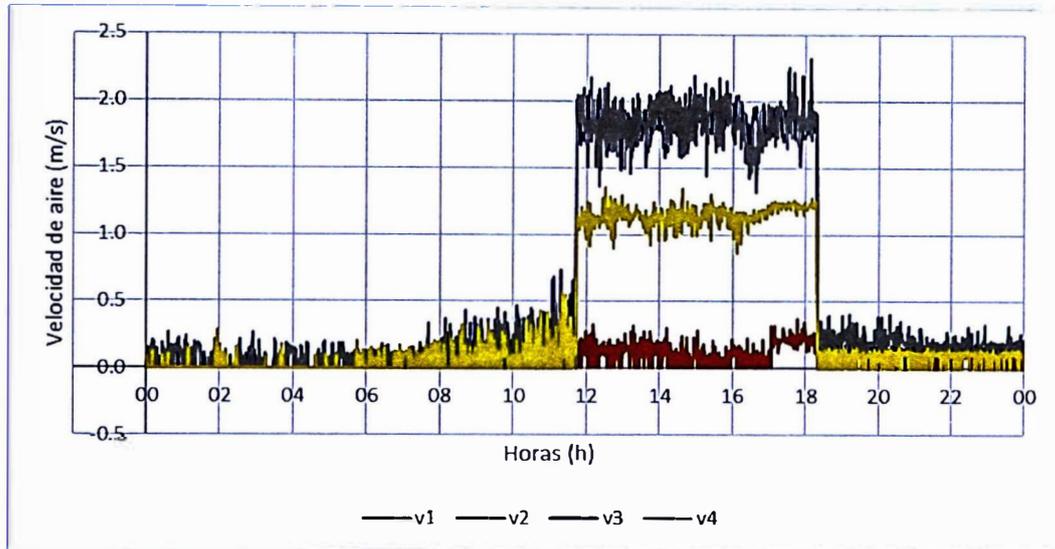
Figura 50. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 19 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51., se aprecia las velocidades de aire registradas el 19 de junio de 2023, se considera que valores inferiores a $0,5 \text{ m/s}$ corresponde a ruido o pequeñas brisas detectadas por los sensores. En sensor de velocidad de aire 2 permanece con bajas lecturas debido a que el motor 2 está inoperativo ese día, sin embargo, esto no afectó significativamente el control de la temperatura promedio.

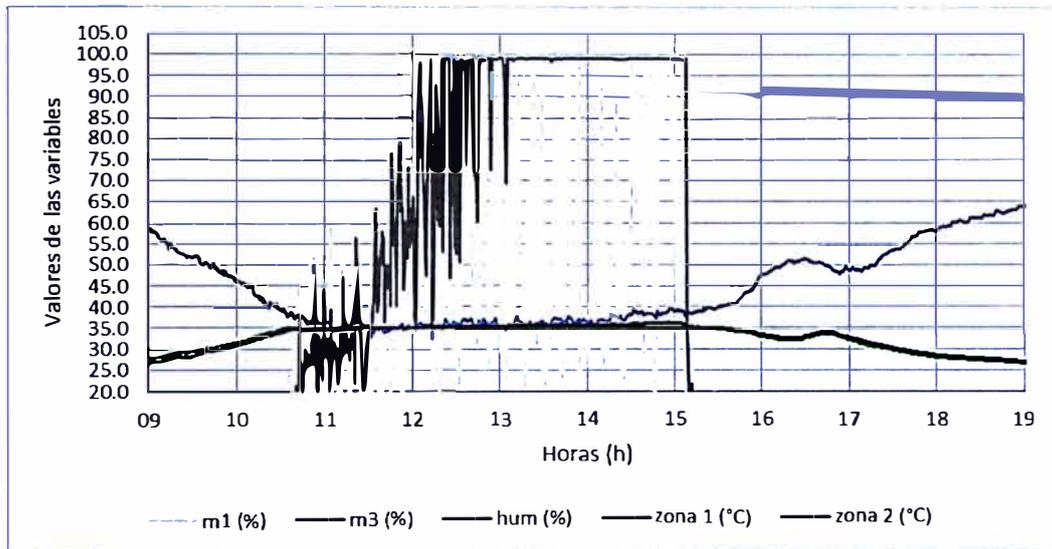
Figura 51. Velocidad de aire en los cuatro sensores el 19 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 52., se aprecia la variación de la humedad, las temperaturas promedio de ambas zonas y la potencia del motor 1 y 3 el 4 de julio de 2023. Se observa que la temperatura promedio 1 se controla al valor objetivo de 35 °C, mientras que la temperatura promedio 2 presenta un máximo de 36,2 °C a las 14:55. Esto indica que la zona 2 recibió mayor radiación en comparación con la zona 1 y la máxima potencia de los motores no fue suficiente para controlar la temperatura promedio de la zona. Todos los motores bajan su potencia a las 15:09 cuando la radiación cae debido a la puesta del sol. No se consideró en el gráfico el motor 2 y 4 porque presentan un comportamiento similar a los motores 1 y 3 respectivamente. Estas tendencias se repiten en los otros días cuando la temperatura promedio fue controlada efectivamente.

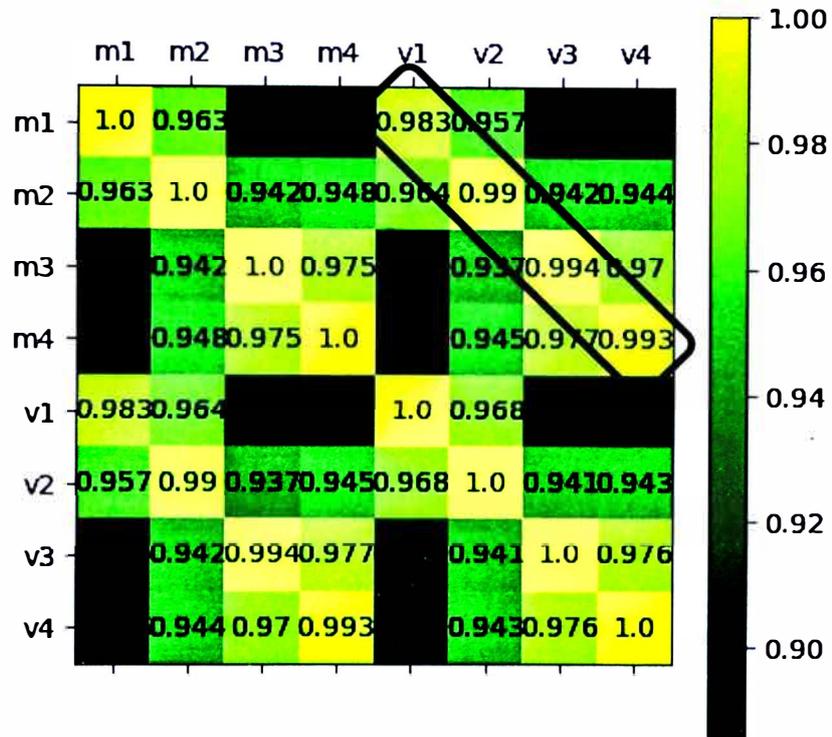
Figura 52. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 y 3 el 4 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se graficó la matriz de correlación de Pearson para las potencias de los motores y las velocidades de aire el 4 de julio de 2023, como se observa en la Figura 53., las potencias de los motores 1 y 2 se están altamente correlacionadas, así como las potencias 3 y 4. Esto se debe a que los motores están ubicados en la misma zona y presentan comportamientos similares, esta correlación también se presenta en los sensores de velocidad de aire. También se observa una alta correlación entre la potencia del motor 1 y el sensor de velocidad de aire 1, así como con los otros tres motores y sensores. Como las velocidades de aire están relacionadas a la transferencia de calor, entonces así también lo están las potencias de los motores.

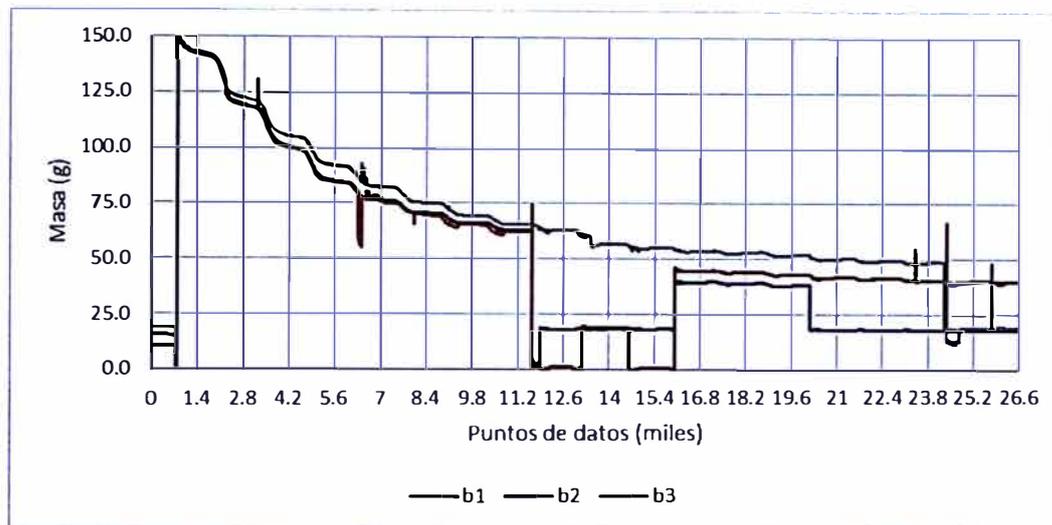
Figura 53. Matriz de correlación para las potencias de los motores y las velocidades de aire el 4 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se graficó la variación de la lectura de las balanzas en el primer período de secado, como se observa en la Figura 54., se inició el registro de datos a las 13:14 del 15 de junio de 2023, por lo que se aprecia una subida de 0 a 150 aproximadamente. Los picos registrados evidencian un error en la medición de las balanzas para ciertos días. Debido a los trabajos de construcción para el piso de cemento, una inadecuada manipulación de las balanzas alteró la medición por casi 5 días. Aunque se recuperaron las lecturas luego de este período, las balanzas 1 y 3 fueron manipuladas posteriormente y no registraron correctamente los últimos valores de masa.

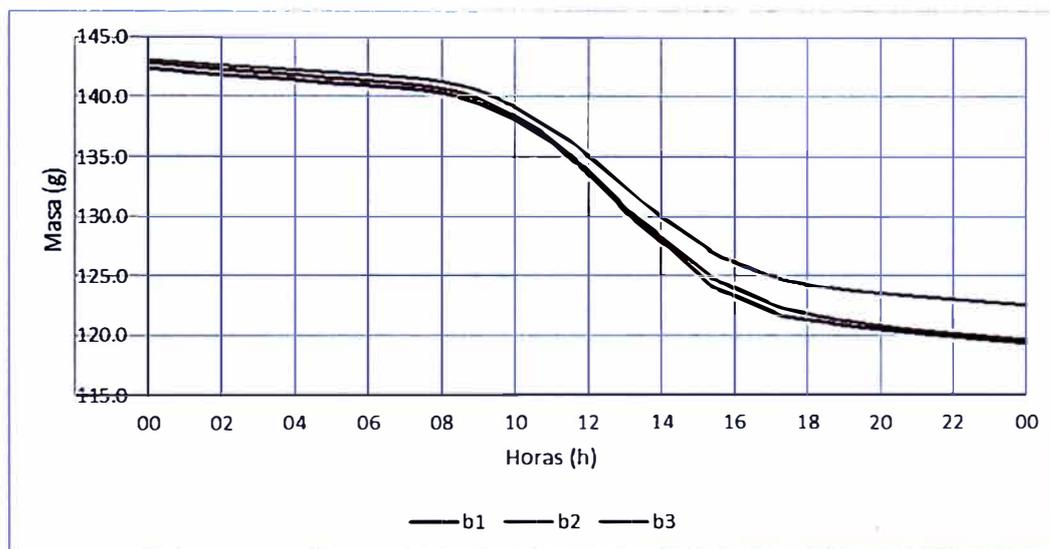
Figura 54. Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas a lo largo del primer período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

La variación de las masas de las muestras para las tres balanzas el día 16 de junio de 2023 se observa en la Figura 55., la mayor rapidez de pérdida de masa está en el período desde las 08 h hasta las 16 h que corresponde con el período de mayor radiación solar. En las mañanas y noches, a pesar que no haya radiación solar, como los granos están con un alto contenido de humedad, siguen perdiendo masa, aunque a menor rapidez. También se observa que la muestra de la balanza 3, ubicada en la cama 5 cercana al ventilador de extracción, pierde menos masa en comparación con las otras dos muestras. Estas tendencias continuaron en los días siguientes, disminuyendo la rapidez de pérdida de masa por cada día.

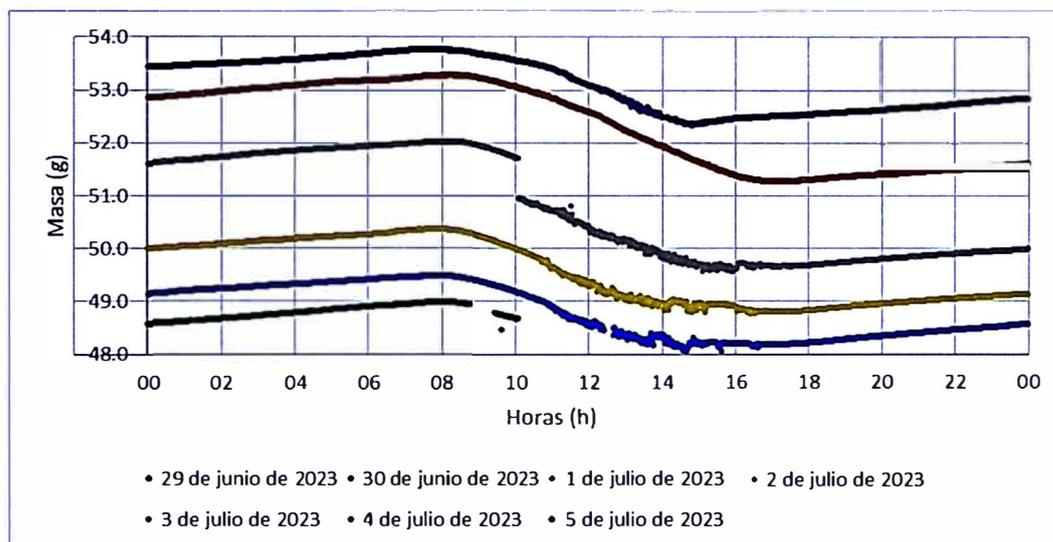
Figura 55. Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas el 16 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

La variación de la masa de la muestra en la balanza 3 del 29 de junio al 5 de julio de 2023 se observa en la Figura 56., la mayor rapidez de pérdida de masa también está en el período desde las 08 h hasta las 16 h. A partir de la segunda semana de secado, los granos comienzan a recuperar masa en las mañanas y noches, esto se debe a que reabsorben la humedad ambiental. Las discontinuidades y el ruido presentados se deben a la activación de los motores, como el 30 de junio de 2023 no funcionaron los motores, ese día se registraron datos de masa sin muchas perturbaciones.

