



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO DE SECADO DE CACAO CON UNA
MÁQUINA RECTANGULAR Y EL USO DE DIFUSOR”**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECÁNICO

AUTORES:

Kevin Xavier Crespo Chato
Rosenver Stalin Guagua González

TUTOR:

Ing. Enrique Torres Tamayo, Ph.D.

LATACUNGA, MARZO, 2026

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecer a Dios y al Señor del Árbol que siempre me a guiado y me a dado fuerzas para seguir adelante en mi vida y cumplir mis sueños.

A mis padres Maria Chato y Geova Crespo que fueron un gran pilar fundamental en mi educación y formación profesional de igual manera a mi único hermano Anderson Crespo por siempre confiar en mi y su admiración a ser el ejemplo que el debe seguir.

Agradezco a mis abuelitos Maria Sánchez y Angel Chato por el apoyo y amor incondicional y la educación desde lo más mínimo hasta lo más importante.

A mis amigos, gracias por acompañarme durante todo este proceso. Su apoyo, sus palabras de ánimo y su presencia en los momentos difíciles hicieron que este camino fuera más llevadero.

Por último, agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme sus puertas al Ing. Enrique Torres, Ph. D. por su orientación, paciencia y valioso apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Kevin Crespo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo este logro a mis abuelitos, Maria Sánchez y Angel Chato quienes con su cariño, consejos y ejemplo han dejado una huella muy importante en mi vida. Su apoyo y sabiduría han sido una inspiración constante para seguir creciendo y superándome cada día.

Con mucho cariño dedico este logro a mi novia, Paola Alomoto, quien ha sido una parte fundamental durante todo mi proceso universitario, desde la nivelación hasta la culminación de esta etapa. Cuando pensé en abandonar mis estudios, fuiste tú quien me motivó a continuar y a no rendirme. Gracias por tu amor, tu paciencia y tu apoyo incondicional. Incluso en los momentos difíciles, siempre encontraste la forma de alegrar mis días y recordarme que debía seguir luchando por mis sueños.

Kevin Crespo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a papito Dios por permitirme culminar este proyecto de titulación sin novedad y brindarme la fortaleza necesaria durante todo este proceso, de igual manera expreso mi agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, prestigiosa institución que me brindó las herramientas y conocimientos necesarios para formarme y capacitarme profesionalmente. También agradezco a mis compañeros, quienes estuvieron presentes en cada etapa y en cada aventura que emprendimos a lo largo de los diferentes semestres de nuestra carrera. Asimismo, mi sincero agradecimiento al Ing. Enrique Torres Ph D. por bríndame la oportunidad de poner en marcha mi proyecto de tesis en el área de la termodinámica, así como por su guía, conocimientos y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Rosenver Guagua

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a mis padres Jaime Guagua y Gina González, por su apoyo económico y emocional a lo largo de mi formación académica, así como sus consejos que han sido fundamentales para alcanzar esta meta. De igual manera, dedico este proyecto a mis tíos que los considero como padres Oscar González y María Fajardo, por siempre contar con su apoyo motivacional y afectivo brindado. Finalmente, a mis hermanos, por siempre estar presente en los buenos y malos momentos, por su compañía, paciencia y por apoyarme incluso cuando mi carácter no era el mejor.

Rosenver Guagua

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TITULO:” EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO DE SECADO DE CACAO
CON UNA MÁQUINA RECTANGULAR Y EL USO DE DIFUSOR”**

Autores: Kevin Xavier Crespo Chato

Rosenver Stalin Guagua González

RESUMEN

En el Ecuador los pequeños y medianos productores de cacao enfrentan una problemática en el proceso de secado, debido a que este depende en gran medida de las condiciones climáticas, especialmente de la radiación solar. Además, en la cámara de secado rectangular del cacao que es el espacio de la máquina donde se deposita el cacao para eliminar la humedad, la cual posee dimensiones aproximadas de 1,63 m de largo y 88 cm de ancho, se presenta una distribución de flujo de aire no homogénea, lo que provoca el sobrecalentamiento y la posible quema de los granos en determinadas zonas de la cámara. Para resolver esta problemática se realizaron pruebas experimentales mediante la implementación de un distribuidor de flujo de aire el cual consiste en tubos perforados con ocho orificios los cuales permiten una distribución del flujo de aire caliente homogénea dentro de la cámara de secado, mejorando la transferencia de calor. De igual manera, en los ensayos experimentales se tomaron en cuenta las variables fundamentales como flujo de aire, masa a secar, temperatura en la cámara, contenido de humedad inicial y final del material a secar, consumo del GLP y el tiempo de secado. En los experimentos sin el uso del difusor se obtuvieron temperaturas elevadas mayores a 110°C en la parte delantera y en los laterales de la cámara, de igual forma los ensayos experimentales con difusor proporcionaron resultados de temperaturas menores a 73°C, valor considerado adecuado para el secado del cacao. A partir de estas pruebas se logró secar 17,10 kg de cacao CCN-51, reduciendo su contenido de humedad desde 61,50 % hasta 7 %, en un tiempo total de 8 horas, se logró obtener un cacao con un contenido de humedad final del 7 %, valor que se encuentra dentro del rango adecuado para la comercialización nacional e internacional.

Palabras clave: Cámara de secado, Comportamiento Térmico, Distribuidor de flujo de aire, Transferencia de calor, Perdidas Térmicas.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**THEME: “ENERGY ASSESSMENT OF THE COCOA DRYING PROCESS USING A
RECTANGULAR MACHINE AND A DIFFUSER”**

Authors: Kevin Xavier Crespo Chato

Rosenver Stalin Guagua González

ABSTRACT

In Ecuador, small and medium-scale cocoa producers face difficulties in the drying process, since it largely depends on climatic conditions, especially solar radiation. Additionally, in the rectangular cocoa drying chamber, which is the space of the machine where the cocoa is placed to remove moisture and has approximate dimensions of 1.63 m in length and 88 cm in width, a non-uniform air flow distribution occurs. This causes overheating and possible burning of the beans in certain areas of the chamber.

To address this problem, experimental tests were conducted through the implementation of an air flow distributor consisting of perforated tubes with eight holes, which allow a more homogeneous distribution of hot air within the drying chamber, improving heat transfer. Likewise, during the experimental tests, fundamental variables such as air flow, drying mass, chamber temperature, initial and final moisture content of the material, LPG consumption, and drying time were considered.

In experiments without the use of the diffuser, high temperatures greater than 110 °C were recorded at the front and lateral sections of the chamber. In contrast, the experimental tests with the diffuser provided temperatures lower than 73 °C, a value considered suitable for cocoa drying.

From these tests, 17.10 kg of CCN-51 cocoa were successfully dried, reducing the moisture content from 61.50 % to 7 % in a total time of 8 hours. The final product reached a moisture content of 7 %, which falls within the appropriate range for both national and international commercialization

Keywords: Drying chamber, Thermal behavior, Air flow distributor, Heat transfer, Thermal losses.

ÍNDICE

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:	1
Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación.	1
Equipo de Trabajo de Titulación:	1
Área de Conocimientos:	1
Línea de investigación:	1
Sub líneas de investigación de la Carrera:	2
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1 Situación problemática.	2
2.2 Formulación de problema.	3
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.	3
2.3.1 Objeto de investigación.....	3
2.3.2 Campo de acción.	3
2.4 BENEFICIARIOS.	3
2.4.1 Directos.	3
2.4.2 Indirectos.	3
2.5 JUSTIFICACIÓN.	3
2.6 OBJETIVOS.	4
2.6.1 Objetivo General.	4
2.6.2 Objetivo Específico.	4
2.7 SISTEMA DE TAREAS.	4
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
3.1 Antecedentes.	5

3.2	Marco referencial.....	6
3.2.1	Métodos de secado del cacao.....	6
	Secado Natural.....	7
	Secado en patio de cemento.....	7
	El secado tendales.....	7
	Secado natural en tipo elbas.....	8
	Secado a la sombra.....	9
	Secado tipo túnel de policarbonato.....	10
	Secado artificial.....	10
	Secador rotario vertical.....	10
	Secador de bandejas.....	11
	Secador de flujos cruzados.....	12
	Secador hibrido.....	12
	Secador cilíndrico vertical.....	13
	Secadora rectangular.....	14
	Tabla de comparación del secado natural y artificial.....	15
3.2.2	Transferencia de calor en la máquina secadora de cacao rectangular.....	15
	Convección forzada de aire caliente.....	15
	Calor sensible y latente en el proceso de secado.....	16
3.2.3	Eficiencia Energética Térmica en máquina secadora rectangular.....	16
	Definición.....	16
	Fibra de vidrio en las paredes de la cámara secadora rectangular.....	17
	Difusor cilíndrico de aire.....	17
	Consumo de combustible (GLP) en el proceso de secado.....	18
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	19
4.1	Variables que intervienen en el proceso de secado.....	19
4.1.1	Variable Dependiente.....	19

4.1.2	Variable Independiente.	20
4.2	Características y técnicas de secado.....	20
4.2.1	Propiedades del Cacao.	20
4.3	Descripción estructural de la máquina secadora y análisis del diagrama PI&D aplicando al proceso de secado de cacao.	21
4.3.1	Esquema estructural de la máquina secadora rectangular.	21
4.3.2	Descripción del diagrama PI&D del sistema de secado.	24
4.3.3	Relación de PI&D con las variables operativas del proceso.	25
4.4	MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE.....	26
4.4.1	Volumen del cacao.....	26
4.4.2	Psicrometría de Latacunga.....	26
4.4.3	Densidad de aire seco en el sitio de estudio.	27
4.4.4	Velocidad másica del aire de secado.....	27
4.5	PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL PROCESO DE SECADO TRIANGULAR Y RECTANGULAR.	28
4.5.1	PERDIDA EN EL RECUBRIMIENTO DEL DIFUSOR PARTE TRIÁNGULO... ..	29
	Número de Reynolds en el recubrimiento del difusor triangular.....	29
	Número de Nusselt en el recubrimiento del difusor triangular.....	29
	Coefficiente de convección en el recubrimiento del difusor triangular.....	30
	Área del triángulo.	30
	Pérdidas térmicas del recubrimiento del difusor parte triangular.	30
4.5.2	PERDIDA EN EL RECUBRIMIENTO DEL DIFUSOR PARTE DEL RECTÁNGULO.	31
	Número de Reynolds en el recubrimiento del difusor rectangular.	31
	Número de Nusselt en el recubrimiento del difusor rectangular.	31
	Coefficiente de convección en el recubrimiento del difusor rectangular.	32

Área del rectángulo.....	32
Pérdidas térmicas recubrimiento del difusor rectangular.....	33
4.5.3 Pérdidas térmicas totales en el recubrimiento del difusor triangular y rectangular.....	33
4.6 DETERMINAR CONTENIDO DE HUMEDAD Y CONSUMO DE GLP.....	33
4.6.1 Humedad inicial del cacao CCN-51.....	33
Contenido de humedad inicial.....	33
Reducción de humedad durante el secado.....	34
Masa de agua eliminada del cacao.....	34
Tasa de evaporación de humedad del cacao.....	34
4.6.2 Consumo de GLP en tiempo de operación de secado del cacao CCN-51.....	35
Consumo total de GLP.....	35
Consumo másico de GLP.....	35
Energía suministrada por el GLP.....	36
Potencia térmica suministrada kJ/h.....	36
4.6.3 Potencia Térmica suministrada kW.....	36
Consumo energético por agua evaporada.....	37
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
5.1 Cálculos en relación con la medición de flujo de aire.....	37
5.2 Cálculos de pérdidas en el proceso de secado en el recubrimiento del difusor triangular y rectangular.....	38
5.2.1 Recubrimiento del difusor parte triangular.....	38
5.2.2 Recubrimiento del difusor parte rectangular.....	39
5.3 CÁLCULO PARA DETERMINAR CONTENIDO DE HUMEDAD Y CONSUMO DE GLP.....	40
5.3.1 Humedad inicial del cacao CCN-51.....	40
5.3.2 Consumo de GLP en tiempo de operación de secado del cacao CCN-51.....	41

5.4	Resultados experimentales de la distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso de difusor.....	41
5.4.1	Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, sin el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 18 % y apertura del ventilador del 45%.....	44
5.4.2	Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, sin el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 18 % y apertura del ventilador del 75%.....	46
5.4.3	Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, sin el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 22 % y apertura del ventilador del 100%.....	48
5.4.4	Energía suministrada por el GLP sin el uso del difusor.....	50
5.5	Resultados experimentales de la distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor.....	51
5.5.1	Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, con el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 18 % y apertura del ventilador del 45%.....	53
5.5.2	Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, con el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 14 % y apertura del ventilador del 75%.....	55
5.5.3	Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, con el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 22 % y apertura del ventilador del 100%.....	57
5.5.4	Energía suministrada por el GLP sin el uso del difusor.....	59
5.6	Resultados experimentales del proceso de secado de cacao CCN-51 con el uso de difusor.	60
5.6.1	Resultados del consumo de GLP en el transcurso del tiempo con carga.....	67
5.6.2	Impacto económico del consumo de GLP y eléctrico.....	69
	Consumo de GLP en función al tiempo de operación.	69

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
6.1 Conclusiones.	72
6.2 Recomendaciones.	72
7. REFERENCIAS.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 3.1. Secado natural del cacao en el patio de cemento [6].	7
Figura 3.2. Secado natural del cacao en tendales [8].	8
Figura 3.3. Secado natural del cacao en tipo elbas [6].	9
Figura 3.4. Secado natural del cacao a la sombra [10]	9
Figura 3.5. Secado natural del cacao tipo túnel de policarbonato [11].	10
Figura 3.6. Secador Rotario [14].	11
Figura 3.7. Modelo de un secador de bandeja [15].	11
Figura 3.8. Secador de flujos Cruzado continuo [17].	12
Figura 3.9. Secadora hibrida [18].	13
Figura 3.10. Secadora cilíndrica vertical [19].	13
Figura 3.11. Secadora rectangular [21].	14
Figura 3.12. Convección natural y forzada[24].	16
Figura 3.13. Fibra de Vidrio [26].	17
Figura 3.14. Difusor circular.	18
Figura 3.15. GLP [31].	19
Figura 4.1. Esquema de la máquina secadora rectangular y dispositivos utilizados.	23
Figura 4.2.Descripción del diagrama PI&D del sistema de secado.	24
Figura 4.3.Relación de PI&D con las variables operativas del proceso.	25
Figura 4.4. Software CartaPsy Cálculos de Psicrometría del aire en Latacunga [33].	26
Figura 4.5. Velocidad del aire en el exterior del recubrimiento del difusor.	28
Figura 5.1. Perfil térmico del recubrimiento del difusor triangular.	39
Figura 5.2. Perfil térmico del recubrimiento del difusor rectangular.	40
Figura 5.3. Cámara de secado sin el uso del difusor.	42
Figura 5.4. Comportamiento de temperatura en función al tiempo sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18 % y el ventilador al 45%.	45
Figura 5.5.Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso del difusor, con porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 45%.	46
Figura 5.6. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18 % y el ventilador al 75%.	47
Figura 5.7.Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 75%.	48

Figura 5.8. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22 % y el ventilador al 100%.....	49
Figura 5.9. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso del difusor, con porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22% y el ventilador al 100%.....	50
Figura 5.10. Cámara de secado con el uso del difusor.....	52
Figura 5.11. Medición de velocidad de aire en los 5 tubos con el instrumento de medición denominado anemómetro.....	53
Figura 5.12. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo con el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18 % y el ventilador al 45%.....	54
Figura 5.13. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 45%.	55
Figura 5.14 Comportamiento de la temperatura en función al tiempo con uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 14 % y el ventilador al 75%.....	56
Figura 5.15. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 75%.	57
Figura 5.16. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo con uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22 % y el ventilador al 100%.....	58
Figura 5.17. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22% y el ventilador al 100%.	59
Figura 5.18. Pruebas experimentales con el Cacao CCN-51 fermentado.....	61
Figura 5.19. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo en la cámara de secado con el uso de difusor.	62
Figura 5.20. Comportamiento operativo con porcentaje de apertura de la válvula proporcional (%) en función del tiempo (min).	63
Figura 5.21. Comportamiento operativo con porcentaje de apertura del ventilador (%) en función del tiempo (min).	63
Figura 5.22. Comportamiento operativo flujo de aire (m ³ /s) en función del tiempo(min).....	64
Figura 5.23. Comportamiento operativo de la masa del producto (kg) en función del tiempo (min) con el uso de difusor en la cámara de secado.....	65
Figura 5.24. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado en función al tiempo en (min), porcentaje de apertura de válvula proporcional en (%), porcentaje de apertura de ventilador en (%) y valores reflejados de temperatura (°C).	66

Figura 5.25. Muestra final del cacao CCN-51 y porcentaje de humedad al 7% establecido por el higrómetro.	67
Figura 5.26. Consumo del GLP en función al tiempo	69
Figura 5.27. Consumo energético en función al tiempo de operación.....	71

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1.Modalidad de Titulación.	1
Tabla 1.2. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO.	1
Tabla 2.1. Actividades Planteadas	4
Tabla 3.1. Ventajas y desventajas del secado natural.	15
Tabla 3.2. Ventajas y desventajas del secado artificial.....	15
Tabla 4.1. Variables Dependientes.....	19
Tabla 4.2. Variables Independientes.	20
Tabla 4.3. Condiciones técnicas en el proceso de secado[32].....	20
Tabla 4.4. Propiedades del cacao CCN-51 [4].	20
Tabla 4.5. Propiedades Psicométricos del aire en Latacunga [33].....	27
Tabla 5.1. Criterios técnicos para el secado de cacao [3].	37
Tabla 5.2. Cálculos en relación con la medición de flujo.....	38
Tabla 5.3. Cálculos de pérdidas térmicas del proceso de secado de cacao CCN-51 en el recubrimiento del difusor triangular.	38
Tabla 5.4. Cálculos de pérdidas térmicas del proceso de secado de cacao CCN-51 en el recubrimiento del difusor rectangular.	39
Tabla 5.5. Cálculo para el contenido de humedad inicial.	41
Tabla 5.6. Cálculo para el consumo de GLP.	41
Tabla 5.7. Relación apertura de la válvula proporcional y emisión de combustible	43
Tabla 5.8. Flujo de aire en función del porcentaje del ventilador	43
Tabla 5.9. Consumo total del GLP durante el tiempo de operación	50
Tabla 5.10. Energía suministrada por el GLP en función de la apertura de la válvula proporcional.....	51
Tabla 5.11Consumo total del GLP durante el tiempo de operación	59
Tabla 5.12. Energía suministrada por el GLP en función de la apertura de la válvula proporcional.....	60
Tabla 5.13. Consumo de GLP en función del tiempo	68
Tabla 5.14.Costo de GLP consumido en un tiempo de operación de 8 horas.	70
Tabla 5.15. Consumo electrico en función al tiempo de operación en 8 horas.	70
Tabla 5.16. Proyección del consumo de GLP en función de la masa de cacao a secar	71

1. INFORMACIÓN GENERAL.

Tema del proyecto: Evaluación energética del proceso de secado de cacao con una máquina rectangular y el uso de difusor.

Modalidad de Titulación:

Tabla 1.1. Modalidad de Titulación.

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica.	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico.	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación.	X
	Artículo científico.	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:

Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación.

Equipo de Trabajo de Titulación:

Crespo Chato Kevin Xavier

Guagua González Rosenver Stalin

Ing. PhD Enrique Torres Tamayo

Área de Conocimientos:

Tomando como referencia a la norma CINE-UNESCO las áreas de ciencias y tecnológicas se detallan a continuación:

Tabla 1.2. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO.

Ingeniería, industria y construcción / Ingeniería energética.

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Ingeniería Electromecánica:

Eficiencia energética e integración de fuentes de energía renovables.

2. INTRODUCCIÓN.

El cacao, un producto agrícola de mayor importancia en Ecuador, no solo por su aporte económico sino también por su reconocimiento internacional en calidad y sabor. El proceso de secado establece una fase fundamental en la reducción del contenido de humedad.

Actualmente, en la Universidad Técnica de Cotopaxi se dispone de una secadora rectangular de cacao, la cual será el elemento principal para la evaluación y estudio de la energía térmica generada por GLP. El estudio se centrará en el análisis térmico del sistema, con énfasis en la transferencia de calor por convección forzada mediante la incorporación de un difusor, utilizando instrumentos de medición para estos fines (cámara termográfica, anemómetro e higrómetro).

Se utilizó un difusor cilíndrico para una mejor distribución del flujo de aire caliente, en la cámara de secado [1]. El difusor incorporado en la secadora rectangular de cacao se presenta como un avance técnico. Además, su diseño favorece a un secado más uniforme y con una menor exigencia de energía térmica.

2.1 Situación problemática.

De acuerdo con los análisis preliminares realizados en la máquina secadora rectangular utilizada para el secado del cacao, se ha evidenciado que la ausencia de un difusor de aire provoca una distribución no uniforme de la temperatura y del flujo de aire dentro de la cámara de secado. Esta condición genera que el aire caliente no se disperse de manera homogénea en toda el área de la cámara de secado, produciendo variaciones térmicas entre las diferentes zonas donde se encuentra el producto. Como resultado, los granos reciben una mayor exposición térmica, lo que puede ocasionar que el grano se queme. Además, en áreas donde la circulación de aire caliente es menor, los granos tienden a conservar niveles de humedad superiores a los recomendados ocasionando que se desarrollen hongos y deterioro del producto.

Adicional, la deficiente distribución del flujo de aire dentro de la cámara de secado provoca un incremento en el consumo de energía térmica, generada por el GLP (Gas Licuado de Petróleo), lo cual reduce la eficiencia energética del proceso y genera un aumento significativo en los costos de operación.

2.2 Formulación de problema.

La distribución no uniforme de la temperatura y del flujo de aire, provocando alteraciones en el contenido de humedad y generando un secado inadecuado del cacao. Además, la ausencia del difusor aumenta el consumo de energía térmica generada por GLP, reduciendo la eficiencia del proceso y elevando los costos de operación.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.

2.3.1 Objeto de investigación.

Secadora de cacao rectangular con el uso del difusor.

2.3.2 Campo de acción.

2213.02 Física de la Transmisión del Calor.

2.4 BENEFICIARIOS.

2.4.1 Directos.

Universidad Técnica de Cotopaxi de manera que puedan realizar estudios de los parámetros de secado del cacao.

2.4.2 Indirectos.

Productores pequeños y medianos de cacao en el Ecuador.

2.5 JUSTIFICACIÓN.

En la actualidad, para los productores medianos y pequeños, el alto consumo de GLP durante el secado del cacao sin el uso de un difusor presenta costos operativos elevados, también las variaciones térmicas dentro de la secadora rectangular generan un uso ineficiente de la energía térmica.

Al incorporar un difusor en la cámara de secado se mejora la distribución de aire caliente de manera más homogénea para reducir las pérdidas de energía térmica. El análisis de esta investigación permitirá evaluar el consumo real de GLP y su comportamiento térmico, lo cual brindará información útil para apoyar la toma de decisiones durante el proceso de secado de cacao.

2.6 OBJETIVOS.

2.6.1 Objetivo General.

Evaluar el desempeño energético térmico de la máquina secadora rectangular de cacao mediante el análisis del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, considerando el uso de un difusor en función del flujo de aire y del consumo de GLP como fuente de energía térmica.

2.6.2 Objetivo Específico.

- Analizar el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado tomando en cuenta la variable del flujo de aire con y sin difusor.
- Cuantificar la energía térmica generada por el GLP en la máquina secadora rectangular mediante el consumo de combustible en condiciones de operación con y sin difusor.
- Determinar la distribución de temperatura, tiempo de secado y consumo del GLP para el cacao CCN-51.

2.7 SISTEMA DE TAREAS.

Tabla 2.1. Actividades Planteadas

Objetivos específicos	Actividades	Resultados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar una revisión bibliográfica en libros, artículos y fuentes académicas, que aporten fundamentos teóricos relacionados con el proceso de secado del cacao.	Recopilación de información en fuentes académicas sobre procesos de secado del cacao.	Bases conceptuales para la investigación.	Artículos, Libros, Tesis.
	Investigaciones previas sobre distribución térmica y eficiencia energética.	Búsqueda de la información correcta en desarrollo del tema.	Fuentes bibliográficas como Google académico, Zotero y Mendeley.
Analizar el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado tomando en cuenta la variable del flujo de aire con y sin difusor.	Registro de datos de temperatura, flujo de aire y válvula proporcional, ventilador.	Datos experimentales del proceso.	LabVIEW.
	Elaborar gráficas y análisis de correlación entre variables y eficiencia térmica del proceso de secado.	Curvas de comportamiento térmico respecto al tiempo.	Software de Excel para el análisis de datos.
	Observación de perfiles térmicos de la cámara de secado y velocidad de aire.	Distribución de temperatura en la cámara de secado. Velocidad de aire en los 5 tubos del difusor.	Cámara termográfica. Anemómetro.

Cuantificar la energía térmica generada por el GLP en la máquina secadora rectangular mediante el consumo de combustible en condiciones de operación con y sin difusor.	Medir el consumo de GLP inicial y final con y sin difusor en función al tiempo	Registro temporal de funcionamiento. Masa de GLP consumida con y sin difusor en función al tiempo de operación.	Balanza Cronometro digital
	Evaluación de temperaturas en la cámara de secado con y sin el uso de difusor.	Variaciones de temperatura en función al tiempo hasta que el sistema logre valores constantes	Sensores de temperatura
Determinar la distribución de temperatura, tiempo de secado y consumo del GLP para el cacao CCN-51.	Registro de datos de temperatura, flujo de aire, ventilador, válvula proporcional, masa del producto y el consumo de GLP durante el proceso de secado.	Base de datos experimentales del proceso de secado.	LabVIEW. Balanza.
	Evaluar graficas de los resultados obtenidos de las variables de temperatura, flujo de aire, ventilador, válvula proporcional, masa del producto	Curvas de comportamiento respecto al tiempo.	Software de Excel para el análisis de datos.
	Analizar el perfil térmico en la cámara de secado y humedad	Distribución de temperatura en la cámara de secado. Humedad optima del cacao al 7%.	Cámara termográfica. Higrómetro.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

3.1 Antecedentes.

Por otra parte, durante siglo XVIII y principios del XIX, el comercio denominado como la "pepa de oro" en Ecuador se volvió el motor económico del país este producto fue llamado así debido a sus excepcionales propiedades alimenticias, sobre todo por ser una fuente energética, desde el puerto de Guayaquil se enviaban productos a Acapulco, Valparaíso, Perú, Chocó y El Realejo [2].

Según Defaz y Chiluisa [3], realizaron un diseño y construcción de una maquina rectangular con un dispersor de gas obteniendo con este proyecto un flujo de aire caliente en toda la cámara de secado además lograron reducir el 60 % de humedad de cacao al 7 %, este rango de humedad es el adecuado ya que si el cacao llega a una humedad mayor o igual al 8 % se toma el riesgo de que se cree moho en el cacao.

El estudio realizado por Jaramillo Diego [4], desarrolló un control PID con el objetivo de regular de manera precisa la temperatura y las condiciones internas del proceso de secado, de la máquina secadora rectangular debido a su capacidad estructural para soportar cargas superiores a 70kg incluso este tipo de máquinas no depende de factores climáticos específicamente la radiación solar.

La máquina secadora rectangular de cacao, ubicada en la Universidad Técnica de Cotopaxi, específicamente en el laboratorio del Centro de Investigación presentaba varios inconvenientes en su funcionamiento inicialmente el chispero no accionaba al momento de poner en marcha la máquina, lo que impedía el encendido adecuado del sistema de combustión. Además, el equipo no contaba con un sensor que permitiera determinar el flujo de aire que ingresa a la cámara de secado, lo cual dificultaba el monitoreo de esta variable durante el proceso. Por otra parte, el difusor (distribuidor de aire) está conformado por cinco tubos de acero inoxidable, dos de ellos se encontraban ubicados de forma incorrecta lo que afectaba la correcta distribución del aire caliente dentro de la cámara de secado.

Los proyectos de titulación desarrollados por estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi constituyeron un aporte relevante para el desarrollo del presente trabajo de investigación. En la máquina de secadora rectangular de cacao se implementó un distribuidor de flujo de aire (difusor), el cual permitió mejorar la distribución del aire caliente en la cámara de secado.

Asimismo, se realizaron un total de 30 pruebas experimentales sin y con difusor con el objetivo de determinar los parámetros óptimos de operación, lo que permitió asegurar un proceso de secado eficiente del cacao.

3.2 Marco referencial.

3.2.1 Métodos de secado del cacao.

Una vez que los granos son fermentados, comienza la reducción de la humedad del grano, pasando del 60% al 6% o 8%, con el objetivo de ser almacenados y comercializados.

Un contenido elevado de humedad mayor al 8% hará que el moho se desarrolle mientras se almacena, por lo que es fundamental seguir el proceso correcto de secado después de la fermentación, si hay moho, se clasifica como un grano de calidad baja.

La circulación de aire en los granos es lo que fundamenta el proceso de secado, ya que ayuda a reducir la humedad interna [5].

Secado Natural.

De acuerdo con el estudio realizado por Jairo Nogales las almendras de cacao tienen una humedad del 55 al 60 % al concluir el proceso de fermentación, y es necesario disminuirla a entre el 6% y el 8 %. En gran parte, el método de secado y su eficiencia se ven afectados por las condiciones climáticas en las áreas productoras de cacao las consecuencias del secado pueden tener un impacto importante después sobre el grano almacenado [6].

Secado en patio de cemento.

El secado en patio de cemento al sol, como se muestra en la figura 3.1, se emplea únicamente en las épocas calurosas siempre que las lluvias no afecten durante el periodo de la cosecha. Si las condiciones climáticas no son propicias para un secado apropiado, el cacao desprende olores desagradables [6].



Figura 3.1. Secado natural del cacao en el patio de cemento [6].

El secado tendales.

El secado natural en tendales, en la figura 3.2, es un método muy tradicional que emplean los productores de cacao medianos y pequeños, ya que es sencillo de operar y económico, este procedimiento implica la extensión de los granos de cacao fermentados sobre áreas altas llamadas tendales que pueden ser de malla, cemento o madera, están construidas con el propósito de posibilitar que el aire circule por encima y por debajo del grano [7].

Los granos son al sol de manera directa durante el proceso de secado, mientras que los giros manuales se ejecutan periódicamente para asegurar una temperatura homogénea y prevenir la fermentación secundaria o el sobrecalentamiento este método disminuye el contenido de humedad del grano desde un 60 % hasta un rango de 6 a 8 %, lo cual es apropiado para su almacenamiento y venta.



Figura 3.2. Secado natural del cacao en tendales [8].

Secado natural en tipo elbas.

Se describe como una estructura de secado solar con un techo deslizante, en la figura 3.3, que se utiliza en áreas tropicales por pequeños y medianos productores y que está hecha principalmente de madera y láminas de zinc. Su función es regular el secado de los granos de cacao para protegerlos de la lluvia o del excesivo sol, algo esencial para disminuir la humedad y generar precursores de sabor muy buenos. Estas estructuras posibilitan que los agricultores manejen de manera eficaz las condiciones climáticas tropicales y garanticen una deshidratación homogénea de la cosecha [9].



Figura 3.3. Secado natural del cacao en tipo elbas [6].

Secado a la sombra.

Modelo de invernadero, figura 3.4, diseñado específicamente para el secado del cacao. Tras múltiples ensayos de campo, se obtuvo el modelo óptimo para el secado del cacao, mediante la regulación de la temperatura y la ventilación, logrando un secado uniforme que conserva la humedad deseada y disminuye el tiempo en comparación con el sistema tradicional, sin la necesidad de utilizar fuego debido al humo y a los olores [10].



Figura 3.4. Secado natural del cacao a la sombra [10]

Secado tipo túnel de policarbonato.

Mediante un proceso de secado solar tipo túnel de policarbonato, en la figura 3.5, se emplea la energía solar para eliminar la humedad del grano de cacao a través de la circulación controlada de aire caliente. Este sistema consiste en una estructura rectangular o semicilíndrica que está recubierta con láminas transparentes de policarbonato, las cuales dejan pasar la radiación solar y producen un efecto invernadero en el interior del túnel [11].



Figura 3.5. Secado natural del cacao tipo túnel de policarbonato [11].

Secado artificial.

En el proceso de secado de manera artificial, se utiliza aire caliente para reducir la humedad del grano. Para asegurar un flujo de aire apropiado y prevenir la contaminación del cacao, es crucial usar fuentes de calor limpias, como gas natural o electricidad. La secadora artificial ayuda a disminuir el tiempo de secado del cacao, siendo una máquina eficiente entre las diferentes secadoras que existen [12].

Secador rotario vertical.

La máquina secadora rotatoria vertical opera al inyectar aire caliente por medio de un quemador que está situado en la parte inferior del tambor, en la figura 3.6. El aire caliente asciende por los materiales de secado de la máquina, lo que permite la eliminación del agua y una disminución en el contenido de humedad. El material seco se expulsa por la parte de abajo del tambor, mientras que el aire cálido y húmedo sale a través de un ventilador y un ciclón (separador por fuerza centrífuga).

El secador rotatorio vertical se emplea en el sector de la alimentación para deshidratar productos alimenticios como granos, hierbas, nueces, frutas, especias y verduras. Asimismo, se usa en la industria minera para deshidratar minerales como el hierro y el carbón. [13].



Figura 3.6. Secador Rotario [14]

Secador de bandejas.

La secadora de bandejas consta de un sistema de almacenamiento compuesto por bandejas o charolas con distintos niveles, fabricadas generalmente en acero inoxidable para garantizar durabilidad e higiene. La función principal de la máquina es emitir aire caliente mediante convección forzada, el cual circular de forma horizontal o vertical dentro de la cámara de secado; este flujo de aire caliente provoca la evaporación del agua contenida en los tejidos del grano de cacao, reduciendo así su humedad [15] una de las ventajas de este tipo de secadora es que posee ruedas como se observa en la Figura 3.7, lo que facilita su desplazamiento y transporte dentro del área de trabajo.



Figura 3.7. Modelo de un secador de bandeja [15].

Secador de flujos cruzados.

La secadora de flujos cruzados se usa para secar productos agrícolas, como el cacao en esta máquina, el aire caliente se mueve en dirección perpendicular al desplazamiento del producto, en la figura 3.8. Al perfeccionar la interacción entre el aire y los granos, se logra un secado uniforme y eficiente. Según investigaciones sobre la tecnología para secar cacao, este proceso posibilita un secado rápido que preserva la calidad del grano y mejora el uso de energía y tiempo en comparación con otros métodos [16].

El secador GSS, que emplea un flujo cruzado, es una clase de secador industrial utilizado para el secado de diferentes tipos de granos [17].



Figura 3.8. Secador de flujos Cruzado continuo [17].

Secador híbrido.

Es un sistema que combina varias fuentes de energía para mejorar el proceso de secado; se llama una secadora híbrida de cacao, en la figura 3.9. Generalmente, emplea energía solar a través de paneles solares para calentar el aire, si la radiación solar no es suficiente para mantener una temperatura ideal existe un sistema adicional que recurre a combustibles como gas licuado de petróleo (GLP) o electricidad para mantener la temperatura adecuada, particularmente en situaciones climáticas desfavorables [4].



Figura 3.9. Secadora híbrida [18].

Secador cilíndrico vertical.

El secador cilíndrico vertical para el cacao, en la figura 3.10, esta clase de máquina posibilita un secado del cacao en un tiempo más reducido y se distingue de las rectangulares en la gestión del grano mediante el empleo de componentes y mecanismos mecánicos. Su diseño en el proceso de secado produce un equipo altamente productivo sin comprometer su calidad [19].

Equipo industrial utilizado para reducir el contenido de humedad de materiales granulares mediante un suministro controlado de aire caliente que aprovecha la gravedad y la convección térmica. Su configuración cilíndrica y vertical garantiza un proceso continuo y fluido con bajos requisitos de espacio en la planta: el material húmedo ingresa a la parte superior y se mueve verticalmente a través de la cámara de secado, mientras que el aire caliente circula en paralelo o en contracorriente, promoviendo la transferencia de calor y la evaporación del agua.

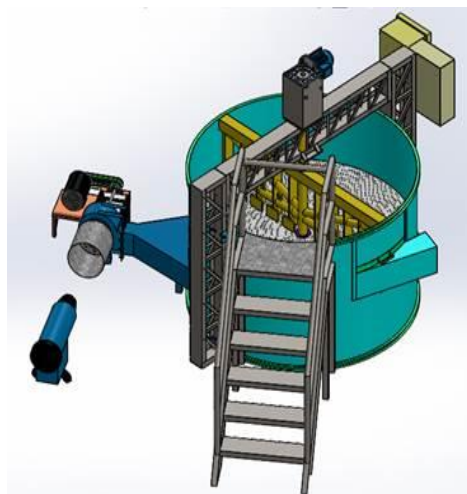


Figura 3.10. Secadora cilíndrica vertical [19].

Secadora rectangular.

Este tipo de equipo es muy empleado por los cultivadores de cacao gracias a su eficiencia en el secado y su bajo consumo energético, en la figura 3.11. La separación de los granos se lleva a cabo manualmente, utilizando palas de madera o metal. Su diseño permite una eliminación eficiente de la humedad en los granos, lo que contribuye notablemente a incrementar la productividad [20].