Figura 56. Variación de la masa de la muestra en la balanza 3 del 29 de junio al 5 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Para la muestra en la balanza 2, que registró valores hasta el último día, se organizaron los datos de masa por día, como referencia a las 16 h, en la Tabla 14., se descartaron los datos para los días en que se presentaron discontinuidades en los valores. Se consideró las 16 h como referencia de la masa diaria debido a que, en los últimos días de secado, esa hora corresponde aproximadamente al valor mínimo registrado.

Tabla 14. Masa de la muestra en la balanza 2 a las 16 h en el primer período de secado.

Día	Fecha	Masa de la muestra en la balanza 2 (g)
1	15 de junio de 2023	147,0
2	16 de junio de 2023	124,0
3	17 de junio de 2023	105,2
4	18 de junio de 2023	88,1
5	19 de junio de 2023	77,4
6	20 de junio de 2023	71,0
7	21 de junio de 2023	64,1
8	22 de junio de 2023	61,0
9	23 de junio de 2023	
10	24 de junio de 2023	
11	25 de junio de 2023	
12	26 de junio de 2023	
13	27 de junio de 2023	
14	28 de junio de 2023	44,7
15	29 de junio de 2023	43,8
16	30 de junio de 2023	42,7
17	1 de julio de 2023	41,3
18	2 de julio de 2023	41,0
19	3 de julio de 2023	40,8
20	4 de julio de 2023	39,9
21	5 de julio de 2023	39,5

Fuente: Elaboración propia.

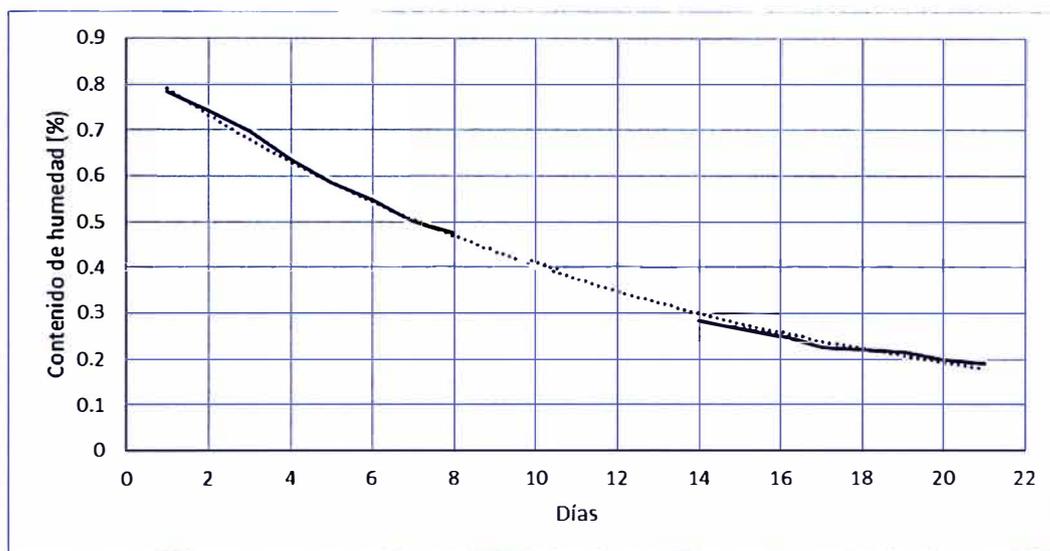
El día 1 de julio de 2023, se realizó manualmente la medición del contenido de humedad de los granos de café, se obtuvo un valor de 22,5%. Según la Ecuación 2.1. y considerando la masa total de la muestra en la balanza 2 ese día, se calculó la masa de agua contenida en los granos de café como se observa en la Ecuación 5.1.

$$m_{agua} = \frac{(\%H_{bh})(m_{total})}{100} = \frac{(22,5)(41,3)}{100} = 9,3 \text{ g} \quad (5.1.)$$

La diferencia con la masa total resulta la masa seca con un valor de 32,0 g. Esta masa seca se considera constante en todo el proceso de secado, se calculó la masa de agua para cada día, restando la masa total con la masa seca. Finalmente, se calculó el

porcentaje de humedad en base húmeda para los otros días según la Ecuación 2.1, los resultados se graficaron en la Figura 57., y se ajustó la gráfica a una tendencia exponencial.

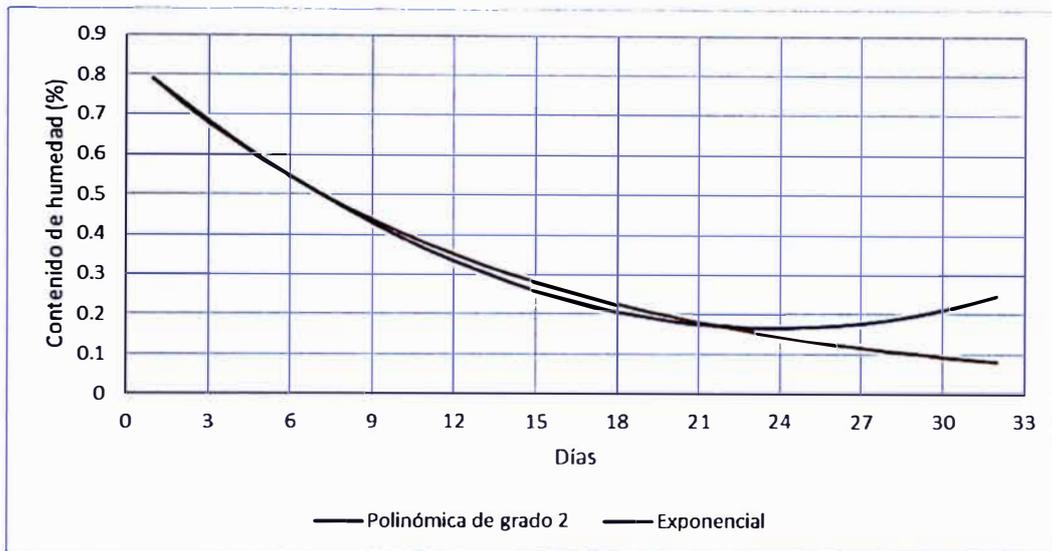
Figura 57. Variación estimada del contenido de humedad estimado en el primer período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

También se ajustó la gráfica a una tendencia polinómica de grado 2, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) mayor en comparación con la tendencia exponencial. Sin embargo, se descartó debido a que la estimación de los valores en los días posteriores a la medición difiere a lo esperado tal como se observa en la Figura 58., de la misma forma se probaron estas tendencias con la masa total, pero no se obtuvieron resultados favorables.

Figura 58. Comparación de las tendencias exponencial y polinómica de grado 2 para el contenido de humedad estimado en el primer período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

En la Ecuación 5.2., se observa la relación de la tendencia exponencial del contenido de humedad en función de d , los días de secado. Se calculó el valor del contenido de humedad para el día 23, el resultado fue de 15,5%, este día se realizó una medición manual cuyo valor fue de 14%. Según la Ecuación 5.2., se estima que los granos alcanzarán un contenido de humedad de 11,5% el día 27.

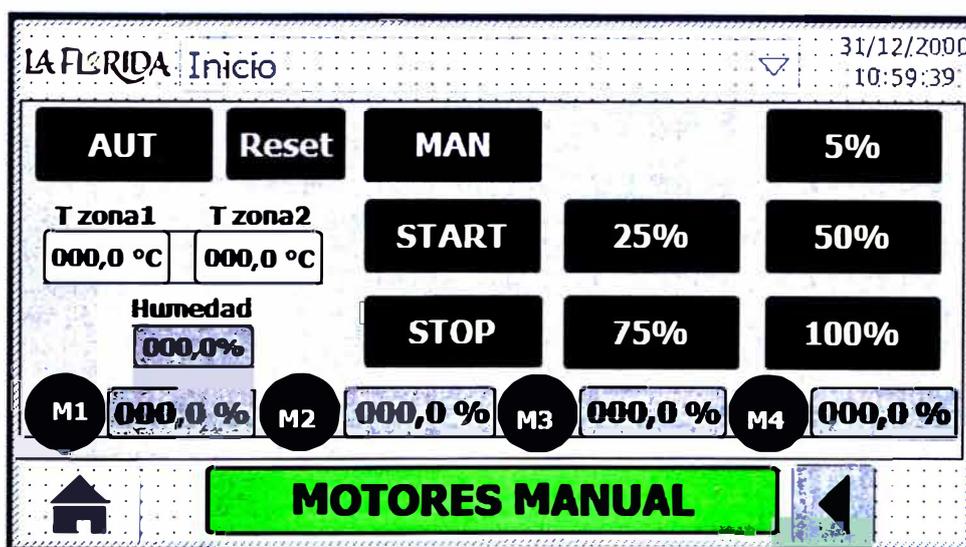
$$\%H_{bh}(d) = 0.8499e^{-0.074d} \quad (5.2.)$$

5.3.5. Propuesta del algoritmo de control

Se propuso una pantalla en el HMI, como se aprecia en la Figura 59., para accionar los cuatro motores de forma simultánea a distintas velocidades. De esta forma se realizaron pruebas rápidas de respuesta sobre el sistema. Se accede a esta pantalla presionando el botón físico F2 y se regresa a la pantalla principal presionando el

botón físico F1. El botón AUT configura el control automático de los motores y el botón MAN configura el control manual de los motores. Al presionar cada uno de los porcentajes se configura la velocidad de giro del motor, el botón START inicia el giro de todos los motores y el botón STOP detiene el giro de todos los motores. El botón Reset reinicia los códigos de fallas de los VFD, cada círculo que representa a los motores cambia a color verde si están girando y a color rojo si están detenidos. También se registra en la pantalla, de forma constante, las temperaturas promedio de cada zona, la humedad ambiental y las velocidades de cada motor.

Figura 59. Pantalla HMI propuesta para el control manual de motores.

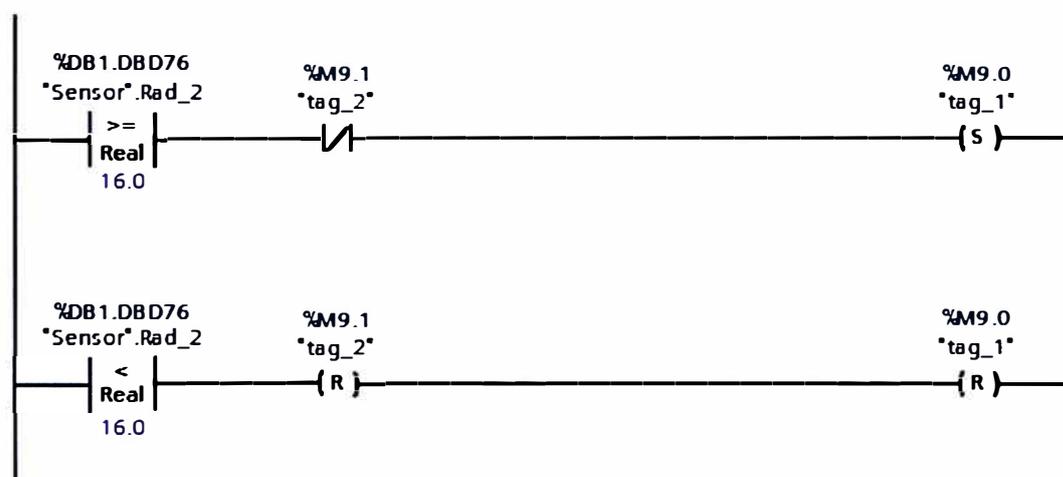


Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis realizado, se propuso un algoritmo de control de secado de café. En la función Control, se configuró el tag_1 para que encienda todos los motores al ser activado, y apague todos los motores al ser desactivado. Estas acciones son independientes y excluyentes del encendido y apagado en el modo manual. En base a esta etiqueta se desarrolló un criterio de encendido y apagado de los motores según

el valor de la radiación 2, tal como se indica en la Figura 60., si la radiación es mayor o igual que 16, entonces se activa el tag_1 lo que implica el encendido de los motores. Si la radiación es menor que 16, entonces se desactiva el tag_1 lo que implica el apagado de los motores. Se determinó apagar los motores cuando la radiación solar es menor debido a que el giro de los ventiladores aumenta la humedad ambiental del secador lo que genera reabsorción de agua por parte de los granos de café. En cambio, cuando la radiación es mayor, los granos liberan su humedad debido al calor y los ventiladores recirculan el aire dentro del secador para extraer la humedad ambiental retenida.

Figura 60. Diagrama en escalera del criterio de radiación.

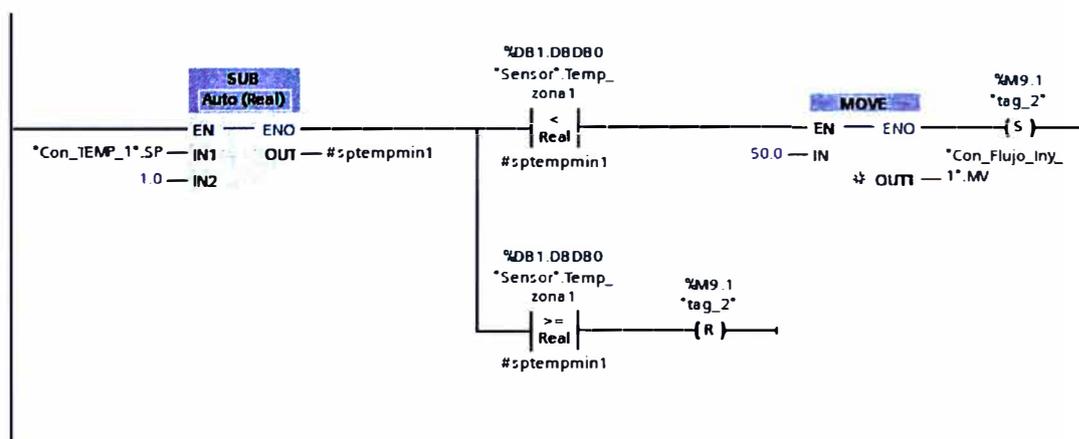


Fuente: Elaboración propia.