Para garantizar el flujo de aire en toda la cámara de secado rectangular se utiliza un ventilador, mientras que para calentar el aire se realiza mediante el uso de GLP(Gas Licuado de petróleo) , además cuenta con una válvula proporcional para controlar la salida de gas, la secadora rectangular por su estructura permite una mejor distribución de los granos y del flujo de aire caliente, lo que contribuye a optimizar el secado, reducir el tiempo del proceso y mejorar la calidad del producto final.

El proceso se basa en la transferencia de calor por convección y la difusión de humedad desde el interior del grano hasta su superficie. La eficiencia del secado depende directamente de la temperatura, la velocidad de aire, y de la capa de cacao, la cual debe operar dentro de rangos térmicos controlados, garantizando un secado progresivo y estable; de no cumplir, puede generar fisuras en el grano, pérdida de aromas o endurecimiento superficial.



Figura 3.11. Secadora rectangular [21].

Tabla de comparación del secado natural y artificial.

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas del secado natural.

Secado Natural	
Ventajas	Desventajas
Bajo costo de implementación.	Depende de la luz solar.
No contamina el medio ambiente.	Mayor tiempo de secado de 5 a 7 días; depende del cambio climático de la zona.
No existe la posibilidad de que el grano se sobrecaliente.	Si el secado no es a tiempo, puede provocar un crecimiento excesivo de moho.
Conserva los aromas y sabores tradicionales del cacao.	Mayor probabilidad de contaminación debido a insectos, polvo o animales.
Necesita materiales sencillos, como zarandas y tendales.	Difícil control de temperatura y ventilación en el secado.
No requiere mantenimiento de equipos.	Mayor tiempo de trabajo y mano de obra del productor.

Tabla 3.2. Ventajas y desventajas del secado artificial.

Secado artificial	
Ventajas	Desventaja
Secado del cacao en un menor tiempo.	Alta inversión inicial en equipos.
Control preciso de la temperatura, el flujo de aire y el peso.	Mantenimiento técnico de la máquina.
No depende del clima.	Dependencia de suministro energético como electricidad, gas o diésel.
Proceso de secado durante todo el año.	Riesgo de sobrecalentamiento de los granos que puede reducir el aroma tradicional del cacao.
Se puede automatizar el proceso de secado.	Riesgo de sobrecalentamiento o fallas en los equipos.
Menor riesgo de contaminación externa.	Necesita operadores capacitados.
Reduce la mano de obra.	Reparaciones costosas si hay fallas.

3.2.2 Transferencia de calor en la máquina secadora de cacao rectangular.

Convección forzada de aire caliente.

La convección forzada, en la figura 3.12, intensifica la transferencia de calor, garantizando mayor precisión y eficiencia térmica, la aceleración del intercambio de calor reduce el tiempo del proceso y el rendimiento que genera el sistema. Esta circulación activa, favorece una redistribución veloz de aire caliente en zonas frías, resultando en temperaturas más uniformes y estables en todo el sistema[22].

Calor sensible y latente en el proceso de secado.

El calor sensible: Se produce debido a la conducción y a la convección. En la capa límite, el calor pasa de la superficie al aire cercano y asciende por convección cuando la superficie está más caliente que la atmósfera, lo que provoca el movimiento del aire y la distribución del calor [23].

El calor latente: Es el calor que se transfiere a través de la condensación y evaporación del agua en las capas más altas de la atmósfera. El calor se retiene en la evaporación y se emite en la condensación, lo que provoca un desplazamiento de calor desde la superficie hacia las capas más altas de la atmósfera[23].

Durante el proceso de secado del cacao, el aire caliente suministrado por el calor sensible es lo que permite incrementar la temperatura del aire y de los granos de cacao. Mientras que el calor latente es el encargado de evaporar la humedad de los granos sin que la temperatura aumente significativamente.

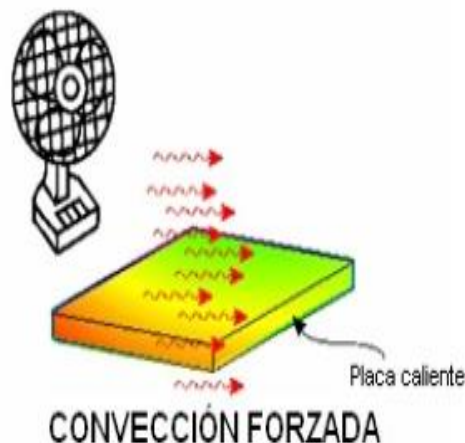


Figura 3.12. Convección natural y forzada[24].

3.2.3 Eficiencia Energética Térmica en máquina secadora rectangular.

Definición.

Se define como la capacidad de alcanzar resultados óptimos en una determinada actividad mediante el uso mínimo posible de recursos energéticos. Por lo tanto, este enfoque promueve la implementación y utilización de máquinas con mayor rendimiento energético [25].

Fibra de vidrio en las paredes de la cámara secadora rectangular.

La fibra de vidrio debido a su estructura fibrosa y a la capacidad de atrapar aire en su interior, reduce significativamente la transferencia de calor por conducción y convección. Además, permite disminuir las pérdidas térmicas, contribuyendo a una mejor eficiencia energética térmica.

De igual forma la fibra de vidrio presenta una baja conductividad térmica, generalmente en el rango de 0,03 a 0,07 W/m·K, valor que la posiciona como un material aislante eficiente frente a otros materiales convencionales [26].

En particular, la fibra de vidrio es un material que no genera hongos o bacteria, lo cual es un beneficio al momento de secar el cacao ya que evita la infección del grano, de esta manera se preservan las propiedades físicas del cacao [27].



Figura 3.13. Fibra de Vidrio [26].

Difusor cilíndrico de aire.

Realizar mejoras en la eficiencia energética térmica de una máquina secadora de cacao se traduce en un uso eficiente de la energía empleada para el proceso de secado.

Para lograr este objetivo, se incorporan difusores con el objetivo de tener una distribución de flujo de aire homogénea. Además, los difusores reducen pérdidas de energía e incrementan el rendimiento térmico del sistema [28].

Además, como se puede visualizar en la figura 3.14, cada tubo de nuestro difusor posee siete orificios estratégicamente distribuidos con la finalidad de que el aire caliente circule de manera uniforme por toda la máquina de secado, lo que contribuye a mejorar la eficiencia energética térmica generada durante el proceso de secado.

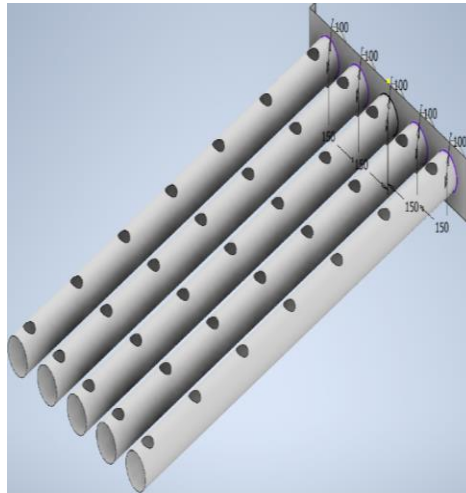


Figura 3.14. Difusor circular.

Consumo de combustible (GLP) en el proceso de secado.

Para mejorar la eficiencia operativa y garantizar un producto final de calidad el sector industrial ha implementado estrategias orientadas a la reducción del tiempo del proceso de secado del cacao, considerando las limitaciones impuestas por las condiciones climáticas. Como resultado, se han diseñado secadoras rectangulares que utilizan el gas licuado de petróleo (GLP), figura 3.15, como fuente primaria de energía [29].

En la figura 3.15, diversas investigaciones sobre el secado de granos indican que el GLP (Gas Licuado de Petróleo) es uno de los combustibles más utilizados en las máquinas secadoras de granos, principalmente por su alto rendimiento energético y combustión relativamente más limpia en comparación con otros combustibles como el diésel. Esto contribuye a mejorar la eficiencia térmica de los sistemas industriales y a disminuir los costos asociados al proceso de secado [30].



Figura 3.15. GLP [31].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.

4.1 Variables que intervienen en el proceso de secado.

4.1.1 Variable Dependiente

La variable dependiente presenta cambios cuando los datos de las variables independientes varían en el transcurso del tiempo.

Tabla 4.1. Variables Dependientes.

Variable	Concepto	Unidad de medida	Técnica	Instrumento
Tiempo de secado	Tiempo a secar el grano de cacao	min	Medición	Cronometro
Consumo de GLP	Cantidad de GLP como fuente de energía para el proceso de secado	kg	Medición	Balanza
Contenido de humedad del producto final.	Porcentaje de humedad del grano de cacao en el proceso de secado.	%	Medición	Higrómetro

4.1.2 Variable Independiente.

La variable independiente son los factores o causas que influyen en el estudio.

Tabla 4.2. Variables Independientes.

Variable	Concepto	Unidad de medida	Técnica	Instrumento
Masa a secar	Cantidad de cacao a secar	kg	Medición	Balanza
Flujo de aire	Cantidad de aire que fluye por el ducto que conecta al ventilador.	$\frac{m^3}{s}$	Medición	Anemómetro
Temperatura de secado	Temperatura optima y constante para el proceso de secado del cacao.	°C	Medición	Termómetro

4.2 Características y técnicas de secado.

En base a la información previa, en la tabla 4.3, se ha recopilado los datos acerca del secado a tomar en cuenta y el análisis de documentos vinculados con el procedimiento de secado de granos de cacao, se han obtenido considerando los parámetros.

Tabla 4.3. Condiciones técnicas en el proceso de secado[32].

Nº	Criterio	Valor
1	Temperatura de aire caliente para el secado.	60-70 °C
2	Humedad inicial del cacao.	Aproximadamente del 50-60 %
3	Humedad final del cacao	Del 6-7 %
4	Velocidad de aire en el proceso de secado.	0,3 - 3m/s
5	Material anticorrosivo.	70%

4.2.1 Propiedades del Cacao.

En la tabla 4.4, se presentan las principales propiedades físicas y térmicas del cacao de la variedad CCN-51, las cuales son los parámetros fundamentales para el análisis del proceso de secado[4]

Tabla 4.4. Propiedades del cacao CCN-51 [4].

Descripción	Porosidad	Densidad aparente [kg/m ³]	Calor específico [$\frac{J}{kg.K}$]	Conductividad térmica [$\frac{W}{m.K}$]	Difusividad térmica [m ² /h]
Cacao	0,56	520	1728	0,18	0,000721

4.3 Descripción estructural de la máquina secadora y análisis del diagrama PI&D aplicando al proceso de secado de cacao.

4.3.1 Esquema estructural de la máquina secadora rectangular.

Especifica los siguientes dispositivos utilizados en la figura 4.1, en la máquina secadora rectangular en relacionados con la medición de la temperatura, el flujo de aire, masa, y el control como ventilador y válvula proporcional. Adicional para más información de las características de los dispositivos utilizados lo puede visualizar en el Anexo O.

1. Ventilador.

El ventilador controla el flujo de aire a través de una tubería que permite transportar el aire caliente desde la zona de generación de calor hacia la cámara de secado continuo mediante porcentajes de apertura del 45 % al 100 %.

2. Válvula proporcional.

Es un componente utilizado para controlar el flujo de gas de manera precisa y continua, su principal función es controlar la cantidad de GLP que ingresa al quemador, la apertura de esta válvula se la realiza del 14% al 22%, además contribuye a optimizar el consumo de combustible, ya que dosifica el gas de manera adecuada.

3. Sensor MAF.

Su principal función es determinar el caudal de aire que pasa por una tubería o canal, se utilizó un medidor de flujo de aire modelo TOYOYA 22204-0GD20, el cual permite obtener datos que circula dentro del tubo cilíndrico que se conecta con la cámara de secado.

4. Chispero.

El chispero genera un arco eléctrico el cual permite accionar la mezcla de GLP y aire en el quemador.

5. Recubrimiento del difusor.

Este recubrimiento tiene como finalidad principal proteger el difusor frente a la corrosión, el desgaste y las altas temperaturas generadas durante el proceso de secado.

El recubrimiento está conformado por dos partes triangulares en la parte superior e inferior y dos partes rectangulares a los lados.

6. Pantalla HMI.

La función del HMI dentro del proceso del secado es dar a conocer al usuario mediante una pantalla los valores emitidos por los diferentes sensores tales como temperatura, masa, flujo de aire y dispositivos (ventilador, válvula proporcional). A través de esta interfaz, el operador puede monitorear en tiempo real los datos de las variables. Además, mediante la pantalla el usuario puede colocar la operación de la maquina en manual o automático.

7. Sensor de temperatura.

El sensor de temperatura RTD PT100 clase A, que permite monitorear la temperatura dentro de la cámara de secado. Además, estos sensores solo soportan temperaturas hasta los 200°C.

8. Cámara de secado rectangular.

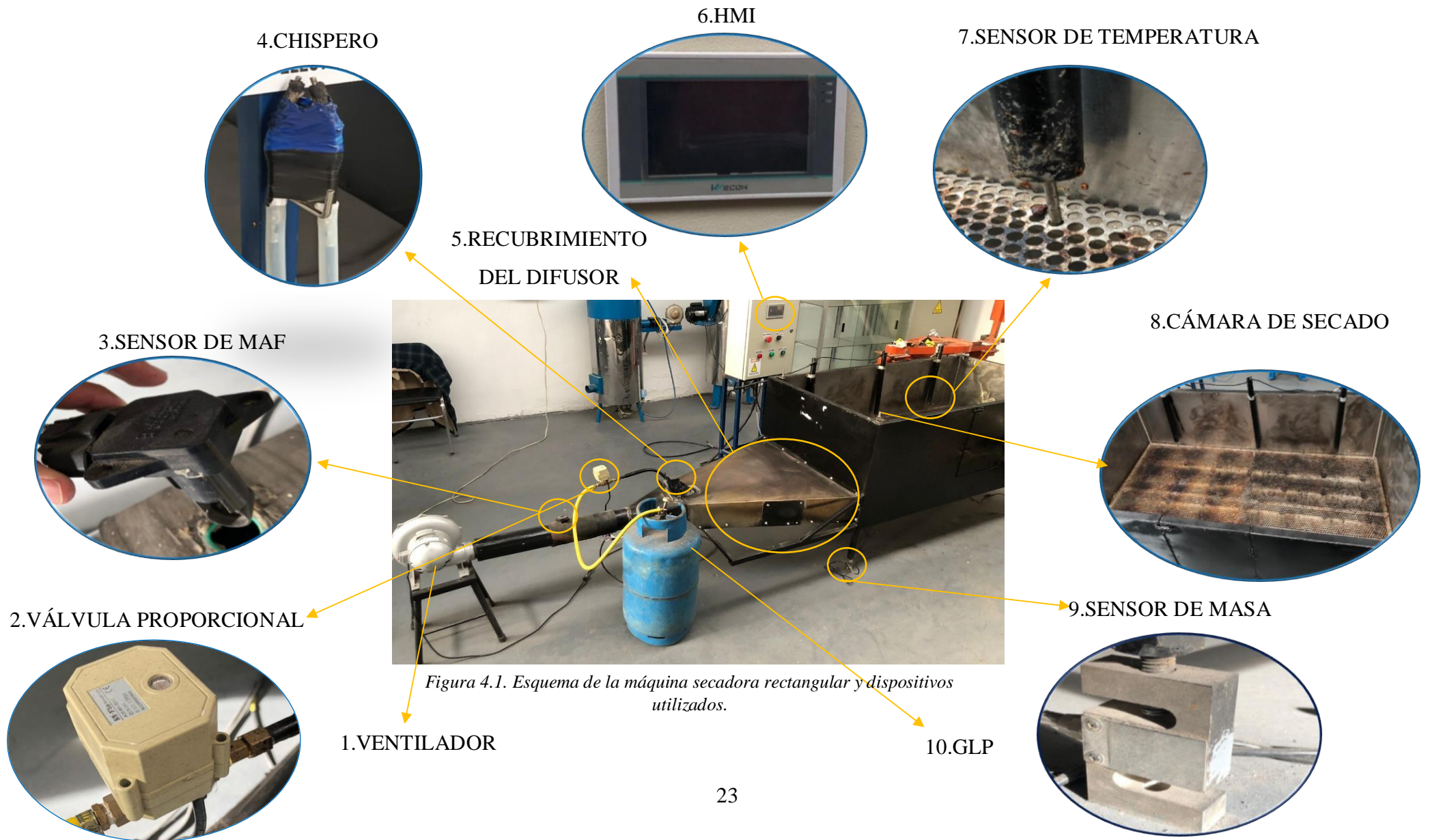
En la cámara de secado es donde se presencia todo el proceso principal del sistema, ya que es el espacio donde ocurre la transferencia de calor entre el aire caliente y el cacao, permitiendo que se lleve a cabo el proceso de secado.

9. Sensores de masa.

El sensor de masa permite monitorear en kg los cambios de masa del producto durante el proceso de secado, este sensor es muy útil para poder calcular la perdida de humedad.

10. GLP (Gas Licuado de Petróleo).

El GLP es una fuente de energía térmica que presenta ventajas entre ellas destacan su combustión relativamente limpia y facilidad de almacenamiento, durante el proceso de secado se libera energía en forma de calor la cual es transferida mediante la convección forzada al aire que circula dentro del sistema.