En las mañanas, el valor de la temperatura es inferior al objetivo, sin embargo, está presente la radiación solar, lo que ocasiona el aumento de temperatura y la pérdida de humedad por parte de los granos. Por lo tanto, el algoritmo de control se establece para realizar una circulación de aire por intervalos, este estado es activado y desactivado por el tag_2. Según la Figura 61., se resta una unidad al valor objetivo

de temperatura y se asigna a la variable interna sptempmin1. Si la temperatura promedio de la zona 1 es menor a la variable interna, entonces se asigna el valor 50 a la entrada del control del VFD del motor de inyección de la zona 1, lo que implica que el motor girará al 50% de su velocidad total, también se establece el tag_2. Si la temperatura promedio de la zona 1 es mayor o igual a la variable interna, entonces se reestablece el tag_2. En otro segmento, también se asigna el valor 50 a la entrada del control del VFD del motor de extracción de la zona 1, si la temperatura promedio de la zona 1 es menor a la variable interna. La programación es análoga para los otros dos motores en la zona 2, comparando sus variables de temperatura promedio y temperatura objetivo menos uno, sin embargo, el restablecimiento del tag_2 solo se realiza en el primer segmento debido a que no es necesario repetir el proceso cuatro veces.

Figura 61. Diagrama en escalera del criterio de temperatura.

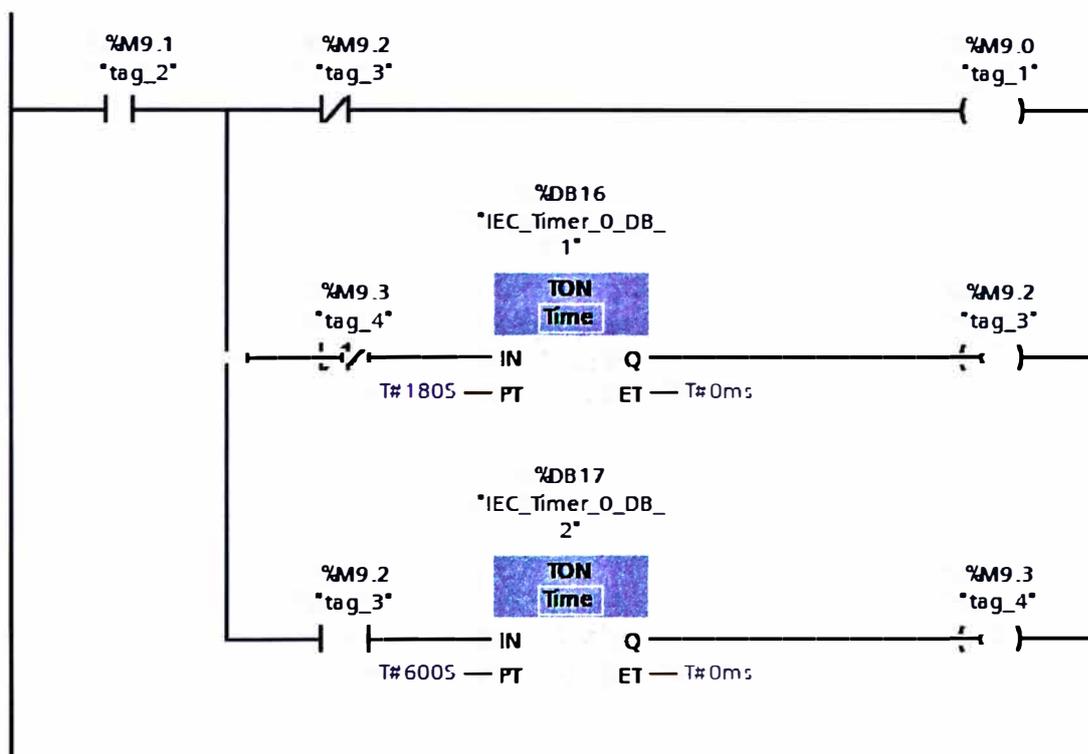


Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 62., el tag_2 establece el encendido de los motores por intervalos, durante 3 minutos los motores se encienden al 50% y en los siguientes 10

minutos los motores permanecen apagados. Al activarse el tag_2, se activa el tag_1 que enciende todos los motores, la velocidad de giro al 50% se estableció en la programación anterior. También se activa el Timer1, el cual espera 180 segundos hasta activar el tag_3, este tag desactiva el tag_1, por lo que se detienen todos los motores. También se activa el Timer2, el cual espera 600 segundos hasta activar el tag_4, este tag desactiva el Timer1 lo que desactiva el tag_3. De esta forma, se desactiva el Timer2 y se vuelve a activar el tag_1, que enciende todos los motores nuevamente. Este bucle se repite de forma continua mientras esté activado el tag_2.

Figura 62. Diagrama en escalera del encendido por tiempo.



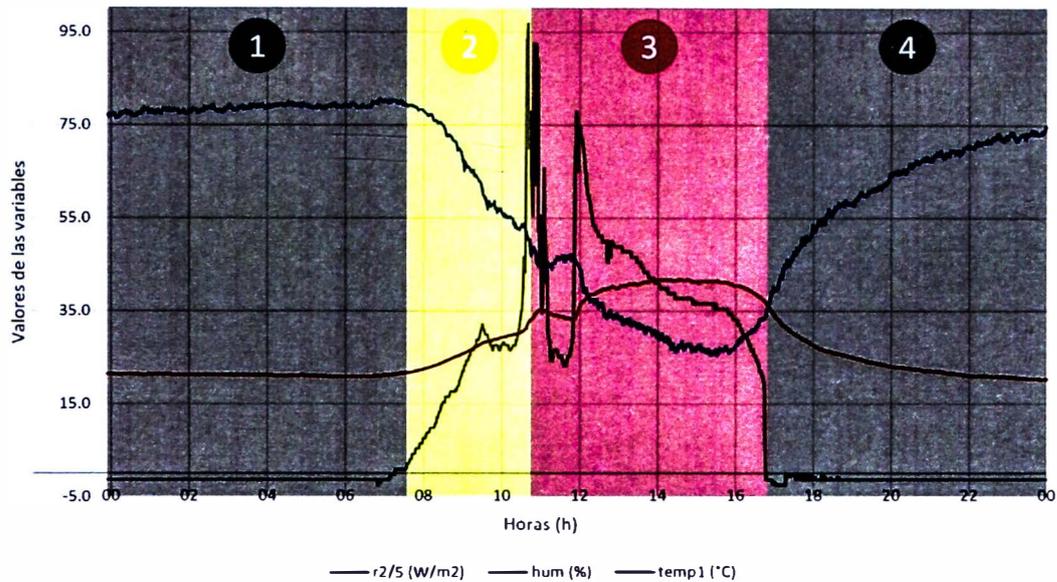
Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de control propuesto se resume en la Figura 63., en un día se presentan 4 intervalos de control delimitados por los valores de las variables. Se consideró la

radiación 2 debido a que presentaba mínimos más constantes a lo largo de los días, en esta figura se escaló para que sus valores sean semejantes a los de las otras variables. Se consideró la temperatura promedio de la zona 1 porque es similar a la temperatura promedio de la zona 2, entonces ambos valores representan bien la dinámica de la cámara. El intervalo 1 se desarrolla desde la medianoche hasta antes de las 08 h cuando la radiación es mínima; la temperatura casi constante y la humedad ambiental ligeramente creciente. En este intervalo, todos los motores permanecen apagados para conservar la temperatura y evitar que ingrese humedad exterior a la cámara. El intervalo 2 se desarrolla desde antes de las 08 h hasta antes de las 11 h cuando la temperatura promedio es menor que la temperatura objetivo menos uno; la radiación es creciente y la humedad ambiental decreciente. En este intervalo, todos los motores funcionan en un bucle, encendido durante 3 minutos y apagado durante 10 minutos; la temperatura es creciente debido a la radiación y los granos comienzan a expulsar humedad por lo que es necesario ventilar la cámara periódicamente para extraer el exceso de humedad ambiental sin disminuir drásticamente la temperatura. El intervalo 3 se desarrolla desde antes de las 11 h hasta antes de las 17 h cuando la temperatura promedio es mayor o igual que la temperatura objetivo menos uno. En este intervalo, todos los motores funcionan con el control PID debido a que la radiación eleva la temperatura constantemente y se debe controlar la temperatura promedio para que no exceda 35 °C. El intervalo 4 se desarrolla desde antes de las 17 h hasta la medianoche cuando la radiación es mínima; la temperatura disminuye y la humedad ambiental aumenta. En este

intervalo, todos los motores permanecen apagados para conservar la temperatura y evitar que ingrese humedad exterior a la cámara.

Figura 63. Diagrama de variación de las variables e intervalos de control.

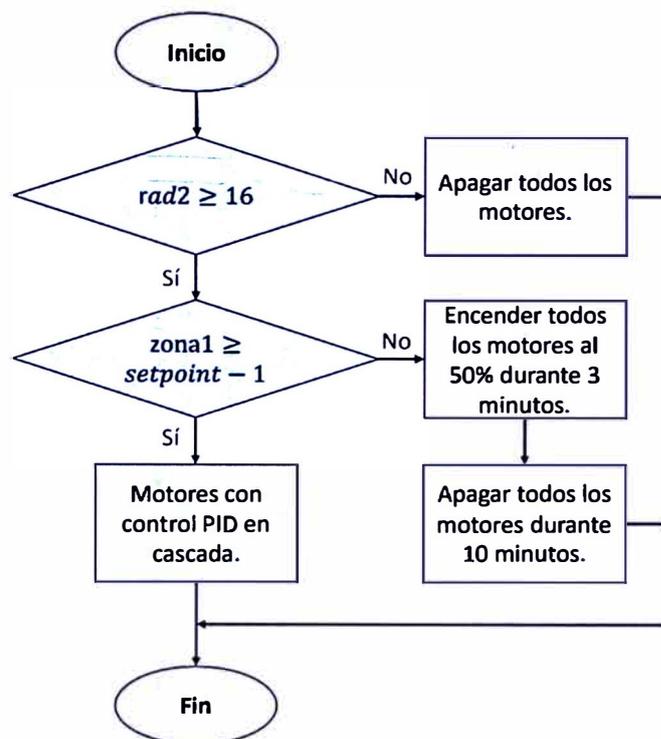


Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de control propuesto se describe en el diagrama de flujo de la Figura 64., este diagrama corresponde al bloque %FC5 Control, el cual se ejecuta como interrupción cada 100 ms, mientras constantemente se leen y escriben señales. Si la radiación del sensor 2 no es mayor o igual que 16, entonces se apagan todos los motores, este estado corresponde a la noche y madrugada. Si la radiación de sensor 2 es mayor o igual que 16, entonces se evalúa una segunda condición. Si la temperatura promedio de la zona 1 no es mayor o igual que la temperatura objetivo menos 1, entonces se encienden todos los motores al 50% de potencia durante 3 minutos y se apagan todos los motores durante 10 minutos. Si la temperatura

promedio de la zona 1 es mayor o igual que la temperatura objetivo menos 1, entonces se ejecuta el control PID en cascada.

Figura 64. Diagrama de flujo del algoritmo de control propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

5.3.6. Análisis del segundo proceso de secado

Para el segundo proceso de secado de café natural, se consideró un período de recolección de datos desde el 7 de julio de 2023 al 27 de julio de 2023, en total, el sistema IoT recolectó 28052 puntos de datos, cada uno con una diferencia de un minuto aproximadamente. La cantidad total de puntos de datos registrados en cada día del segundo período de secado se observa en la Tabla 15., para trece días, se presentaron interrupciones en el envío de datos mayores a un minuto por lo que se registraron menos datos en total.

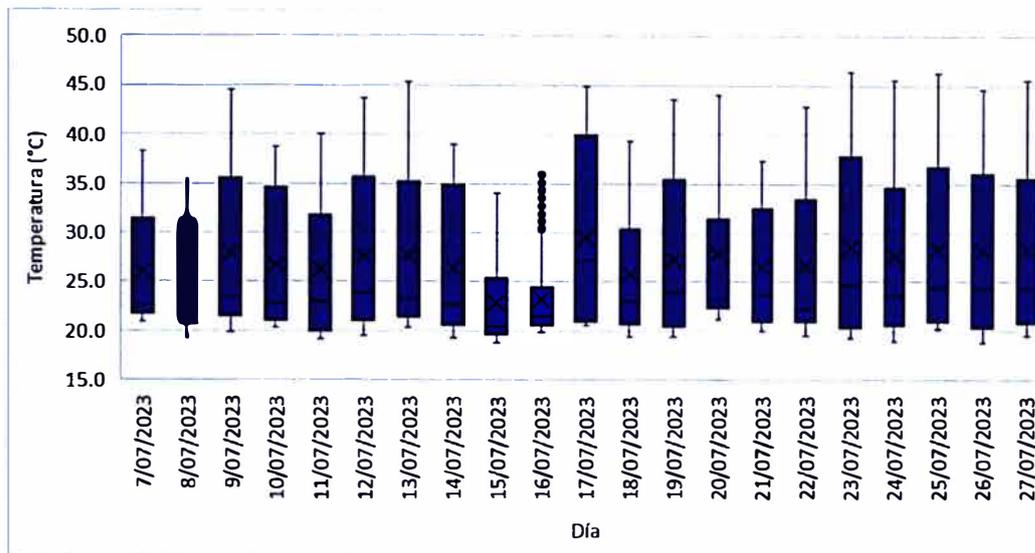
Tabla 15. Cantidad de puntos de datos en el segundo período de secado.

Día	Fecha	Cantidad de puntos de datos
1	7 de julio de 2023	1395
2	8 de julio de 2023	1404
3	9 de julio de 2023	1409
4	10 de julio de 2023	1408
5	11 de julio de 2023	1329
6	12 de julio de 2023	1406
7	13 de julio de 2023	1353
8	14 de julio de 2023	1406
9	15 de julio de 2023	1253
10	16 de julio de 2023	738
11	17 de julio de 2023	1133
12	18 de julio de 2023	1398
13	19 de julio de 2023	1396
14	20 de julio de 2023	1287
15	21 de julio de 2023	1385
16	22 de julio de 2023	1399
17	23 de julio de 2023	1331
18	24 de julio de 2023	1397
19	25 de julio de 2023	1408
20	26 de julio de 2023	1409
21	27 de julio de 2023	1408

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el diagrama de cajas y bigotes de la temperatura promedio de la zona 1, tal como se observa en la Figura 65., todos los cuartiles Q3 son inferiores a 40 °C. Los días 15 y 16 de julio de 2023 se registraron los menores cuartiles Q3 de temperatura debido a la falta de puntos de datos por el día. La temperatura mínima para todo el período de secado es 18,8 °C y solo un cuartil Q1 es inferior a 20 °C.

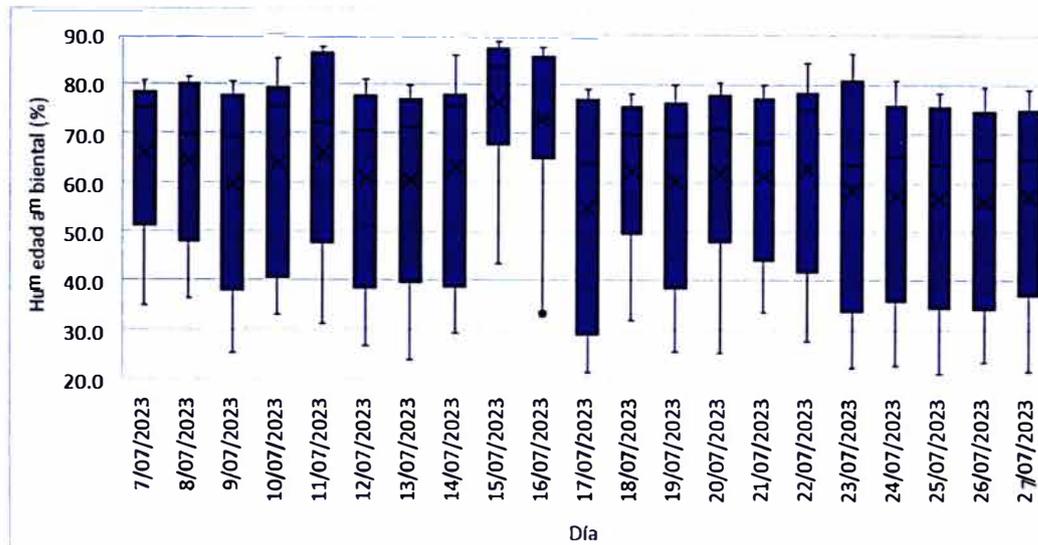
Figura 65. Diagrama de cajas y bigotes de la temperatura promedio de la zona 1 en el segundo período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el diagrama de cajas y bigotes de la humedad ambiental, tal como se observa en la Figura 66., solo cuatro cuartiles Q3 son superiores a 80%. En todo el período de secado, el valor mínimo de humedad ambiental es de 21,1%.

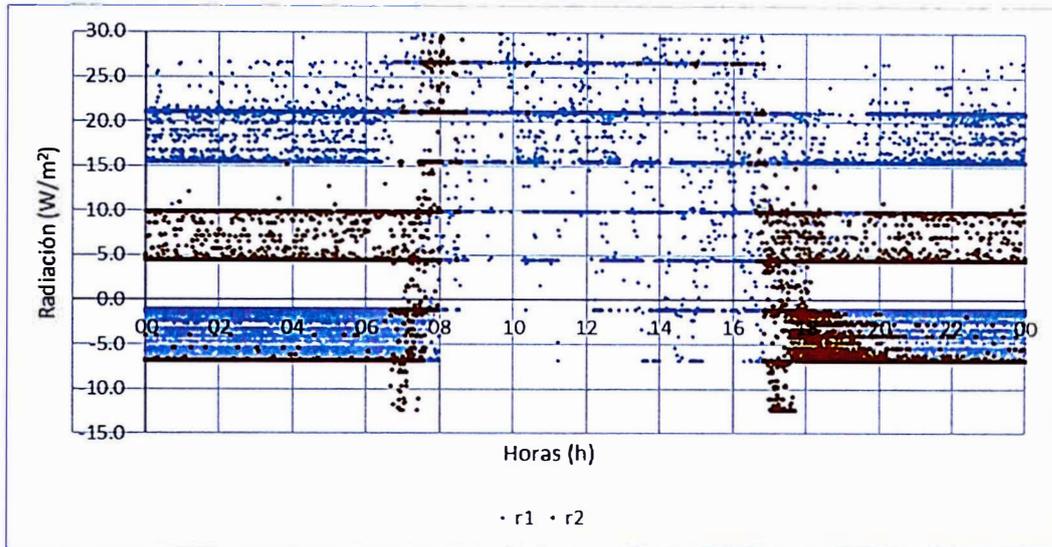
Figura 66. Diagrama de cajas y bigotes de la humedad ambiental en el segundo periodo de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 67., a lo largo del primer periodo de secado, los valores de radiación 1 y 2 presentan una variación significativa antes de las 06 h y después de las 18 h. Como en el primer periodo de secado, los valores registrados por el sensor 2 son más homogéneos en comparación con los valores registrados por el sensor 1. Antes de las 06 h, el valor máximo para el sensor 1 es de $29,4 W/m^2$, sin embargo, el valor máximo para el sensor 2 es de $15,2 W/m^2$. Después de las 18 h, el valor máximo para el sensor 1 es de $26,8 W/m^2$, sin embargo, el valor máximo para el sensor 2 es de $12,9 W/m^2$. En el Anexo 6, se observa la variación del sensor de radiación 2 en el segundo proceso de secado.

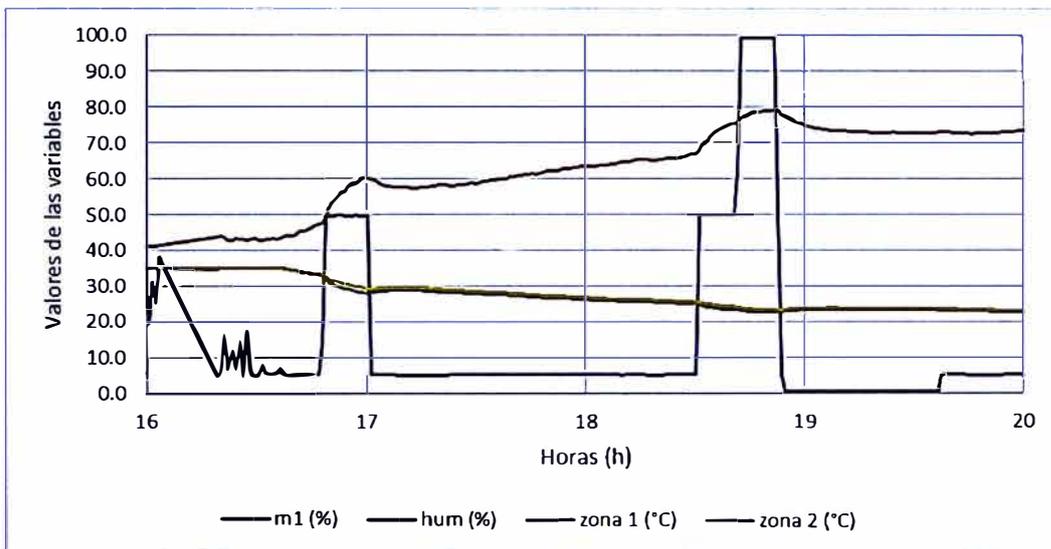
Figura 67. Radiación 1 y 2 en el segundo período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 68., se observa la variación de la humedad ambiental, temperaturas promedio de ambas zonas y la potencia del motor 1 el día 7 de julio de 2023. Se realizaron pruebas de encendido de los motores en la tarde, todos tuvieron la misma variación en potencia para las pruebas. En la primera prueba, se encendieron los motores a las 16:48 con un 50% de potencia durante 10 minutos, esto ocasionó una rápida subida de la humedad ambiental y una caída en las temperaturas promedio. En la segunda prueba, se encendieron los motores a las 18:31 con un 50% de potencia durante 10 minutos y luego con un 100% de potencia durante otros 10 minutos. Se observó que la humedad ambiental aumentó a mayor velocidad con mayor potencia de los motores, luego de apagarse los motores, la humedad ambiental comenzó a disminuir hasta el equilibrio.

Figura 68. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 7 de julio de 2023.

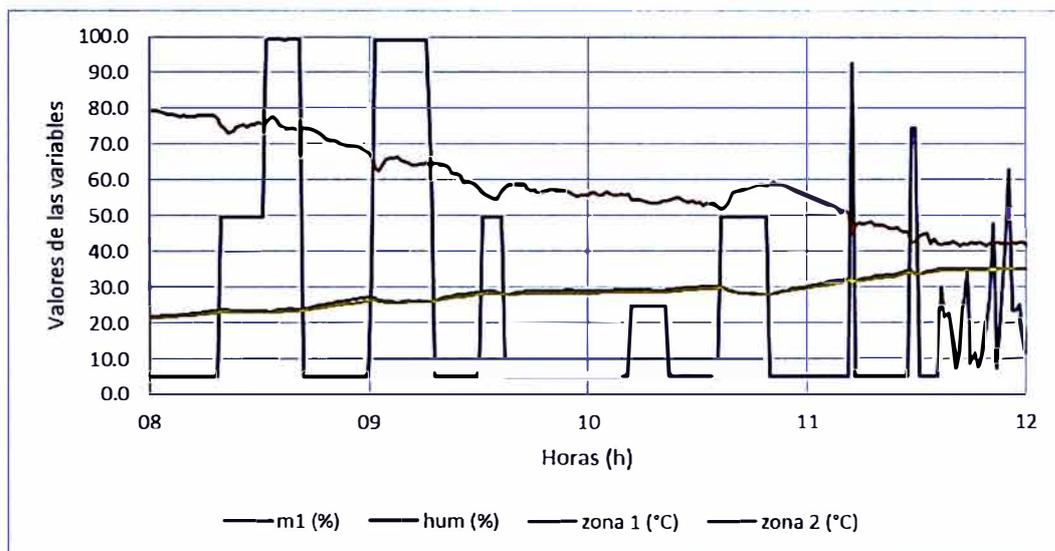


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 69., se observa la variación de la humedad ambiental, temperaturas promedio de ambas zonas y la potencia del motor 1 el día 8 de julio de 2023. Se realizaron pruebas de encendido de los motores en la mañana, todos tuvieron la misma variación en potencia para las pruebas. En la primera prueba, se encendieron los motores a las 08:19 con un 50% de potencia durante 10 minutos y luego con un 100% de potencia durante otros 10 minutos. Esto ocasionó una caída en la humedad ambiental, pero luego su valor volvió a subir. A las 09:01 se encendieron los motores con un 100% de potencia durante 15 minutos, también se observó un comportamiento similar. A las 09:32 se encendieron los motores con un 50% de potencia durante 4 minutos, se consideró este tiempo porque la humedad comenzó a subir nuevamente y no era necesario mantener encendidos los motores. A las 10:12

se encendieron los motores con un 25% de potencia durante 10 minutos, la caída en humedad no fue tan significativa como en los anteriores casos.

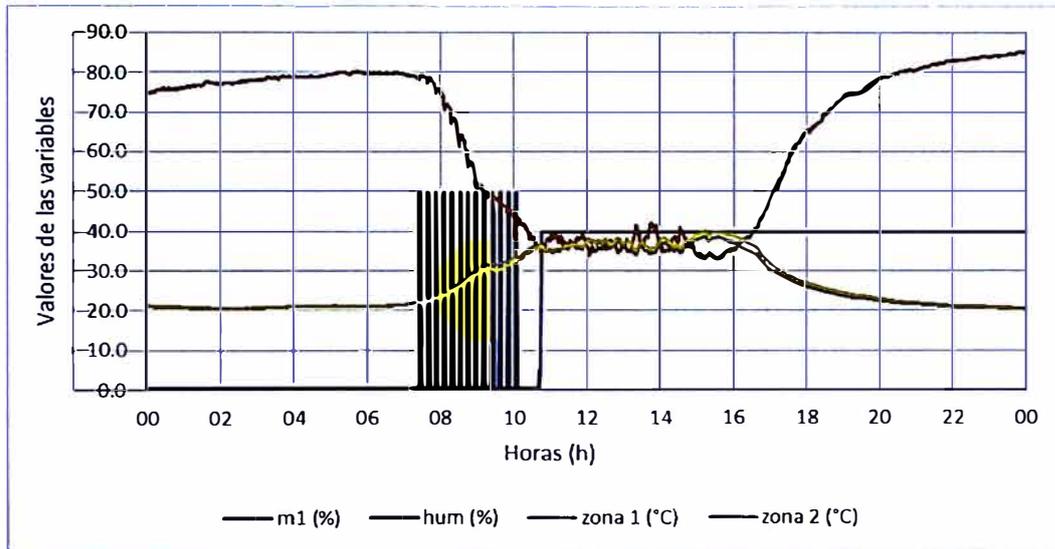
Figura 69. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 8 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Debido a una falla en la activación de los motores para el control PID, durante este proceso de secado se activaron los motores manualmente. En la Figura 70., se observa la variación de la humedad ambiental, temperaturas promedio de ambas zonas y la potencia del motor 1 el día 10 de julio de 2023. Desde antes de las 08 h hasta luego de las 10 h se ejecuta el criterio de encendido de motores por tiempos para ventilar la cámara. A las 10:45 se encendieron los motores con un 40% de potencia para contener el aumento de temperatura, sin embargo, los motores no se apagaron hasta el día siguiente. Como consecuencia, la humedad ambiental nocturna subió por encima del 80%.

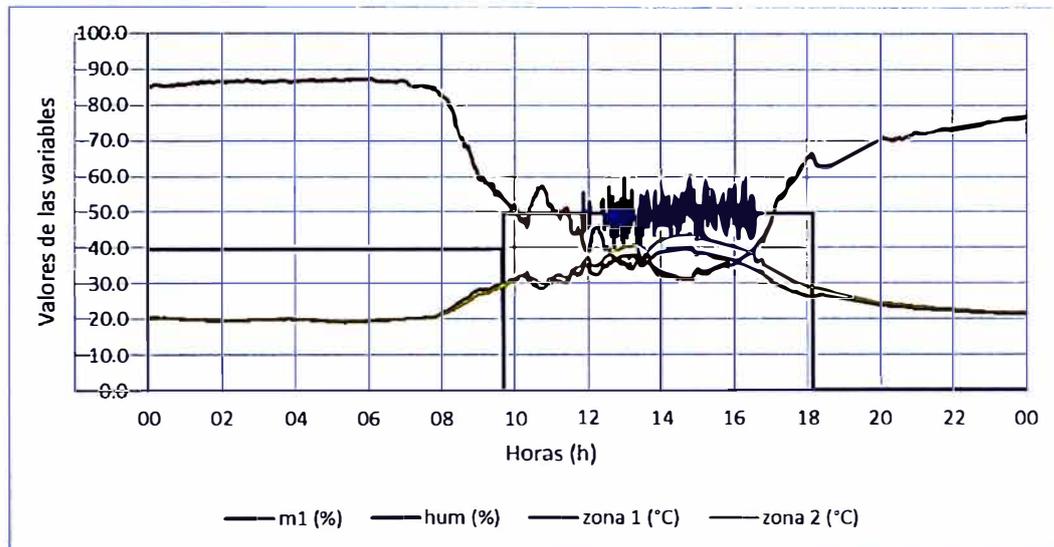
Figura 70. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 10 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 71., se observa la variación de la humedad ambiental, temperaturas promedio de ambas zonas y la potencia del motor 1 el día 11 de julio de 2023. Desde el día anterior, todos los motores permanecieron encendidos, esto ocasionó que la humedad ambiental en la mañana fuera mayor que 80%. Entre las 12 h y 16 h aproximadamente, se presentó una falla en los motores 2, 3 y 4. Entonces, solo el motor 1 estuvo operativo, como consecuencia la temperatura promedio de la zona 2 aumentó su valor respecto a la temperatura promedio de la zona 1. Este día se apagaron los motores a las 18:08 por lo que la humedad ambiental nocturna no superó el 80%. Los días 14, 15 y 22 de julio de 2023, también permanecieron los motores encendidos por la noche, por este motivo, la humedad ambiental nocturna de los tres días y la humedad ambiental en la mañana de los días siguientes, superaron nuevamente el 80%.