4.3.2 Descripción del diagrama PI&D del sistema de secado.

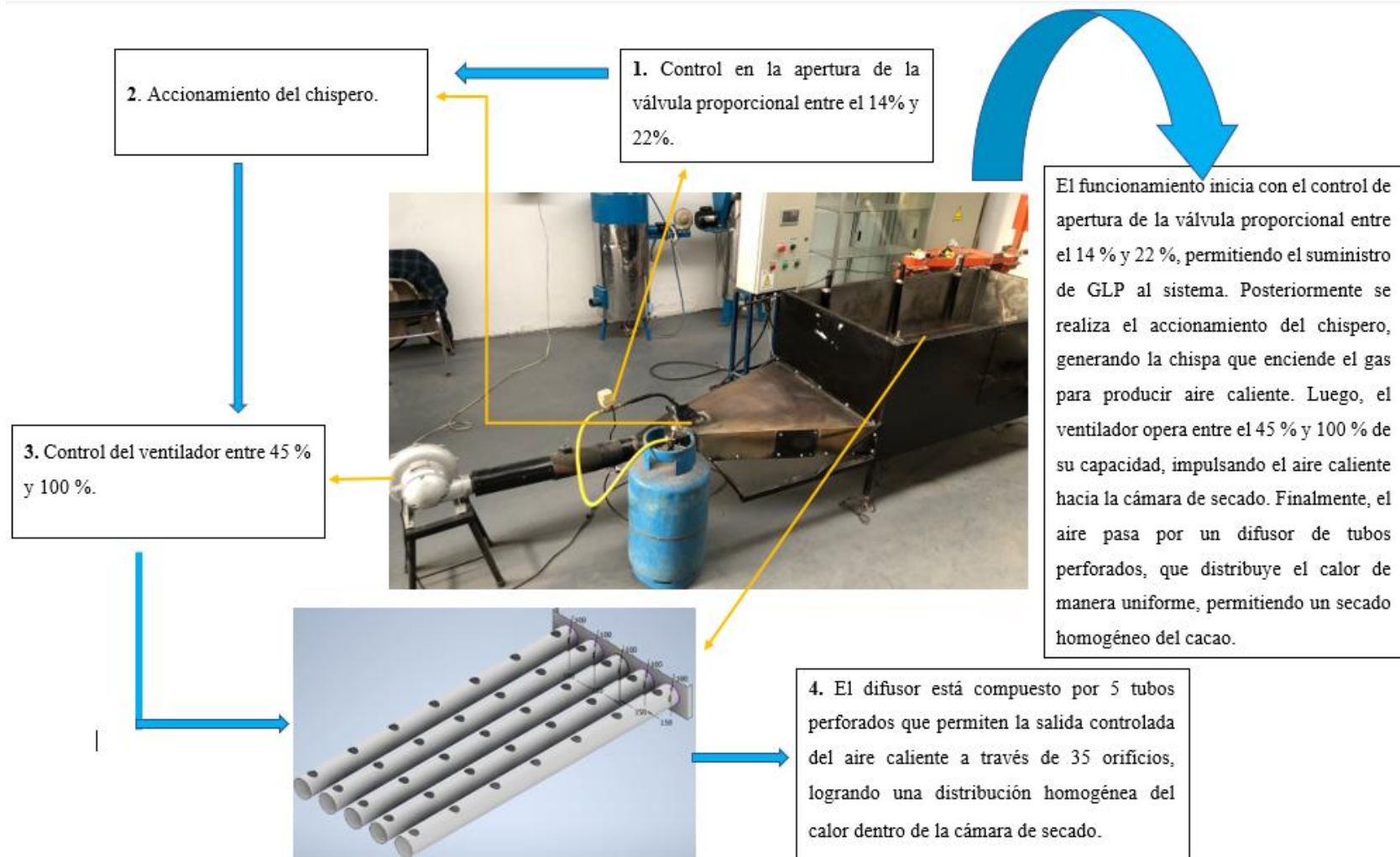


Figura 4.2. Descripción del diagrama PI&D del sistema de secado.

4.3.3 Relación de PI&D con las variables operativas del proceso.

SENSOR DE TEMPERATURA RTD PT100.

Los tres sensores monitorean la temperatura en ($^{\circ}\text{C}$) en tres puntos en la cámara de secado en la parte derecha.

VÁLVULA PROPORCIONAL

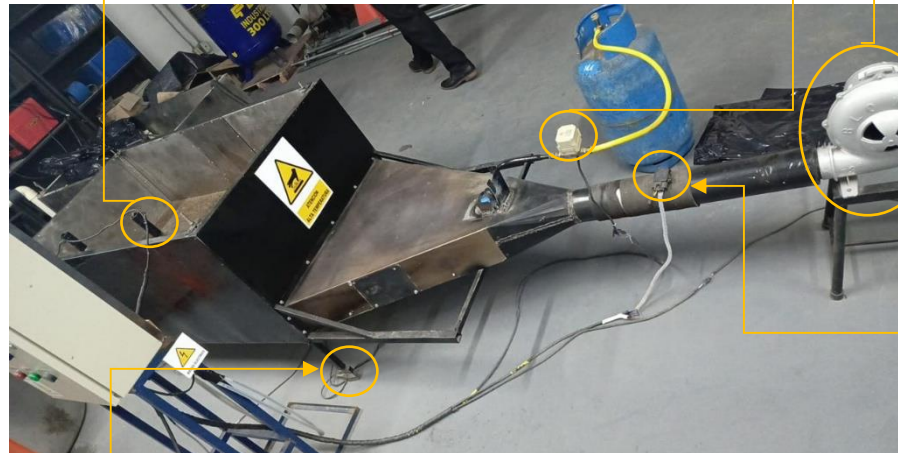
La válvula proporcional regula el paso de gas hacia el quemador permitiendo controlar de forma gradual el suministro de combustible dentro de un rango de apertura del 14% al 22%.

VENTILADOR:

Se controla mediante aperturas de 45% al 100% los cuales emite una velocidad de aire que transporta desde el inicio de la máquina por un tubo llegando al sensor MAF que existen variaciones de flujo de aire.

SENSOR DE MASA

Los 4 sensores de masa monitorean valores en (kg) ubicado al rededor de la cámara de secado rectangular los cuales permite verificar la reducción de peso en el transcurso del tiempo.



SENSOR MAF

Dispositivo encargado de medir el flujo de aire en m^3/s que circula por el ducto emitido por el ventilador son utilizados para el control y monitoreo de la variable de flujo. Los valores que emite el sensor MAF son de $0,0250 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,1012 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 4.3. Relación de PI&D con las variables operativas del proceso.

4.4 MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE.

4.4.1 Volumen del cacao.

Estima el volumen total del cacao a ocupar en la cámara de secado, cabe recalcar que la prueba se dio inicio con 17,10 kg de cacao fermentado.

$$V_c = \frac{m_c}{P_c} \quad (4.1)$$

Donde:

V_c : Volumen de cacao en la cámara de secado, [m^3].

P_c : Densidad de la semilla de cacao, [$\frac{kg}{m^3}$].

m_c : Masa total del grano en el contenedor, [kg].

4.4.2 Psicrometría de Latacunga.

En la figura 4.4, describe las condiciones psicrométricas locales de Latacunga tales como (temperatura, humedad relativa, punto de rocío) relevantes para el secado de cacao.

Psicrometría		
Datos		
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.
Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura:	20	°C
Temp. b. húmedo:	16.57803824706	°C
<input type="radio"/>		
Humedad relativa:	74.20	%
<input checked="" type="radio"/>		
Punto de rocío	15.30100919968	°C
<input type="radio"/>		
Altitud SNM	2850	m
<input type="button" value="Calcular"/>		
Resultados		
Presión Atmosférica	0.709325286937	bar
Pv sat	23.38797752964	mbar
Pv	17.35387932699	mbar
Humedad absoluta	0.015599073636	kg/kg
Entalpia	59.68667868438	kJ/kg
Volumen específico	1.214748896030	m3/kg

Figura 4.4. Software CartaPsy Cálculos de Psicrometría del aire en Latacunga [33].

Tabla 4.5. Propiedades Psicométricas del aire en Latacunga [33].

Detalle	Valor	Unidad
Temperatura	20	°C
Temp. B. húmedo	16,57	°C
Humedad relativa (HR)	74,2	%
Punto de rocío	15,3	°C
Altitud SNM	2850	m
RESULTADOS PSICROMÉTRICOS		
Detalle	Valor	Unidad
Presión atmosférica	70,93	kpa
Presión del vapor de saturación (Pv sat.)	2,81	kPa
Presión de vapor de agua (Pv)	2,08	kPa
Humedad absoluta (HA)	0,018	kg/kg
Entalpía (h)	71,02	kJ
Volumen específico (vesp)	1,23	m ³ /kg

4.4.3 Densidad de aire seco en el sitio de estudio.

Permite la obtención de la densidad real del aire, un valor esencial para determinar cuánta masa de aire ingresa al sistema; esto tiene un impacto en el transporte de humedad y de calor.

$$\rho_{sec} = \frac{1}{v_{esp}} \quad (4.2)$$

Donde:

ρ_{sec} : Densidad del aire de secado, [$\frac{Kg}{m^3}$].

v_{esp} : Volumen específico de aire en el sitio de estudio [$\frac{m^3}{kg}$].

4.4.4 Velocidad másica del aire de secado.

Este parámetro representa el volumen de aire seco que atraviesa el secado por unidad de área y tiempo, a mayor valor, el aire tiene una mayor capacidad para remover la humedad del cacao.

En este estudio la velocidad de aire, medida mediante un anemómetro, es de 2,24 m/s.

Donde:

$$G = 3600 \cdot v_s \cdot \rho_{sec} \quad (4.3)$$

G : Velocidad másica del aire, $[\frac{kg}{m^2 \cdot s}]$.

v_s : Velocidad de secado, $[\frac{m}{s}]$.

3600: Variable del tiempo, [s].

ρ_{sec} : Densidad del aire de secado, $[\frac{kg}{m^3}]$.

4.5 PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL PROCESO DE SECADO TRIANGULAR Y RECTANGULAR.

Para el desarrollo del cálculo, se realizó una medición con el anemómetro el recubrimiento del difusor, figura 4.5, asociando cada una sus partes las cuales eran piezas rectangular y triangular.

Los valores utilizados para los cálculos de pérdidas por convección en el recubrimiento del difusor, tomando en cuenta una temperatura ambiente de 20°C la viscosidad cinemática el número de Prandtl, Reynolds y la conductividad térmica, Anexo C, [34].



Figura 4.5. Velocidad del aire en el exterior del recubrimiento del difusor.

4.5.1 PERDIDA EN EL RECUBRIMIENTO DEL DIFUSOR PARTE TRIÁNGULO.

Número de Reynolds en el recubrimiento del difusor triangular.

Medición de la velocidad del aire exterior en el recubrimiento triangular del difusor utilizando un anemómetro como se visualiza en la figura 4.5 recolectando datos que permiten calcular el número de Reynolds y de esta manera se pueda analizar las pérdidas de energía que se producen cuando el aire circula por esta sección del sistema, además la longitud característica (dirección del flujo de aire) del triángulo es de 0,77m.

$$R1_e = \frac{V \cdot Lc}{v_c} \quad (4.4)$$

Donde:

$R1_e$:Número de Reynolds, [Adimensional].

V : Velocidad de aire del exterior, $\left[\frac{m}{s}\right]$.

Lc :Longitud característica en la dirección del flujo de aire, $[m]$.

v_c :Viscosidad cinemática, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

Número de Nusselt en el recubrimiento del difusor triangular.

Obteniendo el número Reynolds se procede a calcular el número de Nusselt el cual permite analizar la transferencia de calor entre una superficie y un fluido en movimiento.

$$N1_u = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.5)$$

Donde:

$N1_u$:Nusselt, [Adimensional].

$R1_e$:Número de Reynolds, [Adimensional].

Pr = Numero de Prandtl, [Adimensional].

Coefficiente de convección en el recubrimiento del difusor triangular.

Una vez determinado el número de Nusselt, se presenta la ecuación que permite indicar la eficiencia con la que el aire transfiere calor hacia la superficie del sistema.

$$h1_{conv} = \frac{Nu \cdot k}{Lc} \quad (4.6)$$

Donde:

$h1_{conv}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección, $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$.

Nu_u : Nusselt, [Adimensional].

k : Conductividad Térmica, $\left[\frac{W}{m.K}\right]$.

Lc : Longitud característica en la dirección del flujo de aire, [m].

Área del triángulo.

Los datos obtenidos para el área del triángulo la base es de 0,80 m y la altura es 0,77 m.

$$A_{triangulo} = \frac{b \cdot h}{2} \quad (4.7)$$

Donde:

$A_{triangulo}$: Área del triángulo, [m²].

b : Base del triángulo, [m].

h : Altura del triángulo, [m].

Pérdidas térmicas del recubrimiento del difusor parte triangular.

Las pérdidas térmicas en el recubrimiento de la parte triangular del difusor representan la energía que se disipa hacia el ambiente debido a la diferencia de temperatura entre la superficie del difusor y el aire exterior

$$Q1 = h1_{conv} \cdot A_{triangulo} \cdot (T_{si} - T_{\infty}) \quad (4.8)$$

Donde:

Q_1 : Tasa de transferencia de calor, $[W]$.

h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convección, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$.

T_{si} : Temperatura en la superficie del triángulo, $[W]$.

T_{∞} : Temperatura ambiente del triángulo, $[W]$.

$A_{triangulo}$: Área de transferencia de calor en el triángulo, $[m^2]$.

4.5.2 PERDIDA EN EL RECUBRIMIENTO DEL DIFUSOR PARTE DEL RECTÁNGULO.

Número de Reynolds en el recubrimiento del difusor rectangular.

La velocidad de aire medida con el anemómetro en la figura 4.5, se recolecto datos que permiten calcular el número de Reynolds los cuales nos ayudan a analizar las pérdidas de energía que se producen cuando el aire circula por esta sección del sistema, además la longitud característica del rectángulo es de 1,1 m.

$$R2_e = \frac{V \cdot Lc}{v_c} \quad (4.9)$$

Donde:

$R2_e$: Número de Reynolds, [Adimensional].

V : Velocidad de aire del exterior, $\left[\frac{m}{s}\right]$.

Lc : Longitud característica en la dirección del flujo de aire, $[m]$.

v_c : Viscosidad cinemática, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

Número de Nusselt en el recubrimiento del difusor rectangular.

$$N2_u = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.10)$$

Donde:

Nu = Nusselt, [Adimensional].

Re : Número de Reynolds, [Adimensional].

Pr = Numero de Prandtl, [Adimensional].

Coefficiente de convección en el recubrimiento del difusor rectangular.

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot k}{Lc} \quad (4.11)$$

Donde:

h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convección, $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$.

Nu = Nusselt, [Adimensional].

k : Conductividad Térmica, $\left[\frac{W}{m.K}\right]$.

Lc : Longitud característica en la dirección del flujo de aire, [m].

Área del rectángulo.

Los datos obtenidos para el área del rectángulo la base es de 0,15 m y la altura es 1,11 m.

$$A_{rectangulo} = b \cdot h \quad (4.12)$$

Donde:

$A_{triangulo}$: Área del triángulo, [m²].

b : Base del triángulo, [m].

h : Altura del triángulo, [m].

Pérdidas térmicas recubrimiento del difusor rectangular.

$$Q_1 = h_{2_{conv}} \cdot A_{rectangular} \cdot (T_{si} - T_{\infty}) \quad (4.13)$$

Donde:

Q_1 : Tasa de transferencia de calor, [W].

$h_{2_{conv}}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección, $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$.

T_{si} : Temperatura en la superficie del rectángulo, [W].

T_{∞} : Temperatura ambiente del rectángulo, [W].

$A_{rectangular}$: Área de transferencia de calor en el rectángulo, [m²].

4.5.3 Pérdidas térmicas totales en el recubrimiento del difusor triangular y rectangular.

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 \quad (4.14)$$

Donde:

Q_1 : Tasa de transferencia de calor en el triángulo, [W].

Q_2 : Tasa de transferencia de calor en el rectángulo, [W].

4.6 DETERMINAR CONTENIDO DE HUMEDAD Y CONSUMO DE GLP.

4.6.1 Humedad inicial del cacao CCN-51.

Los datos obtenidos en las pruebas experimentales con el cacao CCN-51 se pudo obtener los siguientes valores.

Masa inicial: 17.10 kg

Masa final: 6.54 kg

Tiempo = 8 horas

Humedad medida por el higrómetro (Hf)= 7%

Contenido de humedad inicial.

$$Hi = \frac{mi - mf}{mi} \times 100\% \quad (4.15)$$

Donde:

H_i : Humedad Inicial, [%].

m_i : Masa inicial, [kg].

m_f : Masa final, [kg].

Reducción de humedad durante el secado.

$$\Delta H = H_i - H_f \quad (4.16)$$

Donde:

ΔH : Reducción de humedad, [%].

H_i : Humedad Inicial, [%].

H_f : Humedad final, [%].

Masa de agua eliminada del cacao.

$$m_{agua} = m_i - m_f \quad (4.17)$$

Donde:

m_{agua} : Masa de agua eliminada del cacao, [kg].

m_i : Masa inicial, [kg].

m_f : Masa final, [kg].

Tasa de evaporación de humedad del cacao.

$$\dot{m}_{agua} = \frac{m_{agua}}{t} \quad (4.18)$$

Donde:

\dot{m}_{agua} : Tasa de evaporación de humedad del cacao, [kg].

m_{agua} : Massa de agua eliminada del cacao, [kg].

t : Tiempo de operación, [h].

4.6.2 Consumo de GLP en tiempo de operación de secado del cacao CCN-51.

Con la prueba experimental del cacao CCN-51 se obtuvo los siguientes valores en cuanto al consumo de GLP.

Masa inicial GLP: 24,5 kg

Masa final GLP: 18,80 kg

Tiempo= 8 h

El PCI es la cantidad de energía térmica útil, para el GLP (mezcla de propano–butano)

= 46 000 kJ/kg

1 kW=3600 kJ/h

Consumo total de GLP

$$m_{GLP} = m_{iGLP} - m_{fGLP} \quad (4.19)$$

Donde:

m_{GLP} : Consumo total de GLP, [kg].

m_{iGLP} : Masa de GLP inicial, [kg].

m_{fGLP} : Masa de GLP final, [kg].

Consumo másico de GLP.

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{m_{GLP}}{t} \quad (4.20)$$

Donde:

\dot{m}_{GLP} : Consumo másico de GLP, [kg].

m_{GLP} : Consumo total de GLP, [kg].

t : Tiempo de operación, [h].

Energía suministrada por el GLP.

$$Q_{GLP} = m_{GLP} \times PCI \quad (4.21)$$

Donde:

Q_{GLP} : Energía suministrada por el GLP, [kJ].

m_{GLP} : Consumo total de GLP, [kg].

PCI : Cantidad de energía térmica útil, $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$.

Potencia térmica suministrada kJ/h.

$$\dot{Q}1 = \frac{Q_{GLP}}{t} \quad (4.22)$$

Donde:

$\dot{Q}1$: Potencia térmica suministrada, $\left[\frac{kJ}{h}\right]$.

Q_{GLP} : Energía suministrada por el GLP, [kJ].

t : Tiempo de operación, [h].

4.6.3 Potencia Térmica suministrada kW

$$\dot{Q}2 = \frac{\dot{Q}1}{3600} \quad (4.23)$$

Donde:

$\dot{Q}2$: Potencia térmica suministrada, $[kW]$.

$\dot{Q}1$: Potencia térmica suministrada, $[\frac{kJ}{h}]$.

Consumo energético por agua evaporada.

$$C_{energético} = \frac{QGLP}{m_{agua}} \quad (4.24)$$

Donde:

$C_{energético}$: Consumo energético por agua evaporada, $[\frac{kJ}{kg}]$.

$QGLP$: Energía suministrada por el GLP, $[kJ]$.

m_{agua} : Massa de agua eliminada del cacao, $[kg]$.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Tener en cuenta los parámetros a desempeñar en el experimento de la secadora rectangular de cacao, en referencia a la norma INEN-NTE 176, para obtener los parámetros necesarios, Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Criterios técnicos para el secado de cacao [3].

Parámetros	Cantidad	Disposición
Masa a secar	17,10 kg	Cantidad mínima requerida.
Humedad final del cacao CCN-51	7%±1	Según la norma técnica INEN- NTE 176
Temperatura de secado	60-70 °C	Según la norma técnica INEN- NTE 176
Tiempo de secado	8 h	Acorde a la materia prima.

5.1 Cálculos en relación con la medición de flujo de aire.

Los cálculos relacionados con la medición de flujo de aire ayudan a entender cómo se comporta el aire dentro de la cámara de secado y evaluar su influencia directa en la transferencia de calor por convección durante el proceso de secado de cacao CCN-51.

El volumen del cacao se calcula con la masa a secar y densidad aparente, lo que permite conocer la cantidad de producto que se encuentra con el flujo de aire caliente y definir las condiciones del proceso.

Tabla 5.2. Cálculos en relación con la medición de flujo.

Nº-Ecuación	Parámetro a calcular	Resultado
(4.1)	Volumen de cacao.	$V_c = 0,033m^3$
(4.2)	Densidad de aire seco en el sitio de estudio.	$\rho_{sec} = 0,81 \frac{kg}{m^3}$
(4.3)	Velocidad másica del aire de secado.	$G = 6531,84 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$

5.2 Cálculos de pérdidas en el proceso de secado en el recubrimiento del difusor triangular y rectangular.

5.2.1 Recubrimiento del difusor parte triangular.

En las paredes triangulares, el aire caliente circula principalmente en dirección horizontal, provocando pérdidas térmicas por acumulación de calor en la zona superior del recubrimiento, provocando su disipación y reduciendo la energía útil que llega a la cámara de secado.

Tabla 5.3. Cálculos de pérdidas térmicas del proceso de secado de cacao CCN-51 en el recubrimiento del difusor triangular.

°N-Ecuación	Parámetro a calcular	Resultado
(4.4)	Número de Reynolds en el recubrimiento del difusor triangular.	$Re = 24687,863$
(4.5)	Número de Nusselt en el recubrimiento del difusor triangular.	$Nu = 2013,086$
(4.6)	Coefficiente de convección en el recubrimiento del difusor triangular.	$h_{conv} = 65,726 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
(4.7)	Área del triángulo	$A_{triangulo} = 0,308m^2$
(4.8)	Pérdidas térmicas en el recubrimiento del difusor triangular.	$Q = 3,704kW$

La figura 5.1 muestra un perfil térmico con pérdidas concentradas en la zona central (P3), donde la temperatura máxima es aproximadamente 232.0 °C, indicando un punto crítico de alta pérdida térmica. Las demás áreas (P1, P2, P4, P5, P6) presentan temperaturas significativamente menores, lo que sugiere que las pérdidas se concentran principalmente en esa región puntual del recubrimiento del difusor triangular.

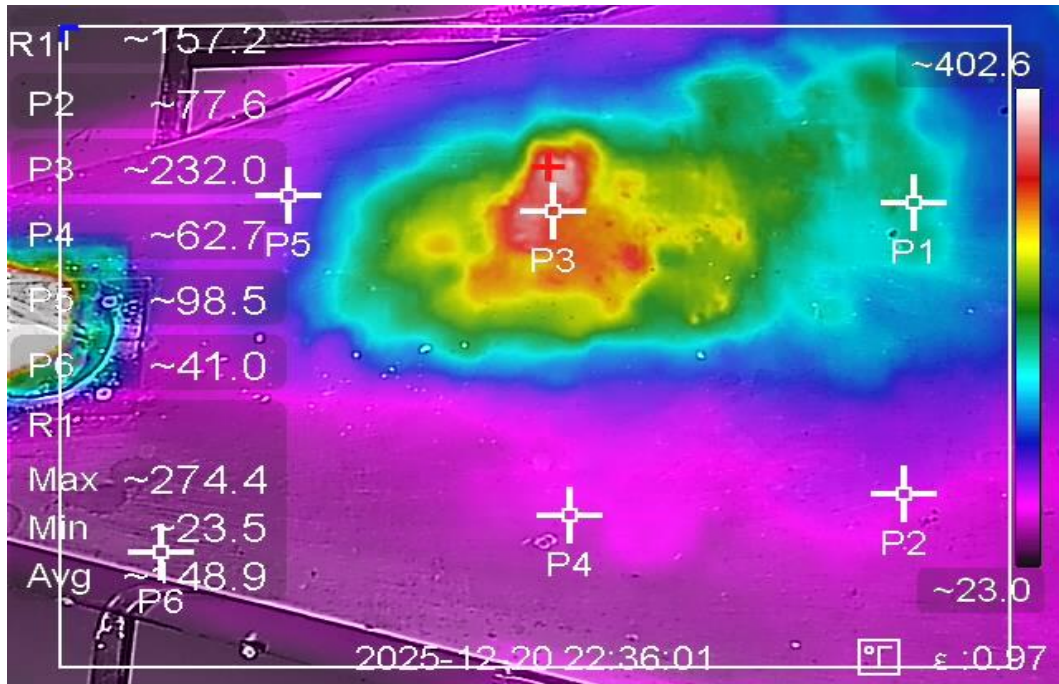


Figura 5.1. Perfil térmico del recubrimiento del difusor triangular.

5.2.2 Recubrimiento del difusor parte rectangular.

En las paredes rectangulares se presenta pérdidas térmicas debido al rozamiento con las paredes y cambios de dirección del flujo. La diferencia de temperatura entre el aire transportado y el ambiente exterior provoca un flujo de calor continuo a través del material del recubrimiento, reduciendo la energía térmica disponible para el proceso de secado.

Tabla 5.4. Cálculos de pérdidas térmicas del proceso de secado de cacao CCN-51 en el recubrimiento del difusor rectangular.

°N-Ecuación	Parámetro a calcular	Resultado
(4.9)	Número de Reynolds en el recubrimiento del difusor rectangular.	$Re = 35877,308$
(4.10)	Número de Nusselt en el recubrimiento del difusor rectangular.	$Nu = 2901,981$
(4.11)	Coefficiente de convección en el recubrimiento del difusor rectangular.	$h_{conv} = 65,726 \left[\frac{W}{m^2.K} \right]$
(4.12)	Área de rectángulo.	$A_{rectángulo} : 0,166m^2$
(4.13)	Pérdidas térmicas en el recubrimiento del difusor rectangular.	$Q = 1,234kW$
(4.14)	Pérdidas térmicas totales en el recubrimiento del difusor rectangular.	$Q = 4,938kW$

En la figura 5.2 se puede visualizar un perfil térmico con pérdidas concentradas en el punto P3, donde la temperatura máxima es aproximadamente 133.8 °C, indicando un foco principal de pérdida térmica en el recubrimiento del difusor rectangular. Las demás áreas presentan temperaturas menores, reflejando pérdidas térmicas reducidas.



Figura 5.2. Perfil térmico del recubrimiento del difusor rectangular.

5.3 CÁLCULO PARA DETERMINAR CONTENIDO DE HUMEDAD Y CONSUMO DE GLP.

5.3.1 Humedad inicial del cacao CCN-51.

En la Tabla 5.5 se presentan los cálculos realizados para determinar el contenido de humedad inicial del cacao CCN-51, así como los parámetros relacionados con la reducción de humedad durante el proceso de secado.

Tabla 5.5. Cálculo para el contenido de humedad inicial.

°N-Ecuación	Parámetro a calcular	Resultado
(4.15)	Contenido de humedad inicial del cacao CCN-51	$H_i = 61,75\%$
(4.16)	Reducción de humedad durante el secado.	$\Delta H = 54,75\%$
(4.17)	Masa de agua eliminada del cacao.	$m_{agua} = 10,56 \text{ kg}$
(4.18)	Tasa de evaporación de humedad.	$\dot{m}_{agua} = 1,32 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$

5.3.2 Consumo de GLP en tiempo de operación de secado del cacao CCN-51.

A continuación, en la Tabla 5.6 se detallan los cálculos realizados para determinar el consumo de GLP (Gas Licuado de Petróleo).

Tabla 5.6. Cálculo para el consumo de GLP.

°N-Ecuación	Parámetro a calcular	Resultado
(4.19)	Consumo total de GLP.	$m_{GLP} = 5,70 \text{ kg}$
(4.20)	Consumo másico de GLP.	$\dot{m}_{GLP} = 0,71 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
(4.21)	Energía suministrada por el GLP.	$Q_{GLP} = 262200 \text{ kJ}$
(4.22)	Potencia Térmica suministrada kJ/h.	$\dot{Q} = 32775 \text{ kJ/h}$
(4.23)	Potencia Térmica suministrada kW.	$\dot{Q} = 9,1 \text{ kW}$
(4.24)	Consumo energético por agua evaporada.	$C_{energético} = 24830 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

5.4 Resultados experimentales de la distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso de difusor.

Para realizar las pruebas experimentales, se utilizó la cámara de secado sin el uso de los distribuidores de flujo de aire tal como se puede visualizar en la figura 5.3 los experimentos se efectuaron considerando las variables fundamentales del proceso de secado.



Figura 5.3. Cámara de secado sin el uso del difusor.

- Apertura de la válvula proporcional (%). Se controló mediante cinco niveles de apertura de la válvula proporcional como se puede visualizar en la Tabla 5.7: 14%, 16%, 18%, 20% y 22%. Cada porcentaje de apertura libera mayor cantidad de combustible en un tiempo de 1 min lo que influye durante el proceso de secado.

Los niveles de apertura de la válvula proporcional fueron seleccionados considerando el incremento de la temperatura necesarias para mantener condiciones necesarias para proceso de secado del cacao. A medida que se aumenta la apertura de la válvula incrementa el suministro de combustible genera una mayor producción de energía térmica, la válvula proporcional permite rango de operación de 0% al 100% en valores enteros, para nuestro estudio según los análisis preliminares realizados llevamos a cabo con niveles del 14% al 22% ya que valores inferiores al 14% no genera una llama con la suficiente intensidad para producir el calor requerido 22% provoca un incremento de temperatura excesivo, generando condiciones de sobrecalentamiento que impide realizar las pruebas experimentales.

Tabla 5.7. Relación apertura de la válvula proporcional y emisión de combustible

Válvula Proporcional (%)	Consumo de combustible (kg/min)
14	0,02
16	0,025
18	0,03
20	0,055
22	0,08

- Flujo de aire (m^3/s). La Tabla 5.8, da conocer el control mediante seis niveles de apertura del ventilador: 45%, 55%, 65%, 75% 85% y 100%. Cada porcentaje de apertura del ventilador genera un flujo de aire diferente con el fin de trasportar el aire caliente a si a la cámara de secado.

Los niveles de flujo se seleccionaron teniendo en cuenta la velocidad del aire para el proceso de transferencia de calor por convección forzada. De acuerdo a los análisis realizados a medida que se incrementa la apertura del ventilador existe mayor flujo de aire que beneficia el transporte de aire caliente a la cámara de secado.

El ventilador permite rangos de operación de 0% a 100% en valores enteros. Para nuestro estudio se llevó a cabo con niveles de 45% a 100%, ya que valores inferiores al 45% no genera flujo de aire que llegue a suministrar en la cámara de secado provocando que la llama se concentre en el quemador, que impide realizar las pruebas experimentales.

Tabla 5.8. Flujo de aire en función del porcentaje del ventilador

Ventilador (%)	Flujo de aire (m^3/s)
45	0,025
55	0,094
65	0,1001
75	0,1007
85	0,1008
100	0,1012

Con las variables anteriores, se registraron los valores de temperatura en la cámara de secado y el tiempo de estabilización, donde se estabilizan los valores de temperatura. Se utilizó un diseño de experimentos multifactorial, el total de experimentos es de 30, para cada uno de los niveles se realizaron tres réplicas.

Los ensayos realizados permitieron observar la distribución de temperatura en el interior de la cámara de secado sin el uso de difusor. Se detectaron variaciones de temperatura entre diferentes áreas de la cámara durante las pruebas, lo que señala una transferencia de calor no uniforme. Estas fluctuaciones de temperatura se vuelven más notorias en condiciones de baja circulación de aire, donde la convección es restringida, y pueden afectar la homogeneidad del secado de los granos de cacao.

Las observaciones de la distribución de temperatura en la cámara de secado se obtuvieron mediante el instrumento de medición denominado cámara termográfica como se presenta en el Anexo D.

5.4.1 Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, sin el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 18 % y apertura del ventilador del 45%.

Al realizar el ensayo experimental, el primer sensor de la cámara de secado se encuentra ubicado cerca del origen de la fuente de calor, por esta razón, se registra un aumento excesivo de temperatura que alcanza los (149,99 °C) tal como se puede visualizar en la figura 5.4, este valor resulta considerablemente elevado en comparación con el rango de temperatura requerido para el sistema de secado adecuado del cacao, el cual se sitúa entre (60°C) y (70°C).

Además, dentro de la cámara de secado en, 3 min de operación, el sensor 2 y 3, como se evidencia en Anexo F, se reflejan datos de temperatura bajos entre (30°C) y (48 °C). Esto sucede porque la velocidad de aire que emite el ventilador es insuficiente para transportar el aire caliente a mayor distancia.

Estos parámetros aplicados en las variables impactan negativamente en la calidad del secado de cacao debido a que existe una transferencia de calor no uniforme en la cámara.

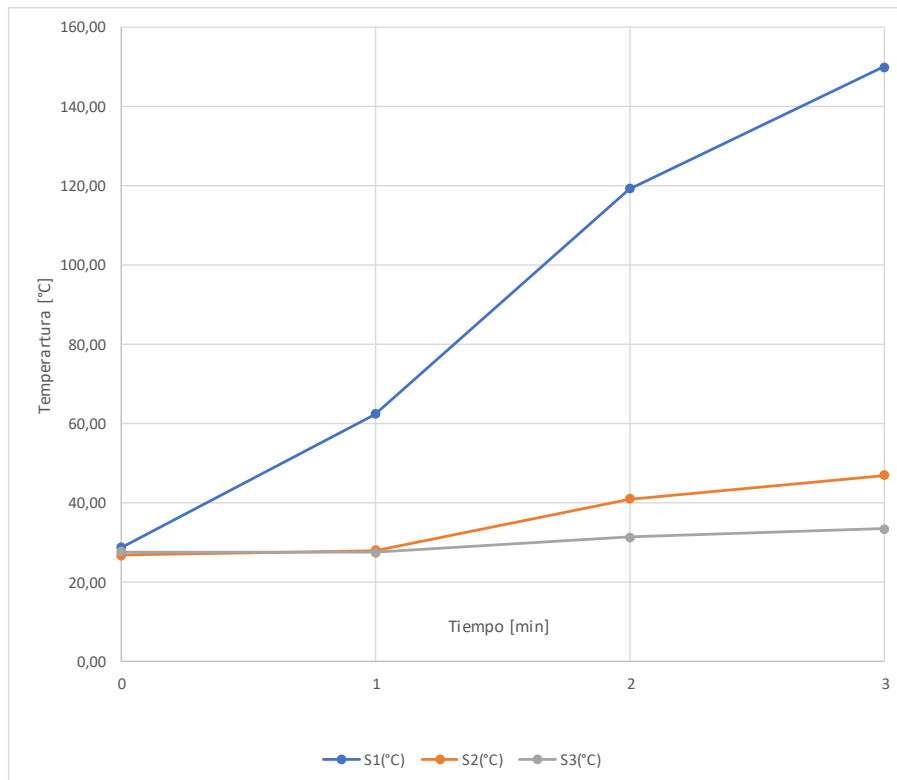


Figura 5.4. Comportamiento de temperatura en función al tiempo sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18 % y el ventilador al 45%.

La imagen captada por la cámara termográfica muestra un perfil térmico del sistema, en el cual el punto de medición P2 refleja una temperatura elevada de (115°C). Además, la cruz roja que corresponde a un punto de medición, como se visualiza en la figura 5.5, representa el punto de mayor concentración térmica dentro del sistema, alcanzando una temperatura máxima de (191°C). Por otro lado, los puntos de medición P3, P4, P5 y P6 corresponden a zonas con temperaturas más bajas, consideradas como puntos fríos dentro de la cámara de secado.

Esta diferencia térmica limita la eficiencia del proceso, ya que algunas zonas reciben un calor excesivo, mientras que otras no alcanzan la temperatura necesaria para una evaporación uniforme de humedad.

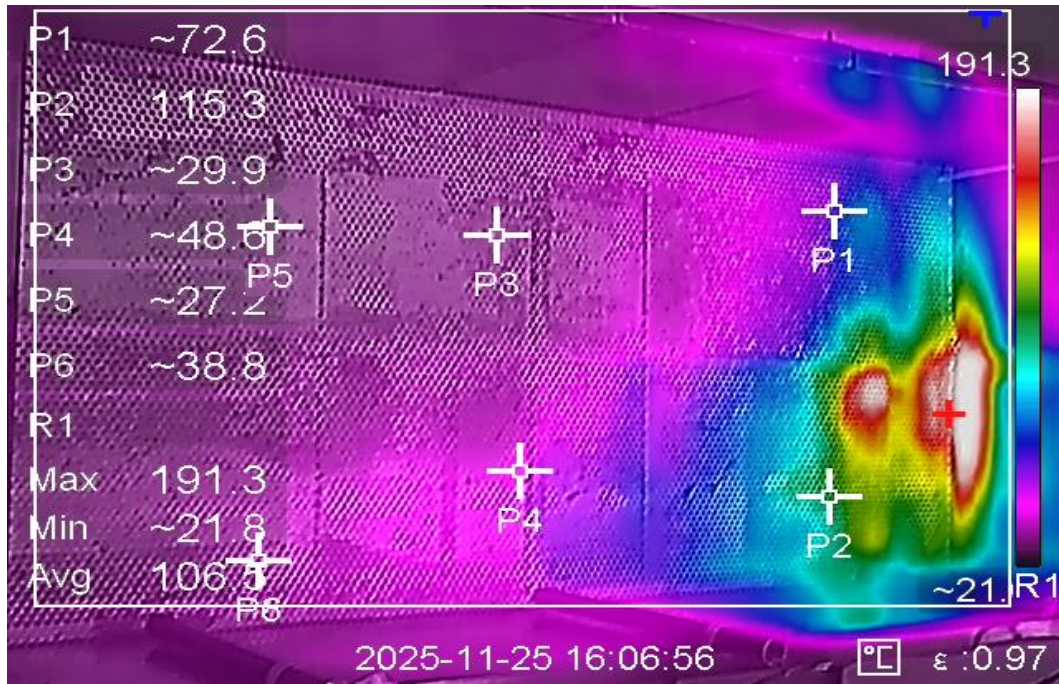


Figura 5.5. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso del difusor, con porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 45%.

5.4.2 Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, sin el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 18 % y apertura del ventilador del 75%.

En el ensayo experimental se revela que el sensor 1 detecta una temperatura más baja, lo cual está directamente relacionado con la mayor velocidad del aire emitido por el ventilador, creando un efecto de enfriamiento por convección forzada.