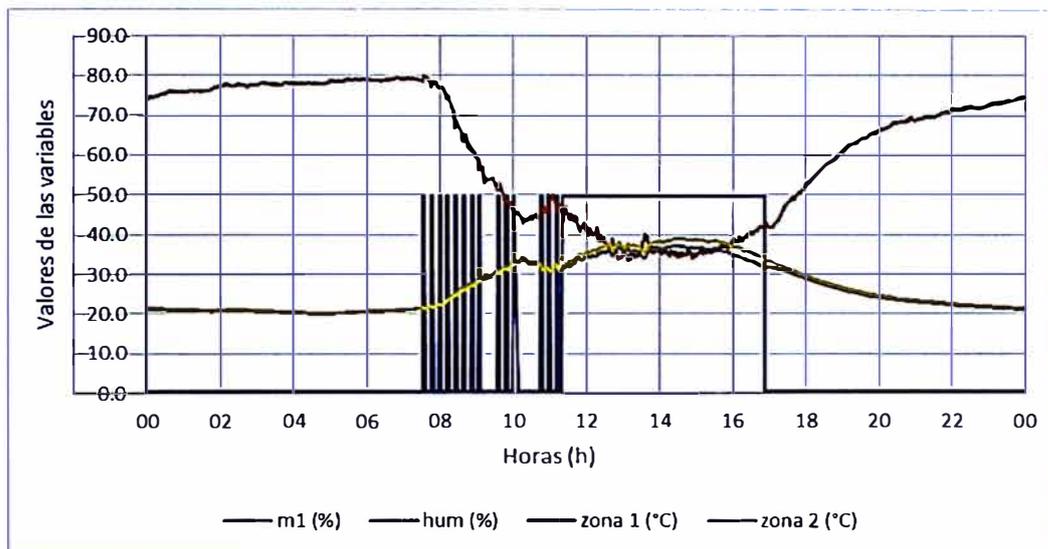
Figura 71. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 11 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 72., se observa la variación de la humedad ambiental, temperaturas promedio de ambas zonas y la potencia del motor 1 el día 21 de julio de 2023. Desde antes de las 08 h hasta antes de las 12 h, se ejecuta el criterio de encendido de motores por tiempos para ventilar la cámara. El motor 2 deja de funcionar a las 10:07 y a las 11:19 se activa manualmente el motor 1 a la potencia de 50% y los motores 3 y 4 a la potencia de 45%. Debido a esto la zona 2 incrementa ligeramente su temperatura con respecto a la zona 1. Finalmente, todos los motores se apagan a las 16:54, 4 minutos después de la puesta del sol detrás de la montaña.

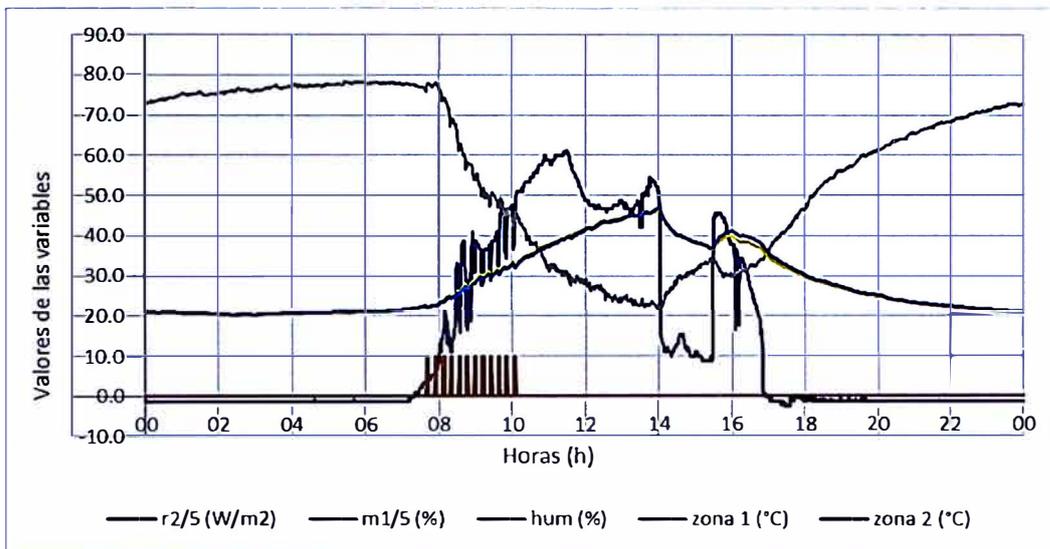
Figura 72. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas y potencia del motor 1 el 21 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 73., se observa la variación de la humedad ambiental, temperaturas promedio de ambas zonas, la potencia del motor 1 dividida entre 5 y la radiación 2 dividida entre 5 el día 25 de julio de 2023. Desde antes de las 08 h hasta después de las 10 h, se ejecuta el criterio de encendido de motores por tiempos para ventilar la cámara. Al inicio del encendido de los motores, se aprecia un incremento ligero en la humedad ambiental, lo que indica que el umbral de radiación para iniciar el control es bajo. También se aprecia una relación entre el ruido que presenta la radiación con la activación de los motores. Finalmente, se verifica que la humedad ambiental presenta una relación inversa, mientras que las temperaturas promedio presentan una relación directa con respecto a la radiación registrada por el sensor 2.

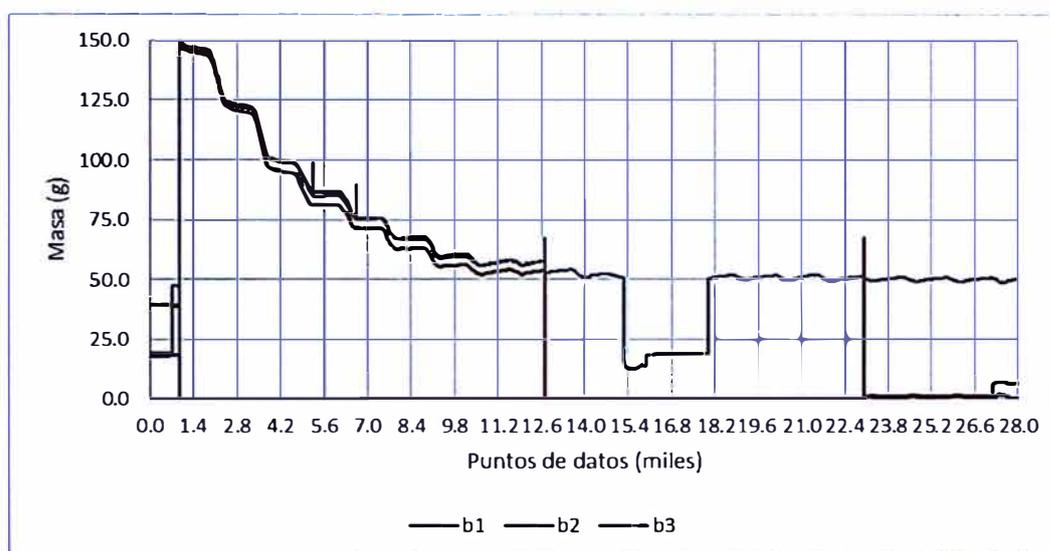
Figura 73. Humedad, temperaturas promedio de ambas zonas, potencia del motor 1 escalada y radiación 2 escalada el 25 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Se graficó la variación de la lectura de las balanzas en el segundo período de secado, como se observa en la Figura 74., se inició el registro de datos a las 16:28 del 7 de julio de 2023, por lo que se aprecia una subida de 0 a 150 aproximadamente. Los picos registrados evidencian un error en la medición de las balanzas para ciertos días. El día 16 de julio de 2023 a las 05:59, se presentó un corte de energía eléctrica que afectó la lectura de las balanzas 1 y 2. No se recuperaron las lecturas hasta el fin del período de secado. El día 18 de julio de 2023 a las 17:23, la balanza 3 presentó un fallo en su lectura, pero esta fue recuperada el día 20 de julio de 2023 a las 16:28.

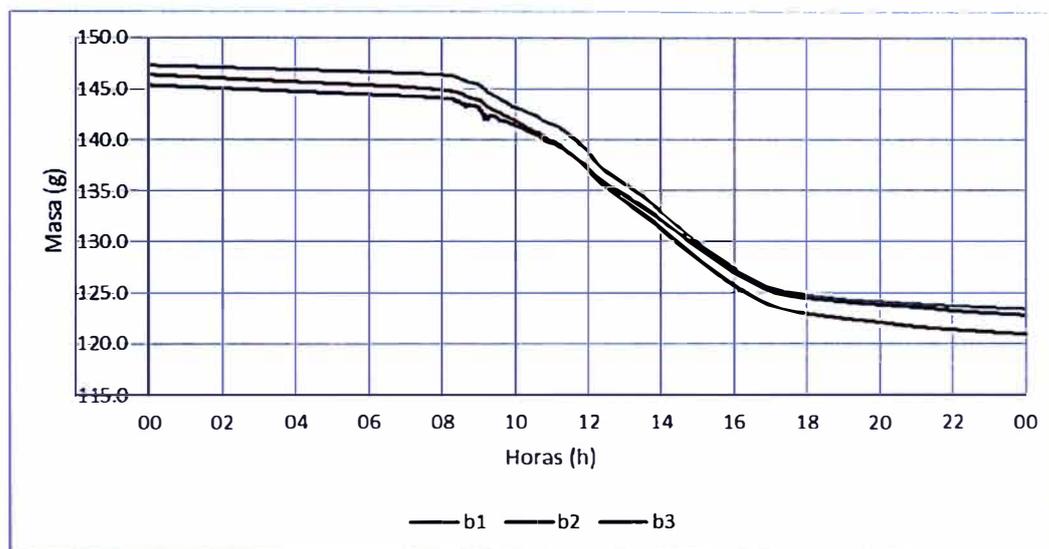
Figura 74. Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas a lo largo del segundo período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

La variación de las masas de las muestras para las tres balanzas el día 8 de julio de 2023 se observa en la Figura 75., la mayor rapidez de pérdida de masa está en el período desde las 08 h hasta las 16 h que corresponde con el período de mayor radiación solar. En las mañanas y noches, a pesar que no haya radiación solar, como los granos están con un alto contenido de humedad, siguen perdiendo masa, aunque a menor rapidez. También se observa que la muestra de la balanza 2, ubicada en la cama 3, entre los ventiladores, pierde menos masa en comparación con las otras dos muestras. Estas tendencias continuaron en los días siguientes, disminuyendo la rapidez de pérdida de masa por cada día.

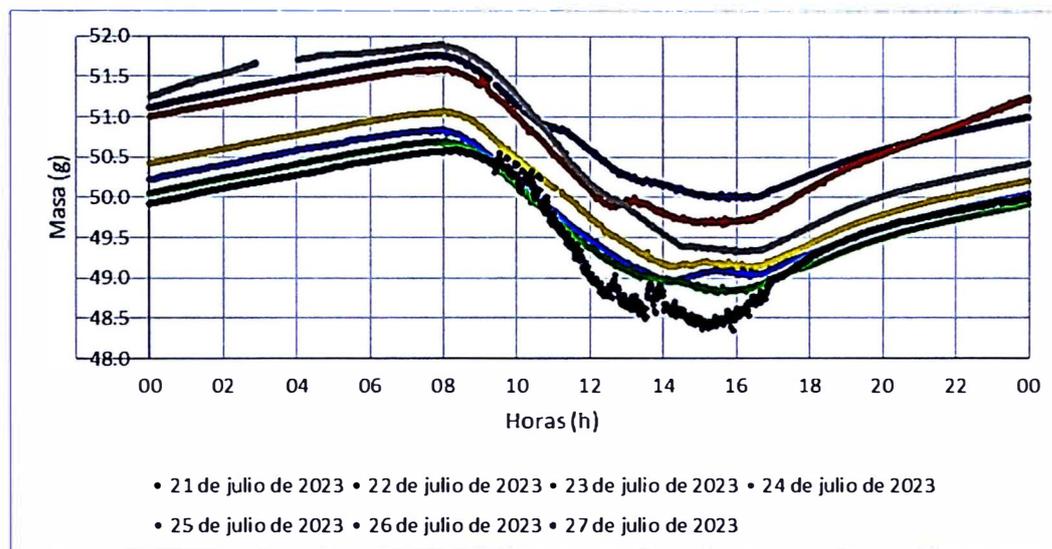
Figura 75. Variación de las masas de las muestras en las tres balanzas el 8 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

La variación de la masa de la muestra en la balanza 3 del 21 al 27 de julio de 2023 se observa en la Figura 76., la mayor rapidez de pérdida de masa también está en el período desde las 08 h hasta las 16 h. A partir de la segunda semana de secado, los granos comienzan a recuperar masa en las mañanas y noches, esto se debe a que reabsorben la humedad ambiental.

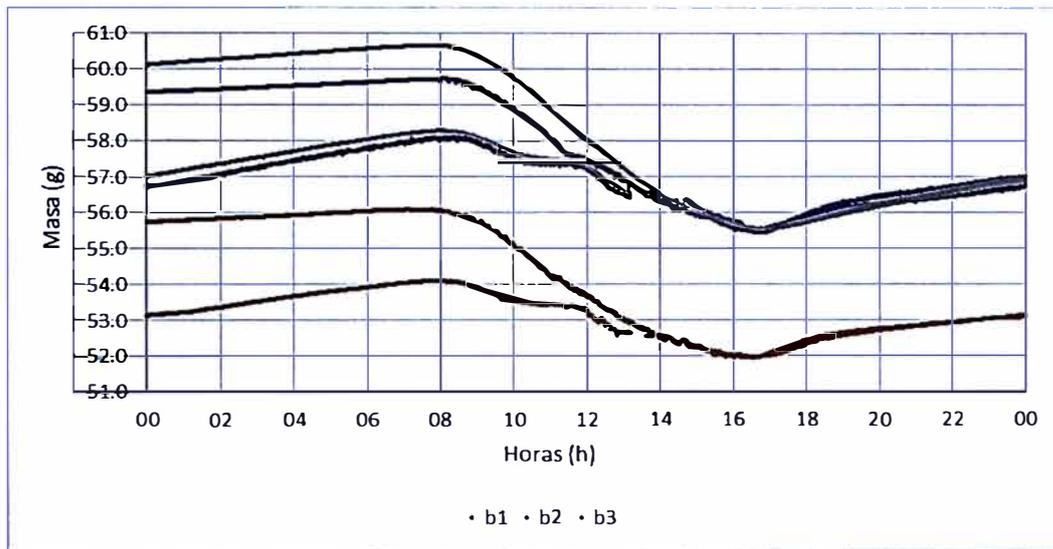
Figura 76. Variación de la masa de la muestra en la balanza 3 del 21 al 27 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

La variación de las masas de las muestras en las balanzas 1, 2 y 3 para el 14 y 15 de julio de 2023 se observa en la Figura 77., los motores estuvieron encendidos desde las 11:04 del 14 de julio de 2023 y todo el día del 15 de julio de 2023. Se aprecia que las tres masas incrementan su valor a partir de las 16 h hasta las 08 h del día siguiente, pero la curva de caída se termina repitiendo como en el día anterior. Esto implica que en estos días no se avanzó con la extracción de la humedad debido a que a las 16 h la masa registró el mismo valor para ambos días.