Por otro lado, los sensores 2 y 3, como se observa en el Anexo G, reflejan valores de temperatura de (60°C) a (65 °C), lo que indica una mayor acumulación de energía térmica en estas zonas. Además, se ha observado que el sistema después de, 17 minutos de operación proporciona un estado de estabilidad térmica como se muestra en los resultados obtenidos en la, figura 5.6. Sin embargo, el flujo de aire caliente tiende a concentrarse principalmente en la parte posterior de la cámara de secado. Según los parámetros asignados a las variables de operación, no se logra una transferencia de calor uniforme en toda la cámara, lo que limita un secado adecuado del cacao.

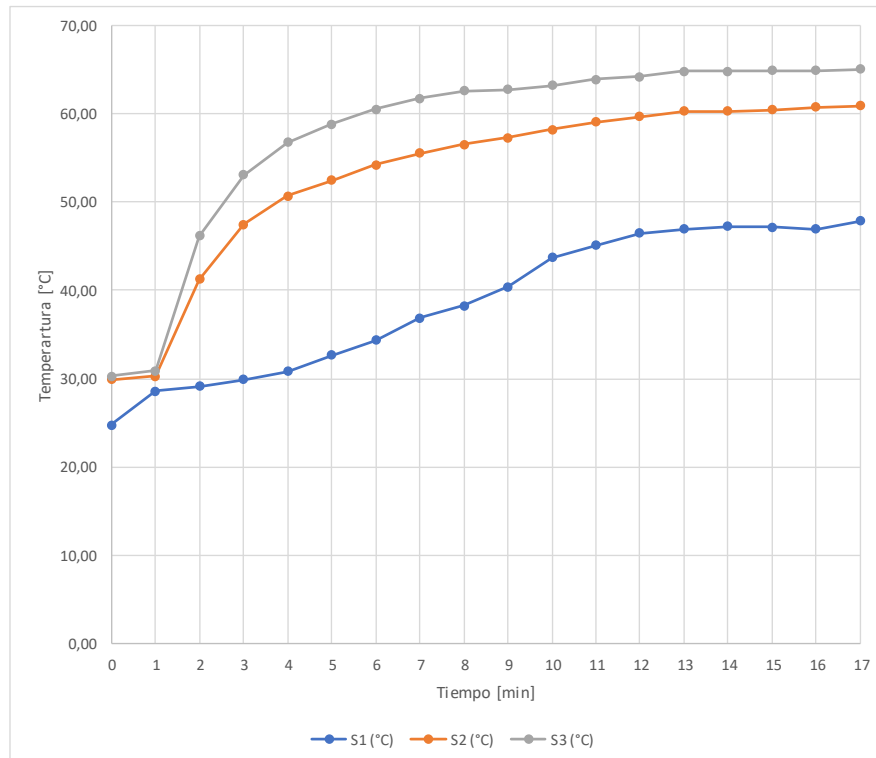


Figura 5.6. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18 % y el ventilador al 75%.

El perfil térmico captado por la cámara termográfica, como se puede visualizar en la figura 5.7, muestra una elevada zona de calor en los puntos de medición P1 de (88 °C) y P2 de (73 °C). Además, se observa mayor calor alrededor de la cámara y zonas frías en el centro, se registra una distribución no uniforme de calor, los puntos (P3, P4, P5) muestran temperaturas de (57°C) a (65°C), mientras que el P6 excede el límite de temperatura cercano al P2.

En conjunto, estos resultados permiten evidenciar la presencia de gradientes térmicos dentro de la cámara de secado, lo cual influye directamente en la uniformidad del proceso de secado del cacao. La identificación de estas variaciones térmicas resulta relevante para el análisis del comportamiento del sistema, ya que permite reconocer las zonas con mayor acumulación de calor y aquellas donde la transferencia térmica es menor.

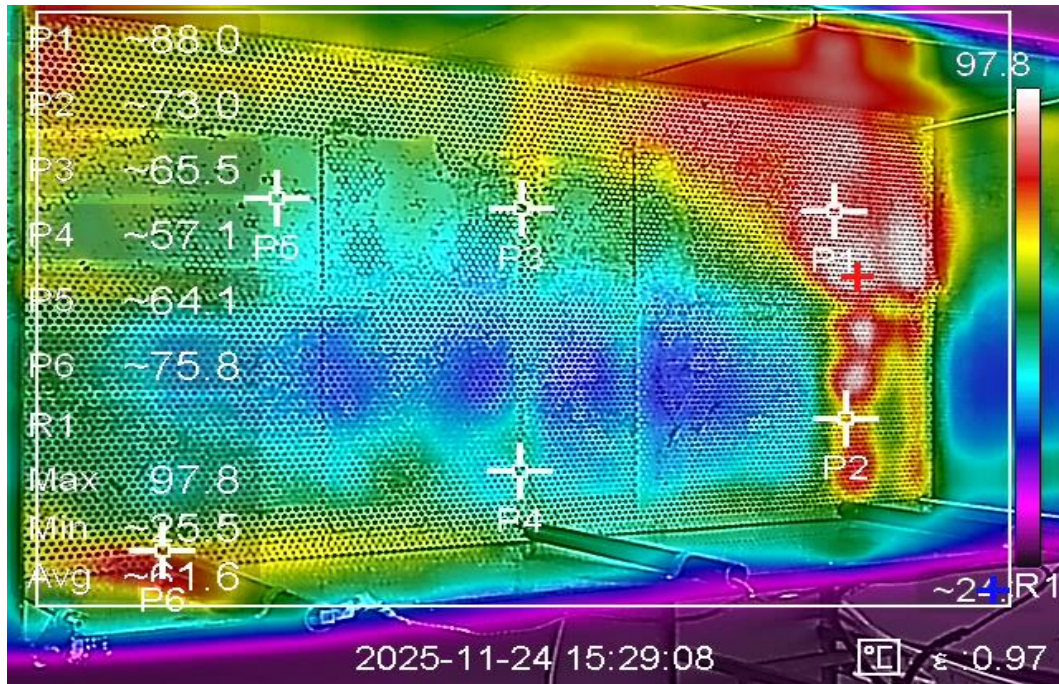


Figura 5.7. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 75%.

5.4.3 Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, sin el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 22 % y apertura del ventilador del 100%.

Durante el análisis experimental se observa un incremento considerable de temperatura en los sensores 1, 2 y 3, como se puede visualizar en el Anexo H. Además, en un tiempo de 18 min el sistema no logra estabilizarse, puesto que la temperatura en la cámara de secado aumenta excesivamente alcanzando valores mayores a (100°C) tal como se aprecia en la figura 5.8, en consecuencia, existe un alto riesgo de sobrecalentamiento, lo que podría dañar el grano o incluso quemar el cacao, afectando así su calidad final. Se puede determinar que a mayor apertura de la válvula proporcional existe un exceso de calor lo cual conlleva a un exceso de temperatura.

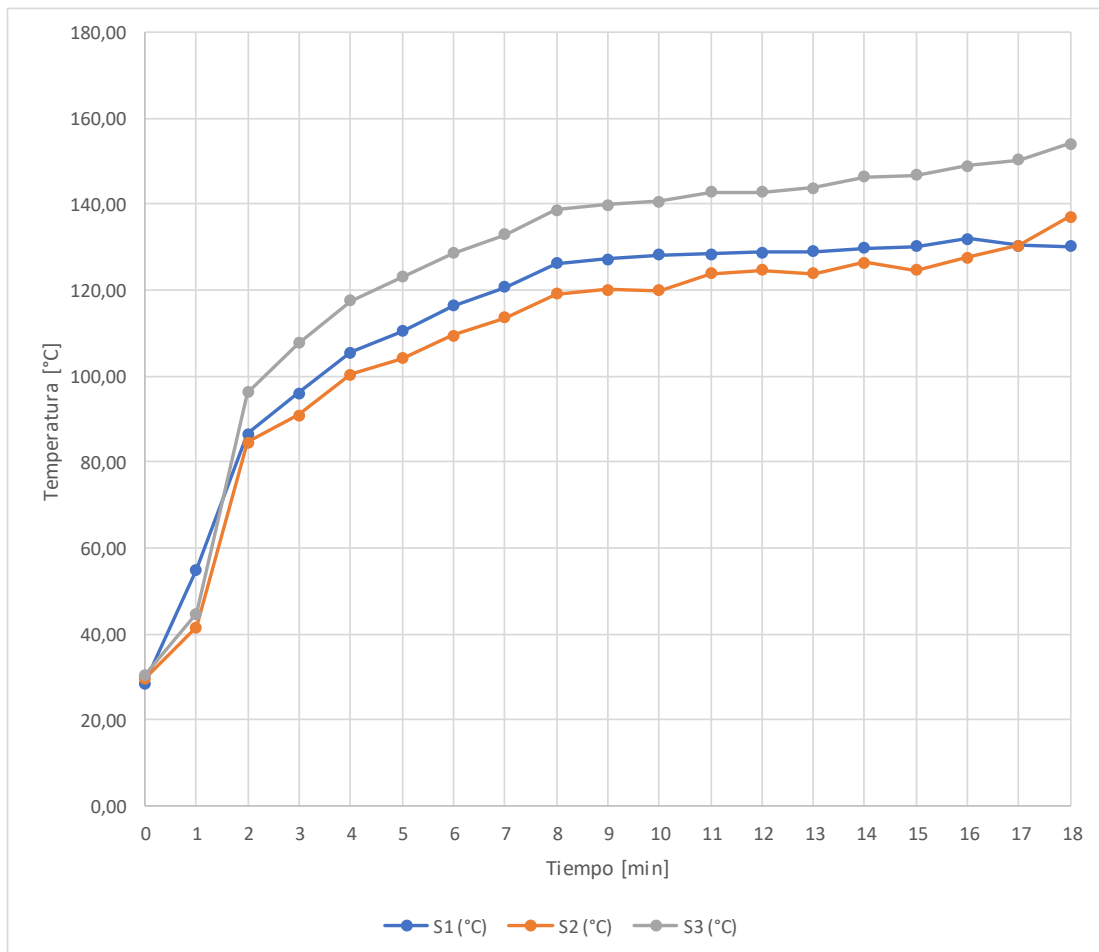


Figura 5.8. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo sin el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22 % y el ventilador al 100%.

En la figura 5.9, se visualiza un perfil térmico en el que el punto de medición P1 refleja una temperatura de (92°C) este valor evidencia una concentración elevada de calor. Además, en las partes delantera, posterior y laterales de la cámara identifica temperaturas de calor elevadas, mientras que en los puntos de medición P2 de (66.9 °C) y P4 de (65°C) se observa zonas con menor presencia de calor o también denominadas zonas frías, no existe un flujo de aire homogéneo en la cámara de secado. Los puntos (P3, P5, P6) superan el rango térmico óptimo para un adecuado secado, los valores de temperatura recomendados deben ser menores o igual a 70°C.

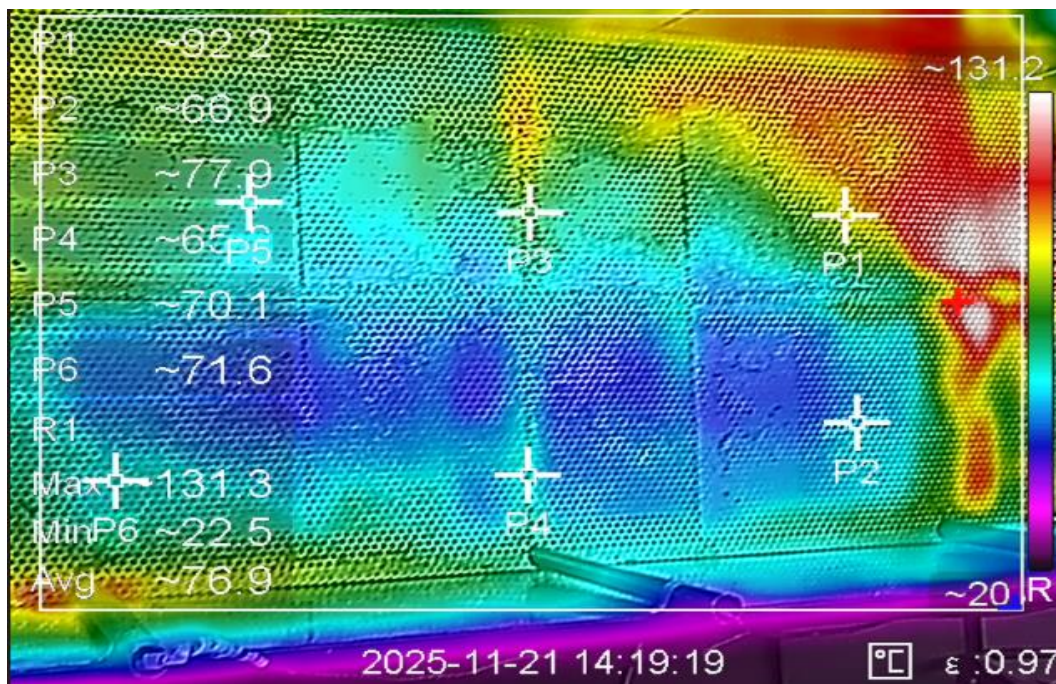


Figura 5.9. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado sin el uso del difusor, con porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22% y el ventilador al 100%.

5.4.4 Energía suministrada por el GLP sin el uso del difusor.

La tabla 5.9 presenta una apertura de la válvula proporcional del 14% la cual registra una emisión de 0,02 kg/min, durante 3 minutos de operación se produce un consumo de 0,06 kg de GLP. Además, existe una apertura del 18 % durante 17 minutos generado un consumo total de 0,51 kg de GLP. Finalmente, con una apertura de 22%, la emisión alcanza 0,08 kg/min durante 18 minutos obteniendo 1,44 kg de GLP.

Tabla 5.9. Consumo total del GLP durante el tiempo de operación

Válvula (%)	Proporcional	Emisión (kg/min)	combustible	Tiempo (min)	Operación	Total, de suministrado (kg)	GLP
14		0,02		3		0,06	
18		0,03		17		0,51	
22		0,08		18		1,44	

De acuerdo con los datos de la tabla 5.10, al 14 % de la válvula proporcional, el sistema registra un consumo de GLP de 0,06 kg generando una energía térmica suministrada de 2760 kJ, cuando la apertura de la válvula se incrementa al 18 % se aumenta el consumo de combustible a 0,51 kg de GLP lo que produce una energía de 23460 kJ, por último, en la condición de 22 % de apertura, el sistema alcanza un mayor consumo de energía térmica de 66240 kJ.

Tabla 5.10. Energía suministrada por el GLP en función de la apertura de la válvula proporcional.

Válvula proporcional (%)	Total, de GLP suministrado (kg)	Energía suministrada(kJ)
14	0,06	2760
18	0,51	23460
22	1,44	66240

5.5 Resultados experimentales de la distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor.

Para las pruebas experimentales, se empleó la cámara de secado equipada con difusores de flujo de aire, cuya configuración se detalla en la figura 5.10. Los experimentos se llevaron a cabo sin carga, considerando las variables fundamentales que rigen el proceso de secado, en particular se prestó atención a la temperatura, flujo de aire, ya que estas variables ejercen una influencia significativa en la eficiencia y la uniformidad del secado. La disposición de los difusores fue cuidadosamente diseñada para optimizar la distribución del flujo de aire dentro de la cámara, buscando así minimizar las zonas de acumulación y asegurar una transferencia de calor más homogénea.

- Apertura de la válvula proporcional (%). Se controló mediante cinco niveles de apertura de la válvula proporcional, como se puede visualizar en la tabla 7.7: 14%, 16%, 18% ,20% y 22%. Los niveles de apertura se seleccionaron considerando el incremento de la temperatura para valores adecuados en el proceso de secado de materiales
- Flujo de aire (m³/s). La tabla 5.8, da conocer el control mediante seis niveles de apertura del ventilador: 45%, 55%, 65%, 75% 85% y 100%. Los niveles de flujo se seleccionaron teniendo en cuenta la velocidad del aire para el proceso de transferencia de calor por convección forzada.

Se llevaron a cabo 30 experimentos en total, con un diseño multifactorial, y para cada nivel se realizaron tres réplicas. Los ensayos permitieron examinar la distribución de temperatura dentro de la cámara de secado mediante el empleo de difusores. Se observó que, en comparación con los ensayos sin difusores, la temperatura se distribuía de manera más uniforme, lo que indica una transferencia de calor más equilibrada.



Figura 5.10. Cámara de secado con el uso del difusor.

En las pruebas con difusores, como se visualiza en la figura 5.11, con la ayuda del anemómetro se registran las velocidades de aire que circulan por los cinco tubos del difusor, estas mediciones permiten analizar la distribución del flujo de aire.

Se observa que la velocidad de aire que circula por el quinto tubo del difusor es baja de, 1.17 m/s por esta razón la transferencia de calor en el quinto tubo del difusor es menor en comparación con los demás, por consiguiente, en la cámara termográfica no se evidencia una concentración significativa de calor en el quinto tubo.

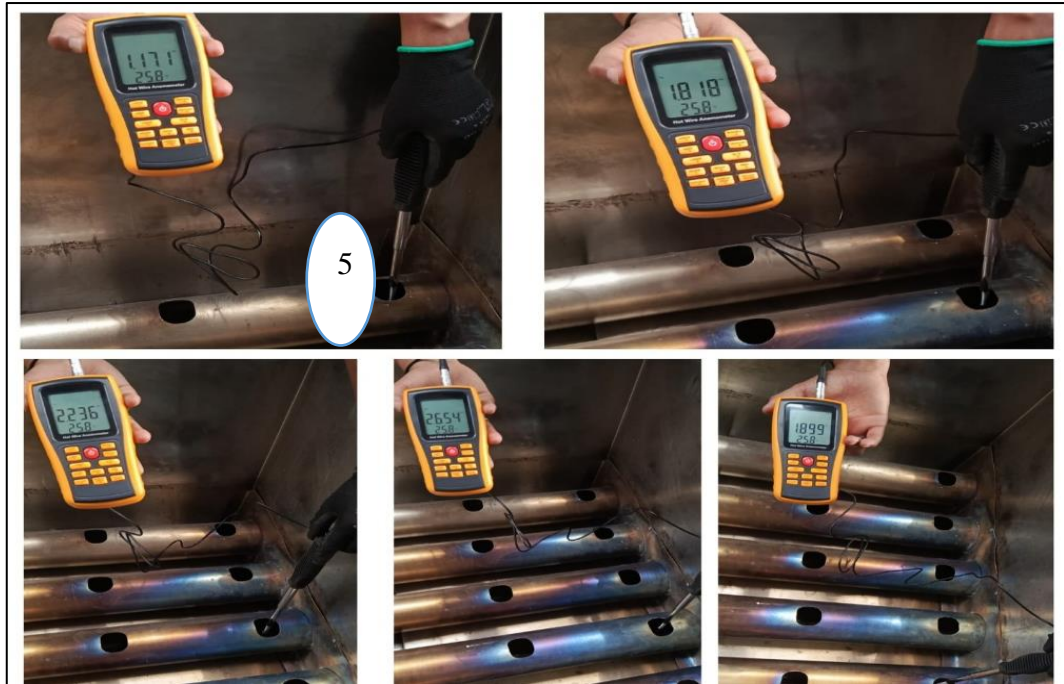


Figura 5.11. Medición de velocidad de aire en los 5 tubos con el instrumento de medición denominado anemómetro.

5.5.1 Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, con el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 18 % y apertura del ventilador del 45%.

En el ensayo experimental, el primer sensor S1, que se encuentra cerca del origen del calor, presenta un aumento excesivo de temperatura superiores a los (120°C). En cambio, en el sensor S2, se registran una temperatura de (74°C), tal como se visualiza en el Anexo I.

Por otro lado, en el sensor S3 la temperatura es baja debido a la velocidad de impulsión de aire es insuficiente para transportar aire caliente. Además, a los 18 min se estabilizaron las temperaturas. La transmisión de temperatura es irregular en la cámara de secado, figura 5.12.

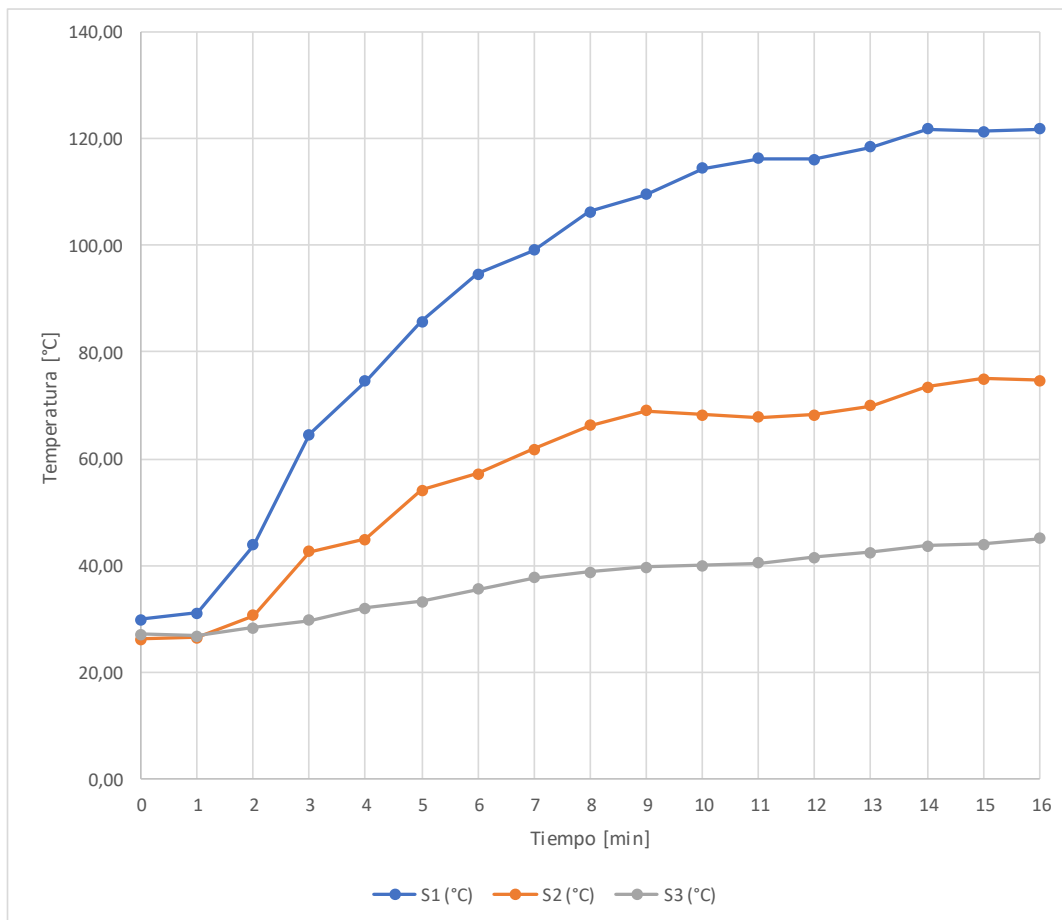


Figura 5.12. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo con el uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18 % y el ventilador al 45%.

En la figura 5.13, el perfil térmico muestra que en los puntos de medición (P1, P2, P3, P4, P5, P6) se registran valores de temperaturas superiores a (70°C) lo que podría perjudicar a al grano en el proceso de secado con este nivel de temperaturas. Según la norma INE NTE 176 el cacao debe secarse a una temperatura entre (60°C-70°C). Los últimos tubos reflejan zonas frías lo que permite concluir que el flujo de aire caliente no llega a esas zonas de la cámara afectando de esta manera el secado del cacao.

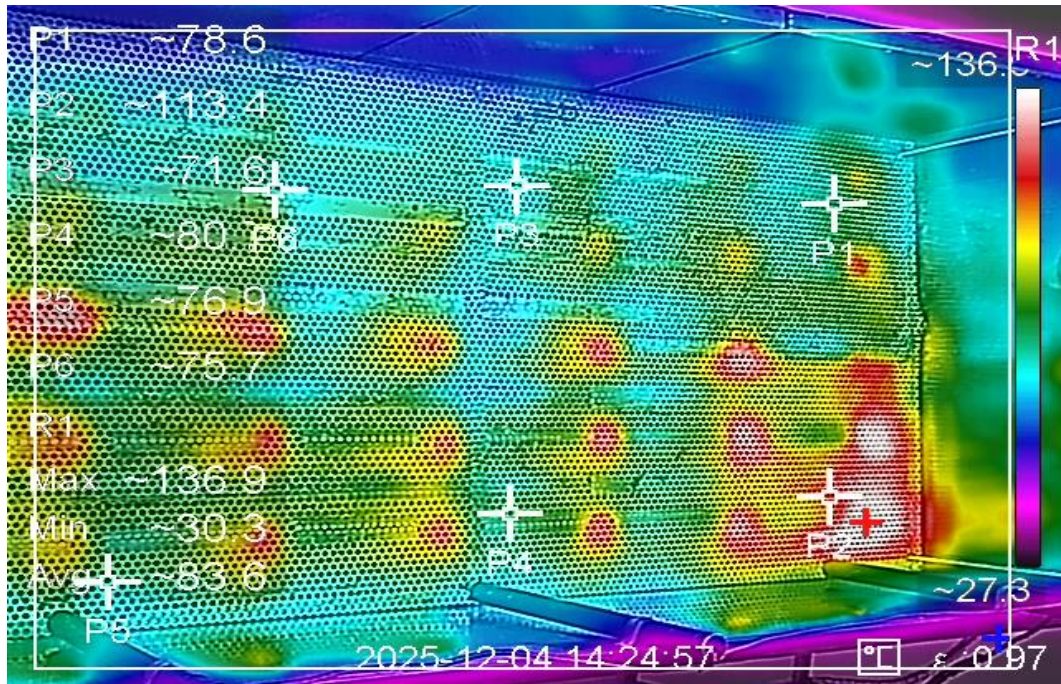


Figura 5.13. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 45%.

5.5.2 Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, con el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 14 % y apertura del ventilador del 75%.

El ensayo experimental con difusor, revela una temperatura más estable. El sensor S1 próximo a la fuente de calor incrementa la temperatura de manera gradualmente, al igual que el sensor S2 y S3, como se visualiza en el Anexo J. Además, permite una mejor distribución del calor en la cámara de secado. A los 16 minutos, el sistema se estabiliza, lo que indica que una menor apertura de la válvula y un mayor flujo de aire optimizan la dispersión del calor y la uniformidad en la cámara de secado en la figura 5.14.

Se les asigna estos parámetros a nuestras variables para obtener un secado de cacao más homogéneo y eficaz, reduciendo la posibilidad de sobrecalentamiento y garantizando una calidad más uniforme del producto final.

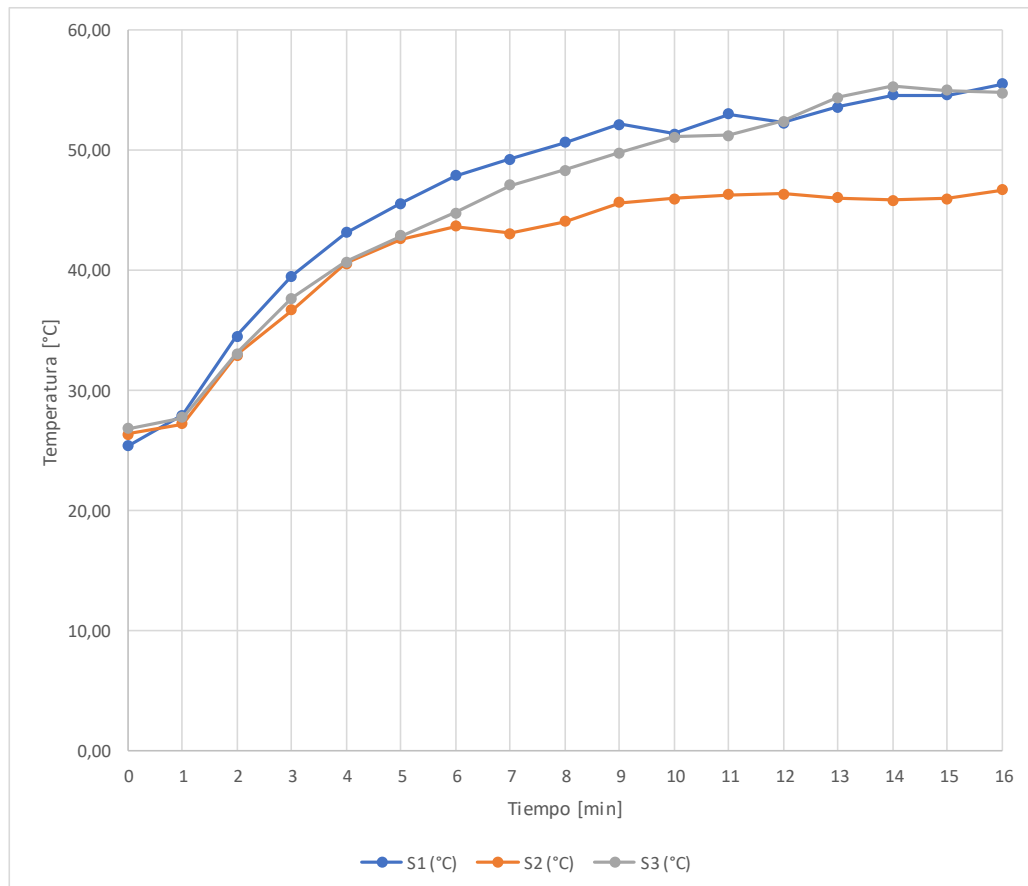


Figura 5.14 Comportamiento de la temperatura en función al tiempo con uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 14 % y el ventilador al 75%.

Como se puede visualizar en la figura 5.15, captada por la cámara termográfica se presenta un perfil térmico en donde los puntos de medición P2, P4 y P6 reflejan valores de temperatura entre (50°C) y (60°C), lo que indica la presencia de una nivel de calor adecuado para el proceso de secado, por otro lado, P1, P3 y P4 registran valores entre (45°C) y (51°C); evidenciando una ligera variación térmica dentro de la cámara además, se observa que el flujo de aire caliente que se distribuye de manera uniforme logrando cubrir prácticamente toda la cámara de secado. Esta distribución térmica favorece el proceso de transferencia de calor. Se puede determinar que a menos apertura de la válvula proporcional y a una apertura mayor del ventilador el flujo de aire logra distribuirse de mejor manera por toda la cámara de secado.

Los parámetros que se establecen en las variables son positivos para un secado eficiente del cacao, ya que las temperaturas registradas se encuentran dentro del rango adecuado para este proceso. De acuerdo con la norma INEN NTE 176, la cámara de secado debe reflejar valores menores a (70 °C), condición que se cumple en las mediciones obtenidas durante el ensayo experimental.

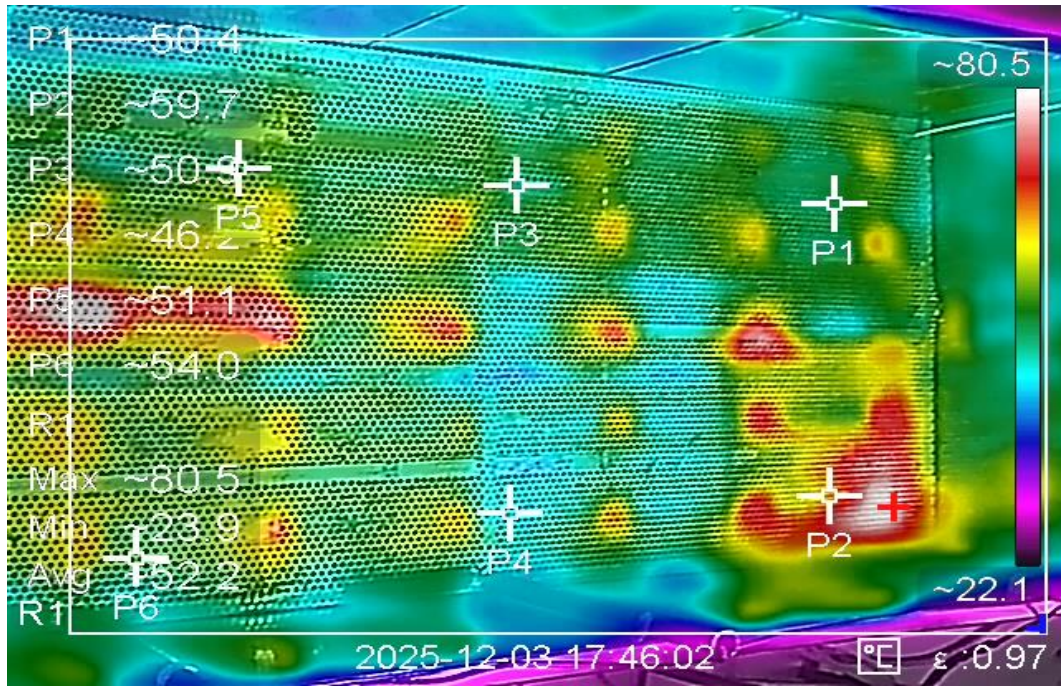


Figura 5.15. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 18% y el ventilador al 75%.

5.5.3 Resultados experimentales del comportamiento de la temperatura en la cámara de secado, con el uso de difusor para apertura de la válvula proporcional del 22 % y apertura del ventilador del 100%.

En el análisis experimental se muestra en el Anexo K, una dinámica térmica correspondiente al aumento de temperatura registrado en los tres sensores (S1-S2-S3), ubicados dentro de la cámara de secado. Por lo tanto, estos parámetros no son recomendados para secar el cacao debido, a que la temperatura de la cámara sobrepasa los (70°C), límite máximo recomendado para este tipo de proceso.

A demás, como se visualiza en la Figura 5.16, estas temperaturas elevadas que sobrepasan los 100°C derivan a un sobrecalentamiento provocando una deshidratación rápida y poco uniforme afectando negativamente la calidad del producto final. Es importante señalar que un secado a temperaturas tan elevadas podría llegar a quemar el cacao, dificultando su posterior procesamiento y molienda.

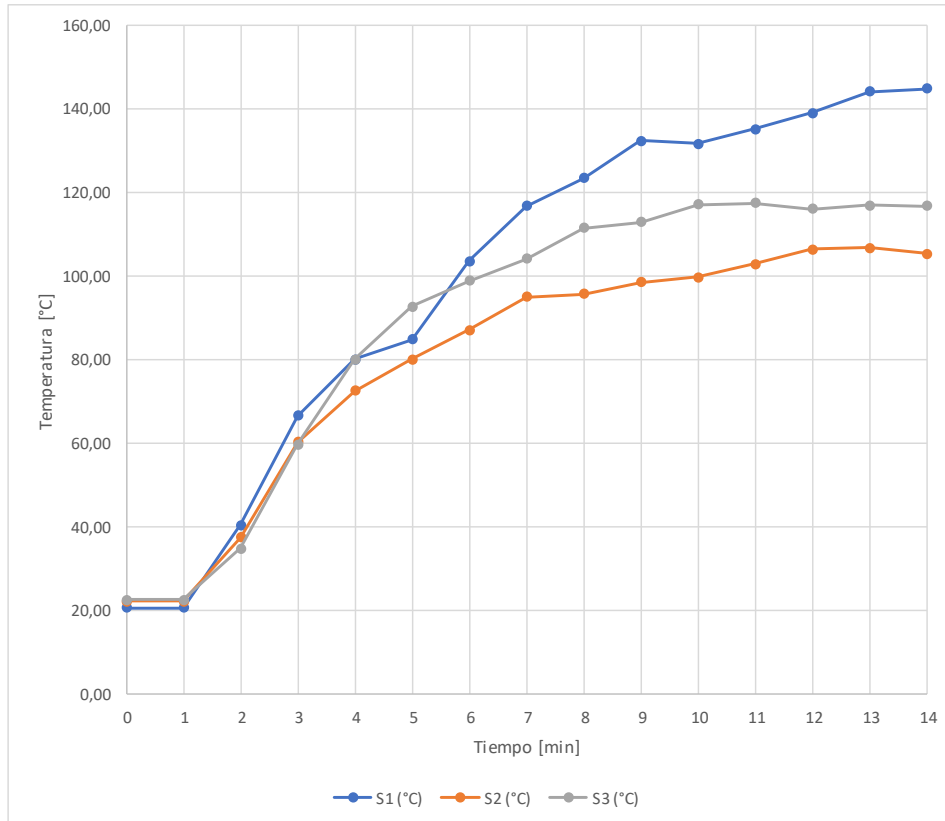


Figura 5.16. Comportamiento de la temperatura en función al tiempo con uso del difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22 % y el ventilador al 100%.

El perfil termográfico que se visualiza en la figura 5.17, muestra un aumento de temperatura elevado en los puntos (P2, P4, P6) que sobrepasa los (100°C). Además, el flujo de aire caliente se concentra en los tres primeros tubos del difusor en los otros dos tubos existen zonas con menor temperatura inferior a los (80°C), en (P1, P3, P5). Las elevadas temperaturas perjudican el secado correcto del cacao, es fundamental en un secado prevenir el sobrecalentamiento y garantizar la calidad del producto.