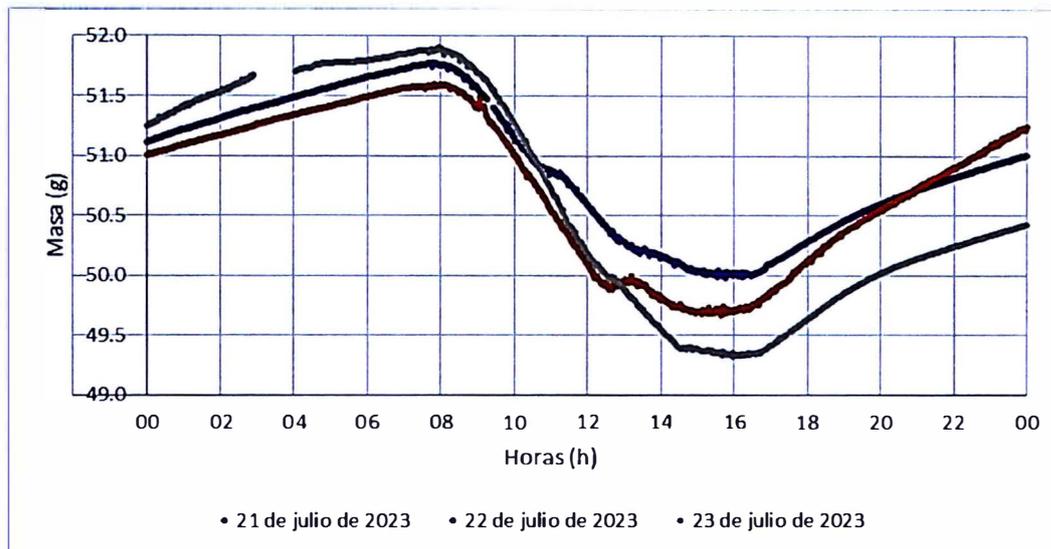
Figura 77. Variación de las masas de las muestras en las balanzas 1, 2 y 3 para el 14 y 15 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

La variación de la masa de la muestra en la balanza 3 para el 21, 22 y 23 de julio de 2023 se observa en la Figura 78., los motores estuvieron encendidos desde las 12:30 del 22 de julio de 2023 hasta las 02:54 del 23 de julio de 2023. El 22 de julio de 2023, la masa incrementó tanto en la noche que al día siguiente se inició el día con una masa mayor comparada al 21 de julio el 2023. Sin embargo, como los motores no se activaron en la tarde y noche del 23 de julio de 2023, la masa disminuyó sin inconvenientes.

Figura 78. Variación de la masa de la muestra en la balanza 3 para el 21, 22 y 23 de julio de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Para la muestra en la balanza 3, que registró valores hasta el último día, se organizaron los datos de masa por día, como referencia a las 16 h, en la Tabla 16., se descartaron los datos para los días en que se presentaron discontinuidades en los valores. Se consideró las 16 h como referencia de la masa diaria debido a que, en los últimos días de secado, esa hora corresponde aproximadamente al valor mínimo registrado. El primer día se consideró la lectura de las 16:28 porque fue el inicio de las mediciones.

Tabla 16. Masa de la muestra en la balanza 3 a las 16 h en el segundo período de secado.

Día	Fecha	Masa de la muestra en la balanza 3 (g)
1	7 de julio de 2023	150,6
2	8 de julio de 2023	127,4
3	9 de julio de 2023	103,0
4	10 de julio de 2023	86,3
5	11 de julio de 2023	75,7
6	12 de julio de 2023	67,5
7	13 de julio de 2023	59,7
8	14 de julio de 2023	55,7
9	15 de julio de 2023	55,7
10	16 de julio de 2023	52,5
11	17 de julio de 2023	50,7
12	18 de julio de 2023	50,8
13	19 de julio de 2023	-
14	20 de julio de 2023	-
15	21 de julio de 2023	50,0
16	22 de julio de 2023	49,7
17	23 de julio de 2023	49,3
18	24 de julio de 2023	49,2
19	25 de julio de 2023	49,0
20	26 de julio de 2023	48,9
21	27 de julio de 2023	48,6

Fuente: Elaboración propia.

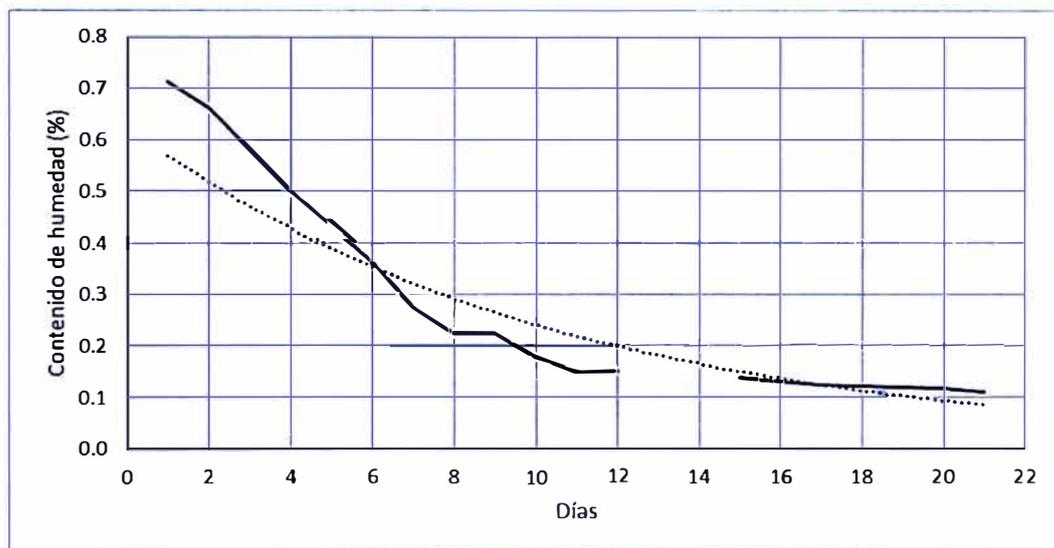
El día 26 de julio de 2023, se realizó manualmente la medición del contenido de humedad de los granos de café, se obtuvo un valor de 11,7%. Según la Ecuación 2.1. y considerando la masa total de la muestra en la balanza 3 ese día, se calculó la masa de agua contenida en los granos de café como se observa en la Ecuación 5.1.

$$m_{agua} = \frac{(\%H_{bh})(m_{total})}{100} = \frac{(11,7)(48,9)}{100} = 5,7 \text{ g} \quad (5.1.)$$

La diferencia con la masa total resulta la masa seca con un valor de 43,2 g. Esta masa seca se considera constante en todo el proceso de secado, se calculó la masa de agua para cada día, restando la masa total con la masa seca. Finalmente, se calculó el

porcentaje de humedad en base húmeda para los otros días según la Ecuación 2.1, los resultados se graficaron en la Figura 79., y se ajustó la gráfica a una tendencia exponencial, sin embargo, no se describió correctamente el comportamiento de la humedad del grano. También se probaron otras tendencias, pero el resultado fue el mismo.

Figura 79. Variación estimada del contenido de humedad estimado en el segundo período de secado.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Análisis de resultados

Se verificó la robustez del sistema IoT al enviar datos en la semana previa al secado con un período de 10 segundos entre datos enviados. Los cortes de energía eléctrica y las caídas del sistema IoT son los principales motivos para la pérdida de datos. La cantidad máxima de variables enviadas por el sistema IoT es de 24, el sistema estuvo funcionando por más de un mes y se recopiló más de 100 000 datos. Como se muestra en la Tabla 17., se presentaron un par de caídas en el sistema IoT, el sistema de control con el PLC funcionaba correctamente, pero no se enviaban datos a la nube, estas caídas fueron solucionadas con un reinicio del sistema.

Tabla 17. Características relacionadas al sistema IoT en los procesos analizados.

Proceso	Tiempo (días)	Período (segundos)	Cantidad de variables por envío	Cantidad total de datos	Número de caídas del sistema IoT
Sin café	7	10	16	53 843	1
Primer secado	21	60	24	26 606	1
Segundo secado	21	60	24	28 052	0

Fuente: Elaboración propia.

Los sensores de temperatura ubicados en el nivel 3 presentan mayores temperaturas que los ubicados en el nivel 2, y estos presentan mayores temperaturas que los ubicados en el nivel 1. Esto se debe a que el nivel 3 se ubica más arriba y recibe mayor radiación solar en comparación a los niveles inferiores. Por lo tanto, en una misma zona, las temperaturas registradas presentan una variación significativa, la zona 2 presenta un comportamiento menos divergente. Sin embargo, en un mismo nivel y zona, por la poca diferencia entre los valores registrados, no se determina que la ubicación de los sensores en función a las camas influya en el valor de temperatura. A pesar de la diferencia en los valores de temperatura registrados por cada sensor, el promedio de temperaturas de la zona 1 es muy similar al promedio de temperaturas de la zona 2, cuando los motores no están activos, ambas zonas se comportan como un solo sistema. Los sensores de temperatura 3, 4, 9 y 10; ubicados en el nivel 2 en los extremos de la cama 3, presentan menor variación entre ellos y son los que presentan mayor correlación con los promedios de las zonas. Esto indica que sus valores representan el comportamiento de cada zona y su posición estratégica es la referencia para el posicionamiento del sensor de humedad.

El valor de la humedad ambiental del secador incrementa desde las 16 h hasta las 08 h del día siguiente. Encender los motores en este rango horario acentúa este efecto, superando los valores en comparación a los días donde no se encendieron los motores. Las condiciones externas al secador, tales como las fuentes de agua cercadas y la humedad de la tierra debido a agua subterránea, influyen en el aumento de la humedad ambiental de la cámara.

El sensor de radiación 2, ubicado cerca y debajo del techo del secador, presenta mayores valores en comparación con el sensor de radiación 1, ubicado en el primer nivel. Las lecturas de ambos sensores, que envían señales con voltaje, se ven afectadas por el funcionamiento de los motores. El sensor de radiación 2 describe con mayor precisión el comportamiento de la radiación solar incidente en el secador, debido a que en sus gráficos es más notoria la variación que experimenta a lo largo del día. Debido a la ubicación geográfica del secador, las montañas establecen las horas de salida y puesta de sol, lo que está directamente relacionado con la radiación recibida por los sensores. El intervalo de horas efectivas con radiación solar se presenta desde las 08 h hasta las 15 h aproximadamente, en este período, la temperatura presenta una relación directa, mientras que la humedad presenta una relación inversa al incremento de la radiación solar.

El control PID en cascada mantiene la temperatura en el valor objetivo, sin embargo, en una ocasión, el aumento brusco y constante de la radiación elevó la temperatura sobre el valor objetivo, a pesar que los motores funcionaron a su máxima potencia. Cuando la radiación aumentaba con poca pendiente o de forma inconsistente, la

temperatura promedio no alcanzaba el valor objetivo, entonces los motores permanecían apagados. El motor 2 presentó fallas en su funcionamiento, lo que implicó que solo el motor 1 estuvo funcionando, a pesar de ello, su movimiento fue suficiente para mantener la temperatura de la zona 1 en el valor objetivo. Cuando los motores 3 y 4 tampoco funcionaron, se evidenció que la zona 2 presentaba mayores temperaturas, a pesar del movimiento de los motores en la zona 1, por lo tanto, cada zona presenta una temperatura promedio independiente cuando los motores están en funcionamiento.

Las balanzas presentaron fallas en la lectura de las masas de las muestras al largo de los procesos de secado, se perdió una gran cantidad de datos, por lo que solo se consideraron los valores de una balanza para el cálculo de la humedad del grano. En la primera semana del secado, las muestras pierden masa durante todo el día, desde las 08 h hasta las 16 h aproximadamente se presenta una mayor disminución de la masa. A partir de la segunda semana de secado, los granos recuperan masa desde las 16 h hasta las 08 h del día siguiente; activar los motores en este horario aumenta la humedad ambiental, lo que ocasiona una reabsorción por parte de los granos, esto se evidencia en un mayor ritmo de aumento de masa. Se consideró las 16 h como referencia para la masa de un día, se organizó la información para cada día con el objetivo de estimar la humedad contenida en el grano, el primer proceso presentó una tendencia exponencial, sin embargo, el segundo proceso no se representó adecuadamente con esta tendencia debido a que la temperatura no fue constante.

6.2. Discusión de resultados

El sensor de humedad ambiental aporta un valor significativo al análisis realizado, debido a que está relacionado con la temperatura y la variación de las masas de las muestras. No se realizó un control sobre esta variable para mantenerla en un valor objetivo constante, pero sí se limitó su valor máximo para evitar la reabsorción de humedad por parte de los granos de café. Conocer la humedad determinó el criterio de control para apagar los motores en las tardes y madrugadas.

El valor de la radiación solar detectada por los sensores indica la cantidad de energía que reciben los granos de café, está relacionada de forma directa con la temperatura y de forma inversa con la humedad ambiental. La radiación solar es la causa principal del avance del proceso de secado de los cafés para el prototipo de investigación, por lo que conocer cuándo aumenta determina el criterio de control de para iniciar el movimiento de los motores.

La estimación del contenido de humedad en los granos de café a través de una línea de tendencia fue correctamente determinada en el primer secado, sin embargo, no obtuvo una tendencia similar en el segundo secado. La estimación de las masas de las muestras de café a través de una línea de tendencia tampoco obtuvo resultados favorables.

El prototipo de secador solar utilizado en la presente investigación secó más de 100 kg de café cerezo en cada proceso. La dimensión del secador marca un factor diferenciador con secadores de menor capacidad debido a que las variables ya no son homogéneas en toda la cámara y se debe determinar bien la cantidad y ubicación de

los sensores. El hardware de monitoreo y control considera un PLC, un módulo IoT, sensores y actuadores industriales, estos son necesarios debido a que el ambiente de trabajo está expuesto a altas temperaturas, alta humedad ambiental nocturna, polvo, lluvias; y se requiere el equipo operativo las 24h durante varias semanas.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó un sistema IoT para enviar los datos registrados por los sensores del prototipo de secador solar a la nube y realizar un monitoreo remoto de las variables. El registro de datos manual presenta varias desventajas respecto a este sistema, entre ellas, estar propenso a errores en la digitación de información, mayor tiempo empleado y falta de disponibilidad para recopilar datos las 24 horas. El registro continuo de múltiples sensores generó una gran cantidad de datos que se procesaron y analizaron con diversos métodos gráficos para obtener información de valor.

6.3. Contrastación de las hipótesis

La hipótesis general es positiva porque con el análisis del algoritmo y datos en el prototipo de secador solar, se obtuvo un correcto control de la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural en una cooperativa cafetalera. La temperatura fue controlada a un valor constante, la humedad ambiental se limitó en su máximo valor y se disminuyó el incremento de la masa del café natural

Las hipótesis específicas también son positivas, a continuación, se detalla la contrastación de las tres hipótesis propuestas. Respecto a la primera hipótesis específica, la determinación de la ubicación adecuada de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en el prototipo de secador solar

permitió la correcta representación de los parámetros del proceso de secado del café natural. Para los sensores de temperatura y el sensor de humedad, la ubicación adecuada está en el nivel dos y tercera cama, debido a que los valores registrados presentan una gran similitud con el promedio de todos los sensores de temperatura. Para el sensor de radiación, la ubicación adecuada está en el nivel tres, debido a que los valores registrados presentan un mayor detalle en su variación con respecto al comportamiento del sol.

Respecto a la segunda hipótesis específica, la determinación de las relaciones entre las variables registradas en el prototipo de secador solar permitió establecer el comportamiento del proceso de secado del café natural. La radiación es la principal variable que modifica la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural. Sin embargo, con la activación de los motores, la potencia también modifica significativamente la temperatura, humedad ambiental y masa del café natural.

Respecto a la tercera hipótesis específica, la determinación de las condiciones ambientales y operativas en el prototipo de secador solar mejoró el avance del proceso de secado del café natural. Un piso de cemento dentro del prototipo de secador solar y una estructura adecuada evita el retraso del avance del proceso de secado del café natural debido a las lluvias, fuentes de agua adyacentes y corrientes subterráneas. Iniciar el secado a las 07 h favorece el avance del proceso de secado del café natural debido a que se aprovecha al máximo el horario efectivo de radiación solar incidente en el prototipo de secador solar.

CONCLUSIONES

1. Se analizó el algoritmo y los datos del prototipo de secador solar y se propuso una mejora para el correcto control de la temperatura, humedad ambiental y masa de las muestras de los granos de café natural. El control PID en cascada, independiente para cada zona, permite que las temperaturas promedio se mantengan constantes entre las 11 h y 17 h aproximadamente, cuando la temperatura promedio superaría normalmente el valor objetivo de 35 °C. En la ausencia de radiación solar detectada por los sensores, en las noches y madrugadas, se apagan los motores para evitar el aumento brusco de la humedad ambiental y la reabsorción de humedad por parte de los granos de café. Los motores se activan en intervalos por las mañanas entre las 08 h y 11 h aproximadamente para renovar el aire de la cámara ante la disminución del contenido de humedad de los granos de café.
2. Se determinó la ubicación adecuada de los sensores de temperatura, humedad ambiental y radiación en el prototipo de secador solar para la correcta representación de los parámetros del proceso de secado del café natural. En base a

los datos registrados por los sensores de temperatura, la posición que mejor representa el comportamiento del secador, para las variables temperatura y humedad ambiental, está ubicada en el nivel 2 y cama 3 para cada zona. El sensor de radiación superior registra con mayor detalle, y menor ruido, el comportamiento de la radiación incidente en el prototipo de secador solar por lo que su ubicación se considera la adecuada.

3. Se determinaron las relaciones entre las variables registradas por el prototipo de secador solar para establecer el comportamiento del proceso de secado del café natural. El incremento de la radiación solar presenta una relación directa con la temperatura y una relación inversa con la humedad ambiental. La potencia de los motores presenta una relación directa con la humedad ambiental y una relación inversa con la temperatura. El valor registrado por cada sensor de velocidad de aire está muy correlacionado con la potencia de su respectivo motor. La disminución de las masas de las muestras de los granos de café presenta una relación directa con la temperatura y una relación inversa con la humedad ambiental.

4. Se determinó las condiciones ambientales y operativas en el prototipo de secador solar para mejorar el avance del proceso de secado del café natural. Las montañas adyacentes al prototipo de secador solar establecen el horario efectivo de radiación solar incidente entre las 07 h y 17 h, por lo que el proceso de secado debe iniciar en la mañana para aprovechar la mayor cantidad de radiación solar. Las lluvias, fuentes de agua adyacentes y las corrientes subterráneas generan un entorno con alta humedad ambiental, especialmente ante la ausencia del sol, por lo que la

instalación de un piso de cemento y una adecuada estructura que no permita el ingreso del agua son fundamentales para el correcto progreso del secado.

RECOMENDACIONES

1. Intercambiar el sensor de radiación superior por uno que transmita corriente con el objetivo de disminuir el ruido ocasionado por el funcionamiento de los motores y comparar la variación en sus mediciones.
2. Utilizar sensores de temperatura de contacto ubicados debajo de los granos de café, debido a que la medición de la temperatura de los granos es más precisa.
3. Instalar dos calefactores antes de los motores de inyección, uno para cada zona, con un funcionamiento nocturno y analizar el efecto en las masas de las muestras de café; así como el tiempo de secado total.
4. Complementar el análisis de la variación de las masas de las muestras de café con datos manuales diarios de humedad contenida en el grano y realizar una mejor estimación. También agregar los datos de calidad del café determinados por los catadores al finalizar los procesos de secado y en las semanas posteriores.
5. Considerar otros algoritmos de control, como lógica difusa y control predictivo, y analizar el comportamiento de las variables en cada caso. Cambiar la variable controlada de temperatura promedio a temperatura máxima.

6. Realizar un análisis de rentabilidad entre maximizar las ganancias, al mejorar la calidad del café secado, en comparación con minimizar los costos, reducir consumo eléctrico generado principalmente por la activación de los motores del prototipo de secador solar.
7. Analizar la variación de las variables y el tiempo de secado al incrementar la masa total de café por secar en cada proceso del prototipo de secador solar, debido a que su capacidad máxima para cafés naturales es de 600 kg aproximadamente.
8. Agregar el subproceso de presecado en patio al sol en el primer día luego de la recolección cuando la humedad del café cerezo es alta y requiere de mayor ventilación. Agregar el subproceso de secado en guardiolas luego de la segunda semana con los cafés secando en el prototipo de secador solar. Analizar la variación en el tiempo y calidad del café comparando el secado mixto con el simple.
9. Analizar el proceso en el prototipo de secador solar para otros métodos de secado como la vía húmeda y la vía semihúmeda, debido a que el contenido de humedad de los granos y comportamiento en los días de secado es distinto al estudiado.
10. Implementar las mejoras propuestas en el prototipo de secador solar y comparar los resultados con otro prototipo establecido en una ubicación diferente, la cual cuente con condiciones climáticas y geográficas distintas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abadía, B., Rúveda, C., De La Torre, D., Giorda, J., Cardoso, L., Hoyos, M. & Bartosik, R. (2013). Manual de buenas prácticas en poscosecha de granos. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA.

Alves, R. C., Rodrigues, F., Antónia Nunes, M., Vinha, A. F., & Oliveira, M. B. P. P. (2017). State of the art in coffee processing by-products. Handbook of Coffee Processing By-Products, 1–26. doi:10.1016/b978-0-12-811290-8.00001-3

Barzola Cárdenas, A., Quiñones Huatangari, L., Vásquez Ochoa, B., Pérez Guevara, I. & Díaz Torres, M. (2020). Estimación de humedad de café pergamino utilizando un secador solar automatizado, mediante modelos matemáticos en Jaén-Perú. *Tecnia*, 30(1), 107-113. <https://dx.doi.org/10.21754/tecnica.v30i1.824>

Bawa Susana, I. G., Alit, I. B., & Okariawan, I. D. K. (2023). Rice husk energy rotary dryer experiment for improved solar drying thermal performance on cherry coffee. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41(102616), 102616. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102616>

Boot, W. (2006). Variety is the spice of coffee. *Geisha and other varieties*, 1-4.

- Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. D. S. (2018). Quality of natural coffee dried under different temperatures and drying rates. *Coffee Science*, 13(2), 159. <https://doi.org/10.25186/cs.v13i2.1410>
- Camayo, B. F., Manyari, G. M., De La Cruz, E. A., Place, L. M., Gavilán, M., & Quispe, M. A. (2022). Deshidratado del café en el secador solar autónomo y tradicional – Tarma. *Journal of Agri-food Science*, 3(1), 30–36. <https://revistas.uncp.edu.pe/index.php/jafs/article/view/1438>
- De Castro, R. D., & Marraccini, P. (2006). Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(Braz. J. Plant Physiol., 2006 18(1)), 175–199. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100013>
- Decreto Supremo N° 010-2019-MINAGRI. (27 de diciembre de 2019). <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-el-plan-nacional-de-accion-del-c-decreto-supremo-n-010-2019-minagri-1840243-1>
- Febrianto, N. A., & Zhu, F. (2023). Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties. *Food Chemistry*, 412(135489), 135489. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135489>
- Fernández De La Cruz, M. A. (2019). Diseño y simulación de un algoritmo de control predictivo generalizado con restricciones y su impacto en el proceso de secado de granos. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ghosh, P., & Venkatachalapathy, N. (2014). Processing and drying of coffee—a review. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 3(12), 784-794.

Haile, M. & Kang, W. H. (2019). The Harvest and Post-Harvest Management Practices' Impact on Coffee Quality. 10.5772/intechopen.89224.

Henao Arismendy, J. (2016). Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56186>

Huamán Sayán, L. O., & Mamani Arroyo, E. D. (2019). Diseño e implementación de un prototipo de secador de café automatizado. Universidad Ricardo Palma. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2444>

Instituto Nacional de Calidad – INACAL. (2021). Guía de Implementación de la Norma Técnica Peruana NTP 209.312:2020 CAFÉ. Buenas prácticas agrícolas para prevenir la formación de mohos.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). Directorio Nacional de Centros Poblados Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas Tomo 3.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). Perú: Principales Indicadores Departamentales 2009-2020.

Jurado C., J. M., Montoya R., E. C., Oliveros T., C. E., & García A., J. (2009). Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café. Cenicafe. <http://hdl.handle.net/10778/188>

Kishorre Annanth, V., Abinash, M., & Rao, L. B. (2021). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A case study of siemens industry. Journal of physics.

Conference series, 1969(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012019>

Largo Avila, E. (2020). Efecto del secado solar intermitente en la composición química del café. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79488>

López Cuervo, A., Osorio Ortiz, C. F., & Taborda Ramirez, D. A. (2022). Implementación de control lógico programable para maquina secadora de café de nivel personal. Institución Universitaria Pascual Bravo.

Martines, E., & Lira, L. (2010). Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. Centro Nacional de Metrología. <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>

Mendoza Marcillo, B. F., Pincay Menéndez, J. D., & Bravo Zamora, R. C. (2023). Influencia de la cosecha de café maduro y verde sobre la calidad física y organoléptica del café (*Coffea arábica* L.). *Agrosilvicultura Y Medioambiente*, 1(1), 14–25. <https://doi.org/10.47230/agrosilvicultura.medioambiente.v1.n1.2023.14-25>

Puerta Q., G. I. (1999). Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café. Cenicafe. <http://hdl.handle.net/10778/58>

Situmorang, Z., & Wardoyo, R. (2023). Extended Fuzzy Rule Suram for Coffee Drying System. *American Journal of Multidisciplinary Research and Innovation*, 2(1), 9–21. <https://doi.org/10.54536/ajmri.v2i1.1138>

Tigre Chitacpa, K. E., & Zumba Arichávala, J. D. (2022). Estudio de la pasarela inteligente IoT 2040 de SIEMENS y desarrollo de un manual de prácticas de laboratorio orientadas al aprendizaje de los sistemas de automatización.

Vásquez, L. C. & Cuervo, G. (2022). Diseño de un secador de café con control automático energizado con un sistema solar fotovoltaico para zonas rurales del departamento de Antioquia. <http://hdl.handle.net/20.500.12622/5656>

Velásquez, S., Franco, A. P., Peña, N., Bohórquez, J. C., & Gutierrez, N. (2020). Effect of coffee cherry maturity on the performance of the drying process of the bean: Sorption isotherms and dielectric spectroscopy. *Food Control*, 107692. doi:10.1016/j.foodcont.2020.107692

Wade, H. L. (2017). Basic and advanced regulatory control: System design and application. ISA.

ANEXOS

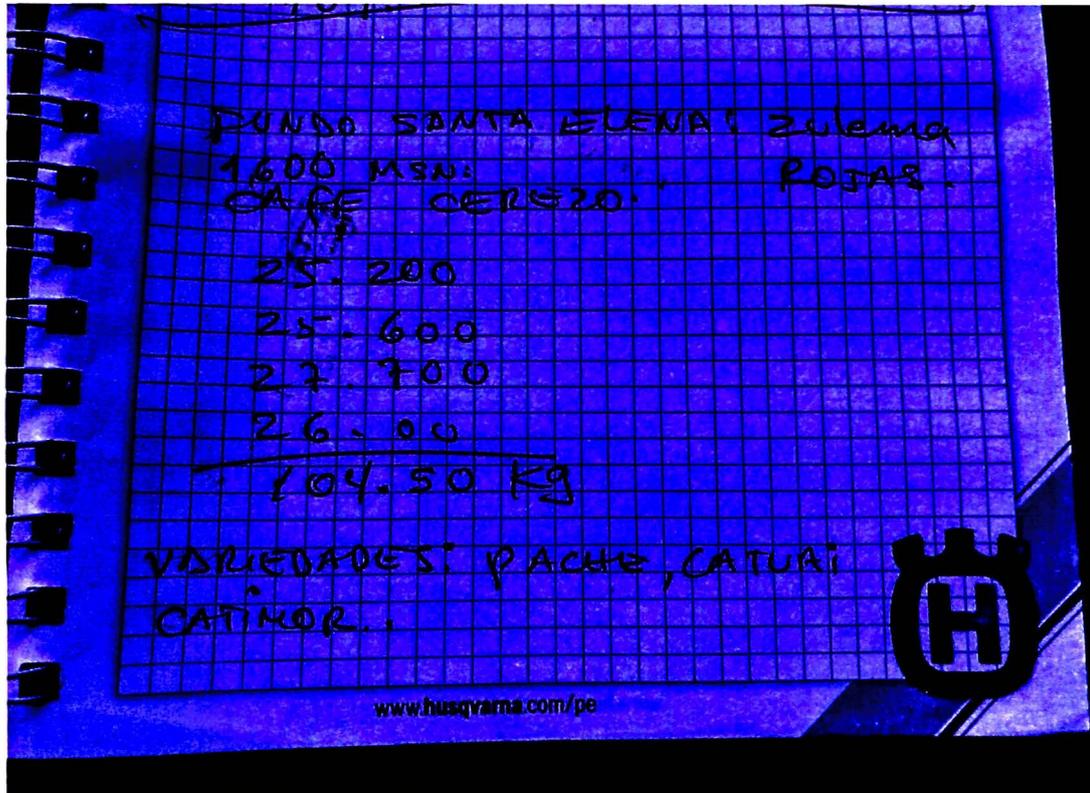
Anexo 1.	Datos en el período sin café para el día 6 de junio de 2023	1
Anexo 2.	Datos del café utilizado en el primer proceso de secado	2
Anexo 3.	Datos del primer proceso de secado para la semana del 15 al 21 de junio de 2023.....	3
Anexo 4.	Diagrama de cajas y bigotes de la radiación 2 del primer proceso de secado	4
Anexo 5.	Datos del segundo proceso de secado para la semana del 7 al 13 de julio de 2023.....	5
Anexo 6.	Diagrama de cajas y bigotes de la radiación 2 del segundo proceso de secado	6

Anexo 1. Datos en el período sin café para el día 6 de junio de 2023.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	time	hum	rad1	rad2	temp1	temp2	rad1_qc	rad2_qc	temp2_qc	temp1_qc					
2	2023-06-06T05:00:04.450Z	-2.61346388	-6.86034298	20.7573795	20.9418411	0	0	0	0	0					
3	2023-06-06T05:00:15.162Z	-6.53365993	-6.86034298	20.758585	20.935812	0	0	0	0	0					
4	2023-06-06T05:00:25.869Z	-1.14339054	-6.86034298	20.7453213	20.9285793	0	0	0	0	0					
5	2023-06-06T05:00:36.551Z	-2.45012236	-6.86034298	20.7429104	20.9201293	0	0	0	0	0					
6	2023-06-06T05:00:47.248Z	-1.14339054	-6.86034298	20.7417049	20.9141121	0	0	0	0	0					
7	2023-06-06T05:00:59.917Z	-1.47007346	-6.86034298	20.7429104	20.9153194	0	0	0	0	0					
8	2023-06-06T05:01:10.697Z	-5.7105232	-6.86034298	20.7332668	20.9141102	0	0	0	0	0					
9	2023-06-06T05:01:21.362Z	-1.14339054	-6.86034298	20.7344723	20.9129047	0	0	0	0	0					
10	2023-06-06T05:01:32.026Z	-1.14339054	-6.86034298	20.7187977	20.9129047	0	0	0	0	0					
11	2023-06-06T05:01:42.781Z	-4.0833738	-6.86034298	20.7175922	20.9141102	0	0	0	0	0					
12	2023-06-06T05:01:53.510Z	-1.30673194	-6.86034298	20.7227705	20.9165211	0	0	0	0	0					
13	2023-06-06T05:02:04.100Z	-4.0833738	-6.86034298	20.7151814	20.9247801	0	0	0	0	0					
14	2023-06-06T05:02:14.870Z	-4.5725215	-6.86034298	20.7151814	20.9213479	0	0	0	0	0					
15	2023-06-06T05:02:28.480Z	-1.14339054	-6.86034298	20.705359	20.9165211	0	0	0	0	0					
16	2023-06-06T05:02:38.682Z	-3.92019606	-6.86034298	20.7103577	20.9177265	0	0	0	0	0					
17	2023-06-06T05:02:48.830Z	-3.26409977	-6.86034298	20.7177696	20.9275483	0	0	0	0	0					
18	2023-06-06T05:02:59.552Z	-1.14339054	-6.86034298	20.711565	20.9129047	0	0	0	0	0					
19	2023-06-06T05:03:11.916Z	-1.47007346	-6.86034298	20.711565	20.9129047	0	0	0	0	0					
20	2023-06-06T05:03:22.836Z	-1.14339054	-6.86034298	20.711565	20.9129047	0	0	0	0	0					
21	2023-06-06T05:03:33.809Z	-1.14339054	-6.86034298	20.7151814	20.9080811	0	0	0	0	0					
22	2023-06-06T05:03:44.507Z	-1.30673194	-6.86034298	20.7139759	20.9044667	0	0	0	0	0					
23	2023-06-06T05:03:55.199Z	-1.14339054	-6.86034298	20.7151814	20.9022251	0	0	0	0	0					

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Datos del café utilizado en el primer proceso de secado.



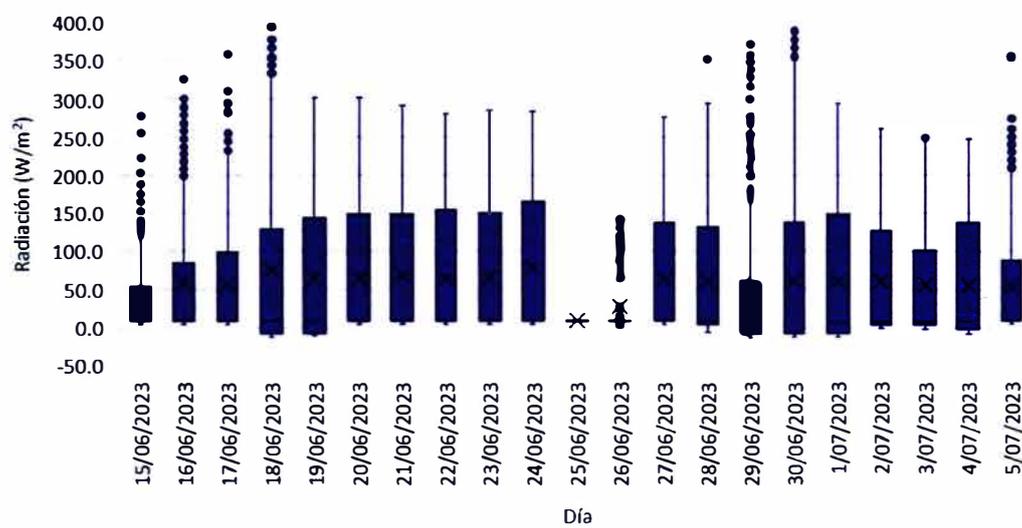
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Datos del primer proceso de secado para la semana del 15 al 21 de junio de 2023.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
time	b1	b2	b3	t1	t2	v3	v3_qc	t1_qc	t2_qc	b2_qc	b3_qc	b1_qc			
2	2023-06-15T	15.7030001	10.5419998	19.2420000	21.0710526	9.96383095	0.12577198	0	0	0	0	0			
3	2023-06-15T	15.7030001	10.5419998	19.2420000	21.0710526	9.96383095	0.24233219	0	0	0	0	0			
4	2023-06-15T	15.7010002	10.54	19.2420000	21.0710526	9.96383095	0.2061632	0	0	0	0	0			
5	2023-06-15T	15.7060003	10.54	19.2409992	21.1944923	9.96383095	0.18518519	0	0	0	0	0			
6	2023-06-15T	15.7049999	10.5410004	19.2420000	21.0710526	9.96383095	0.11284722	0	0	0	0	0			
7	2023-06-15T	15.7019997	10.5389996	19.2420000	23.6845169	9.96383095	0.11429399	0	0	0	0	0			
8	2023-06-15T	15.6999998	10.5389996	19.2420000	21.0710526	9.96383095	0.213397	0	0	0	0	0			
9	2023-06-15T	15.7040000	10.5380001	19.2420000	22.3777866	10.7805395	0.14684606	0	0	0	0	0			
10	2023-06-15T	15.7030001	10.5380001	19.2409992	23.8478584	9.96383095	0.1743345	0	0	0	0	0			
11	2023-06-15T	15.7010002	10.5369997	19.2420000	21.0710526	9.96383095	0.11574074	0	0	0	0	0			
12	2023-06-15T	15.6990004	10.5369997	19.2409992	23.6845169	9.96383095	0	0	0	0	0	0			
13	2023-06-15T	15.6990004	10.5369997	19.2420000	25.9712987	7.84032111	0.14973958	0	0	0	0	0			
14	2023-06-15T	15.698	10.5360003	19.2409992	22.3777866	9.96383095	0.1417874	0	0	0	0	0			
15	2023-06-15T	15.6969995	10.5340004	19.2399998	21.0710526	9.96383095	0	0	0	0	0	0			
16	2023-06-15T	15.6999998	10.5340004	19.2399998	21.0710526	9.96383095	0	0	0	0	0	0			
17	2023-06-15T	15.698	10.5340004	19.2399998	21.0710526	9.96383095	0	0	0	0	0	0			
18	2023-06-15T	15.698	10.533	19.2399998	21.0710526	9.96383095	0	0	0	0	0	0			
19	2023-06-15T	15.6969995	10.533	19.2399998	21.0710526	9.96383095	0.15407885	0	0	0	0	0			
20	2023-06-15T	15.6999998	10.533	19.2390003	21.0710526	9.96383095	-0.00144676	0	0	0	0	0			
21	2023-06-15T	15.7010002	10.533	19.2409992	21.234396	9.96383095	0.14327917	0	0	0	0	0			
22	2023-06-15T	15.6969995	10.533	19.2399998	21.0710526	9.96383095	0.23871528	0	0	0	0	0			
23	2023-06-15T	15.698	10.533	19.2399998	21.0710526	9.96383095	0.30698654	0	0	0	0	0			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Diagrama de cajas y bigotes de la radiación 2 del primer proceso de secado.



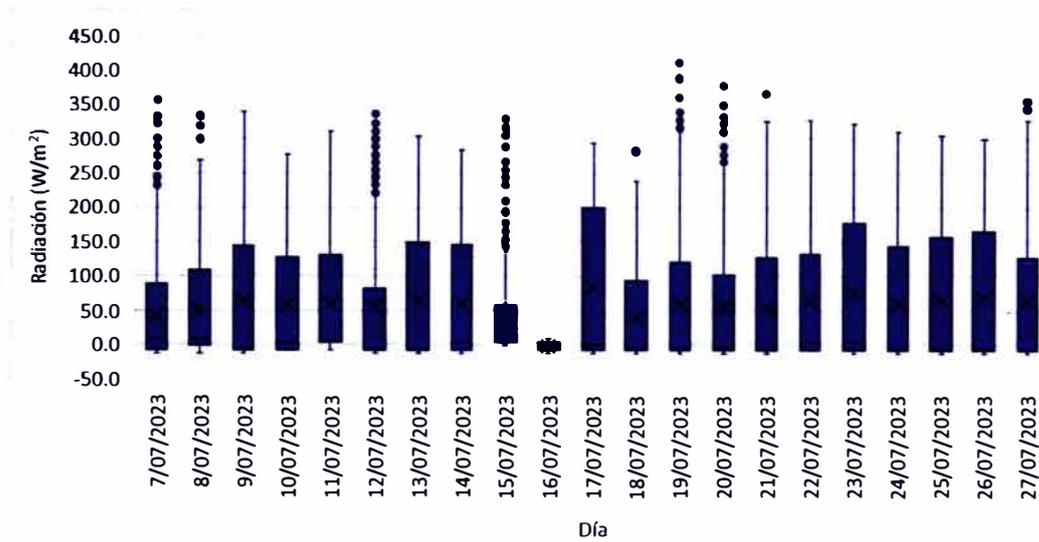
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Datos del segundo proceso de secado para la semana del 7 al 13 de julio de 2023.

time	D1	b2	b3	r1	r2	v3	v3_qc	r1_qc	r2_qc	b2_qc	b3_qc	b1_qc						
2	2023-07-07T17:3820004	39.4959984	19.0639992	1.30673194	-6.86034298	0.10344378	0	0	0	0	0	0						
3	2023-07-07T17:3829998	39.4949989	19.0639992	-2.61346388	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
4	2023-07-07T17:3839993	39.4920006	19.0639992	-1.63341498	-6.86034298	0.15335648	0	0	0	0	0	0						
5	2023-07-07T17:3860001	39.493	19.0639992	-6.37031841	-6.86034298	0.14322917	0	0	0	0	0	0						
6	2023-07-07T17:3880009	39.4959984	19.0629997	-4.73690367	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
7	2023-07-07T17:3890003	39.493	19.0620003	-4.73690367	-6.86034298	0.11284722	0	0	0	0	0	0						
8	2023-07-07T17:3880009	39.4900017	19.0629997	-4.08353758	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
9	2023-07-07T17:3890003	39.4910011	19.0629997	3.92019606	-6.86034298	0.11429399	0	0	0	0	0	0						
10	2023-07-07T17:3899998	39.4889984	19.0629997	6.86034298	-6.86034298	0.07740162	0	0	0	0	0	0						
11	2023-07-07T17:3920006	39.4910011	19.0620003	-4.2468791	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
12	2023-07-07T17:3909992	39.4920006	19.0629997	-1.14339054	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
13	2023-07-07T17:3899998	39.4959984	19.0620003	1.47007346	-6.86034298	0.10199653	0	0	0	0	0	0						
14	2023-07-07T17:3899998	39.5009995	19.0620003	6.69700146	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
15	2023-07-07T17:3880009	39.5029984	19.0610008	-5.39026976	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
16	2023-07-07T17:3890003	39.5019989	19.0620003	-1.79675663	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
17	2023-07-07T17:3880009	39.5029984	19.0620003	1.30673194	-6.86034298	0	0	0	0	0	0	0						
18	2023-07-07T17:3890003	39.5050011	19.0610008	1.14339054	-6.86034298	0.09548611	0	0	0	0	0	0						
19	2023-07-07T17:3890003	39.5029984	19.0610008	1.14339054	-6.86034298	0.19748263	0	0	0	0	0	0						
20	2023-07-07T17:3920006	39.5009995	19.0610008	1.14339054	-6.86034298	0.17164097	0	0	0	0	0	0						
21	2023-07-07T17:3939995	39.5040016	19.0610008	1.14339054	-6.86034298	0.17929815	0	0	0	0	0	0						
22	2023-07-07T17:3939995	39.5060005	19.0610008	-1.14339054	-6.86034298	0.16637731	0	0	0	0	0	0						
23	2023-07-07T17:3949999	39.5040016	19.0610008	-1.14339054	-6.86034298	0.14237913	0	0	0	0	0	0						

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6. Diagrama de cajas y bigotes de la radiación 2 del segundo proceso de secado.



Fuente: Elaboración propia.