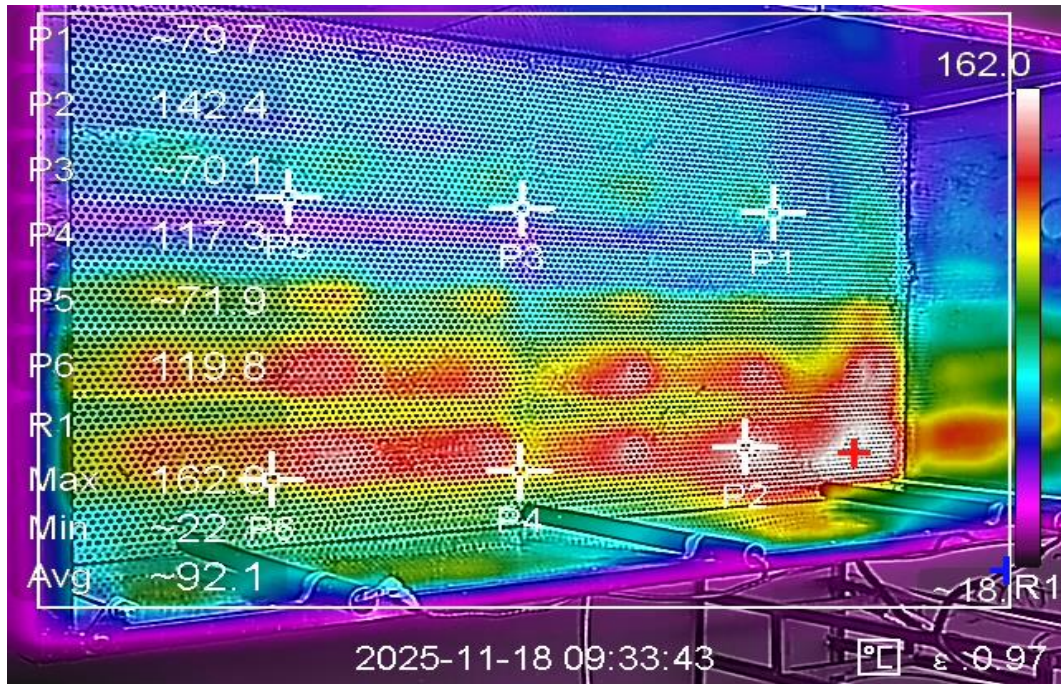


Figura 5.17. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado con el uso de difusor, con un porcentaje de apertura de la válvula proporcional al 22% y el ventilador al 100%.

5.5.4 Energía suministrada por el GLP sin el uso del difusor.

La Tabla 5.11, presenta una apertura de la válvula proporcional del 14% la cual registra una emisión de 0,02 kg/min durante 16 minutos de operación se produce un consumo de 0,32 kg de GLP, además existe una apertura del 18 % durante 16 minutos generado un consumo total de 0,48 kg de GLP. Finalmente, con una apertura de 22%, la emisión alcanza 0,08 kg/min durante 14 minutos obteniendo 1,12 kg de GLP.

Tabla 5.11 Consumo total del GLP durante el tiempo de operación

Válvula Proporcional (%)	Emisión combustible (kg/min)	Tiempo Operación (min)	Total, de GLP suministrado (kg)
14	0,02	16	0,32
18	0,03	16	0,48
22	0,08	14	1,12

La Tabla 5.12 se visualiza la válvula proporcional al 14 % de la válvula generando un consumo de GLP de 0,32 kg produciendo una energía térmica suministrada de 14720 kJ, cuando la apertura de la válvula se incrementa al 18 % se aumenta el consumo de combustible a 0,48 kg de GLP lo que produce una energía de 22080 kJ.

Finalmente, en la condición de 22 % de apertura, el sistema alcanza un mayor consumo de energía térmica de 51520 kJ. En comparación con los datos obtenidos sin difusor, la implementación del mismo permite reducir el consumo de energía térmica dentro del sistema lo que demuestra una mejor distribución de flujo aire caliente y un aprovechamiento eficiente de la energía durante el proceso de secado.

Tabla 5.12. Energía suministrada por el GLP en función de la apertura de la válvula proporcional

Válvula proporcional (%)	Total, de GLP suministrado (kg)	Energía suministrada(kJ)
14	0,32	14720
18	0,48	22080
22	1,12	51520

5.6 Resultados experimentales del proceso de secado de cacao CCN-51 con el uso de difusor.

Las pruebas se realizaron con cacao CCN-51 el cual fue sometido previamente a un proceso de fermentación durante cuatro días, como se visualiza en la figura 5.18, el cacao empleado presenta un alto contenido de humedad, este tipo de cacao requiere un control adecuado de las condiciones de secado para evitar daños en el grano y garantizar una adecuada reducción de la humedad. El proceso de secado se llevó a cabo mediante convección forzada, utilizando un sistema que permite controlar la apertura de la válvula proporcional, encargada de regular el suministro de combustible la velocidad del ventilador, que controla el flujo de aire caliente que circula dentro de la cámara y la lectura de los sensores de temperatura, los datos obtenidos permitieron evaluar la distribución de temperatura durante el proceso de secado.

Este análisis con carga resulta fundamental para determinar si el aire caliente se distribuye de manera uniforme dentro del sistema y si las condiciones asignadas de operación son adecuadas para lograr un secado eficiente del cacao, garantizando una reducción progresiva de la humedad sin comprometer la calidad final del producto.



Figura 5.18. Pruebas experimentales con el Cacao CCN-51 fermentado.

La prueba experimental de secado del cacao CCN-51 se llevó a cabo durante un periodo total de 8 horas de operación, como se puede visualizar en la figura 5.19. Inicialmente, la cámara de secado inició su operación con el ventilador al 75 % y la válvula proporcional al 20%, con la finalidad de mantener temperaturas inferiores a 70°C en S2 y S3, tal como se muestra en los datos obtenidos en el Anexo M. Posteriormente, se ajustó la válvula proporcional al 20% y el ventilador al 45 % con el objetivo de que la parte frontal de la cámara de secado donde se encuentra S1 alcance niveles de temperatura que no superaren los 70°C. Además, se realizó la apertura de la válvula proporcional al 13% y se incrementó la velocidad del ventilador al 100%, con el propósito de enfriar la cámara de secado y mantener la temperatura dentro del rango establecido de 60-70°C.

Se puede visualizar que, en los primeros minutos la temperatura en S1, S2 y S3 se incrementa progresivamente hasta alcanzar valores entre 50°C y 73°C. Además, la temperatura se mantiene dentro de este rango mediante fluctuaciones térmicas controladas, con la finalidad de obtener un comportamiento térmico estable durante el secado del cacao.

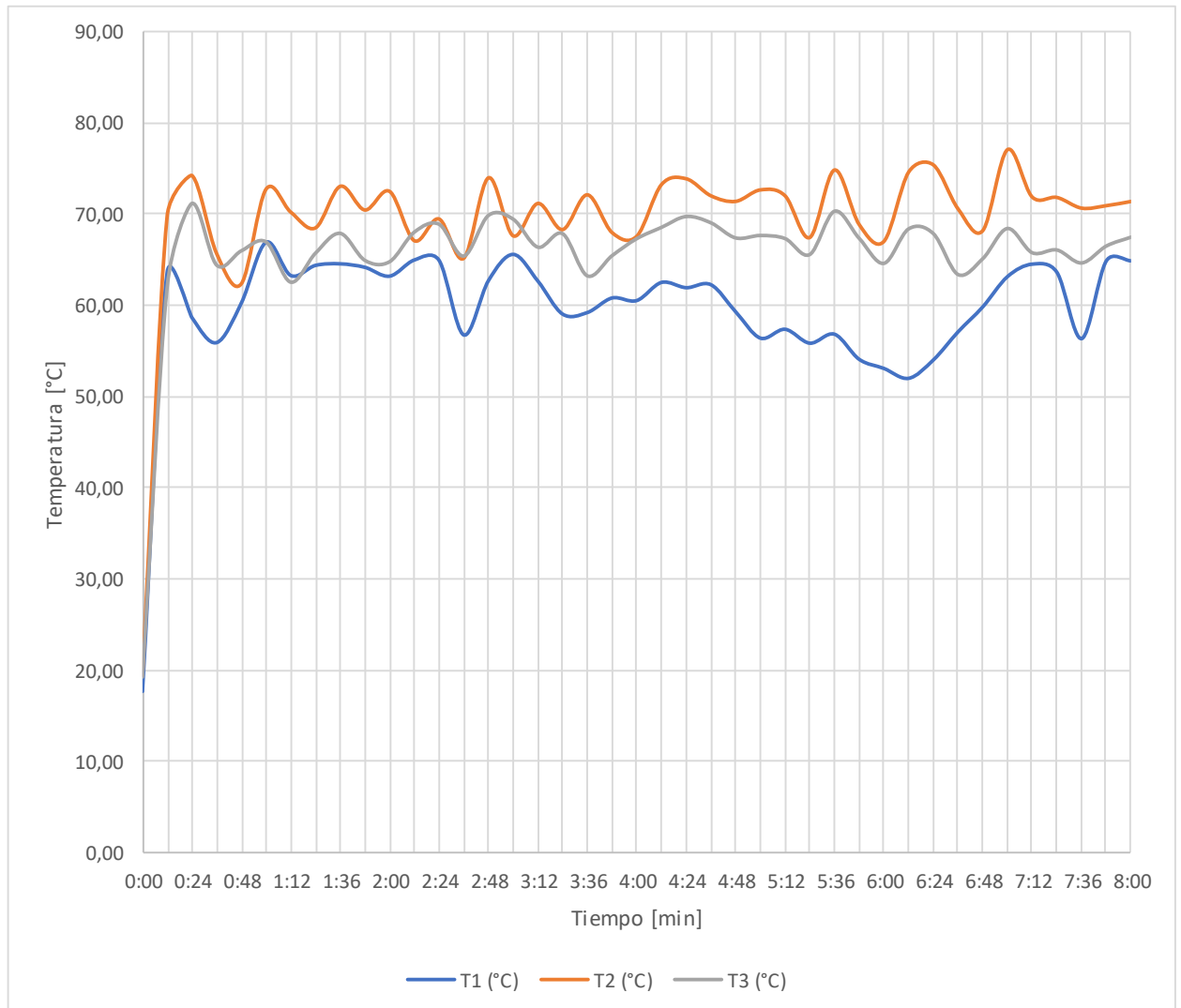


Figura 5.19. Comportamiento de la temperatura en función del tiempo en la cámara de secado con el uso de difusor.

Las aperturas y cierres parciales de la válvula proporcional, operando en un rango comprendido de 13% y 20%, figura 5.20, junto con la regulación del ventilador que opera entre un rango de 45% y 100%, figura 5.21, permiten regular de manera eficiente el flujo de aire caliente dentro de la cámara de secado. Este control se realiza con el fin de evitar sobrecalentamientos y mantener un régimen térmico adecuado. Además, esto favorece un secado más homogéneo del cacao.

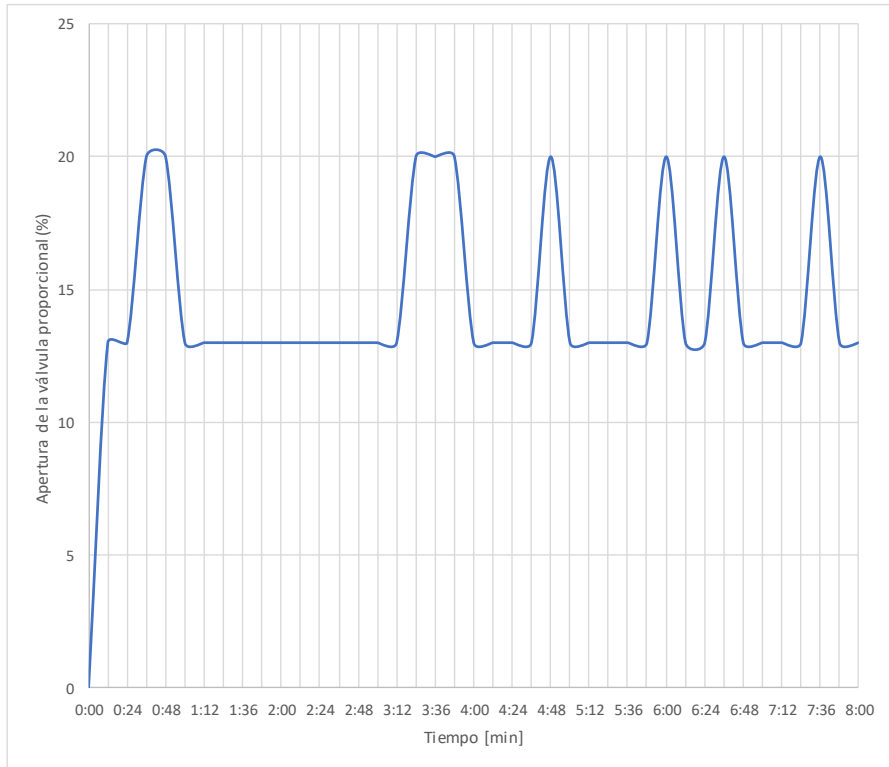


Figura 5.20. Comportamiento operativo con porcentaje de apertura de la válvula proporcional (%) en función del tiempo (min).

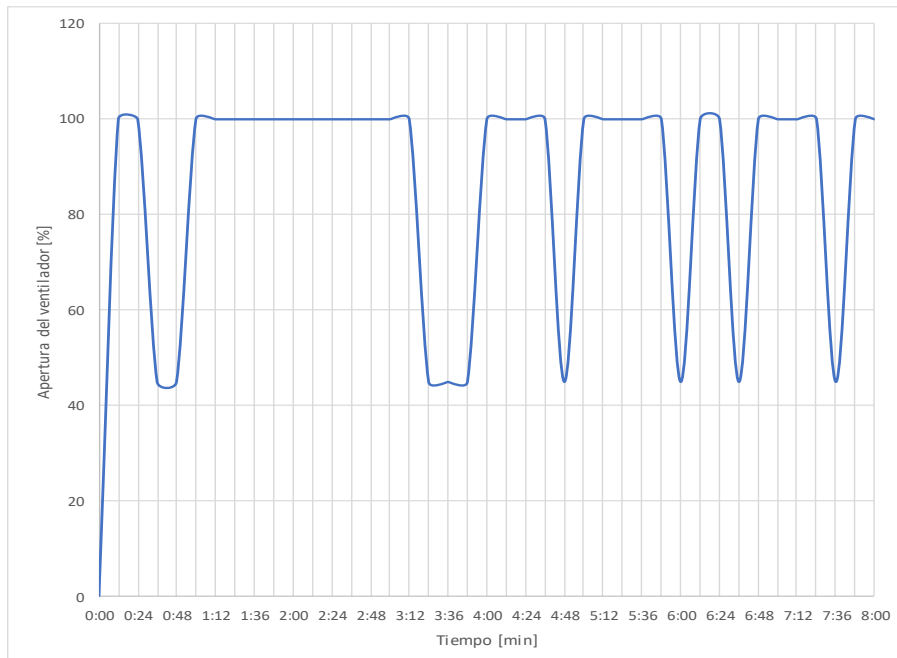


Figura 5.21. Comportamiento operativo con porcentaje de apertura del ventilador (%) en función del tiempo (min).

Se observa en la, figura 5.22, que el flujo de aire se mantiene predominantemente en valores elevados, cercanos a (0,10 m³/s), lo que evidencia un adecuado régimen de convección forzada dentro de la cámara de secado. Además, se registran descensos periódicos del caudal (0,02 m³/s) esto se debe a que en ciertas etapas del secado el ventilador reduce su potencia para evitar el sobrecalentamiento en la cámara de secado.

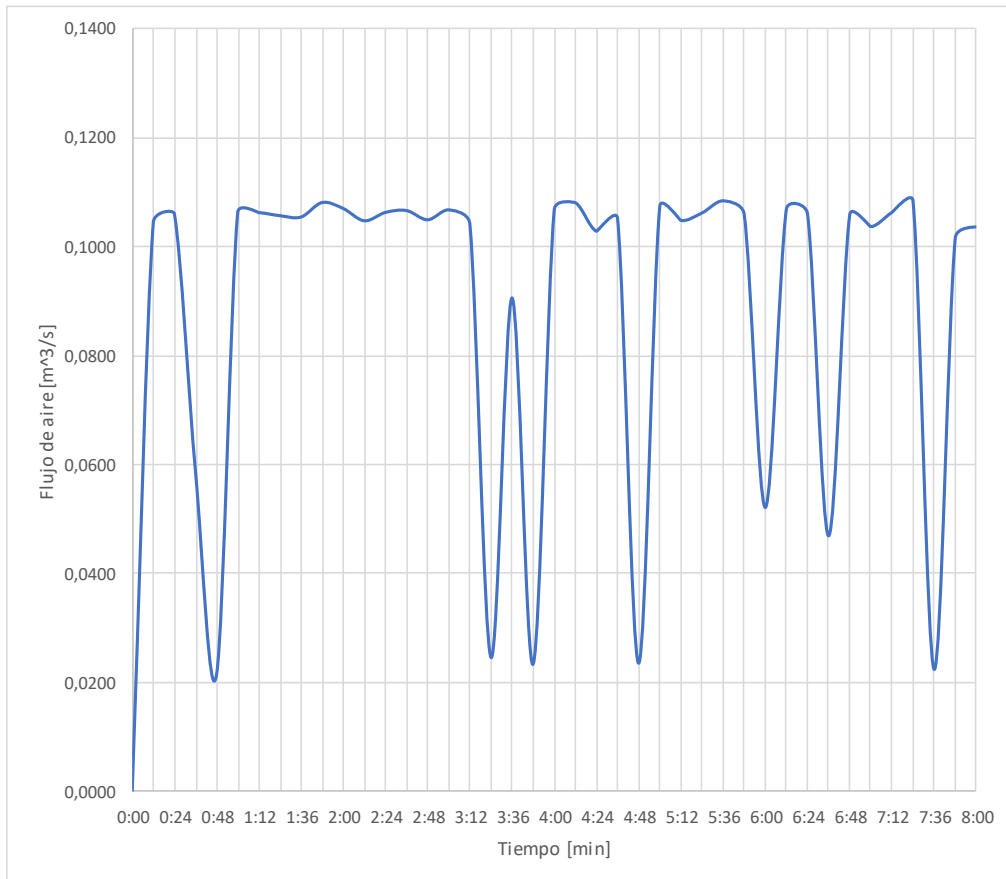


Figura 5.22. Comportamiento operativo flujo de aire (m³/s) en función del tiempo(min).

La masa del cacao disminuyó gradualmente, como se visualiza en la figura 5.23, desde 17,10 kg al inicio del proceso hasta 6,54 kg al final de las 8 horas de secado. Esta reducción corresponde principalmente a la eliminación de la humedad presente en el grano, lo que demuestra la efectividad del proceso de secado utilizado. La mayor tasa de masa pérdida se observa en las primeras horas, lo que coincide con los mayores gradientes térmicos y de humedad, mientras que en las últimas fases la pérdida de masa es más lenta. Esto se debe a que, al inicio del proceso, el grano tiene una mayor cantidad de humedad superficial, mientras que, en las etapas posteriores, la reducción de humedad se produce principalmente en el interior del grano, lo cual requiere más tiempo.

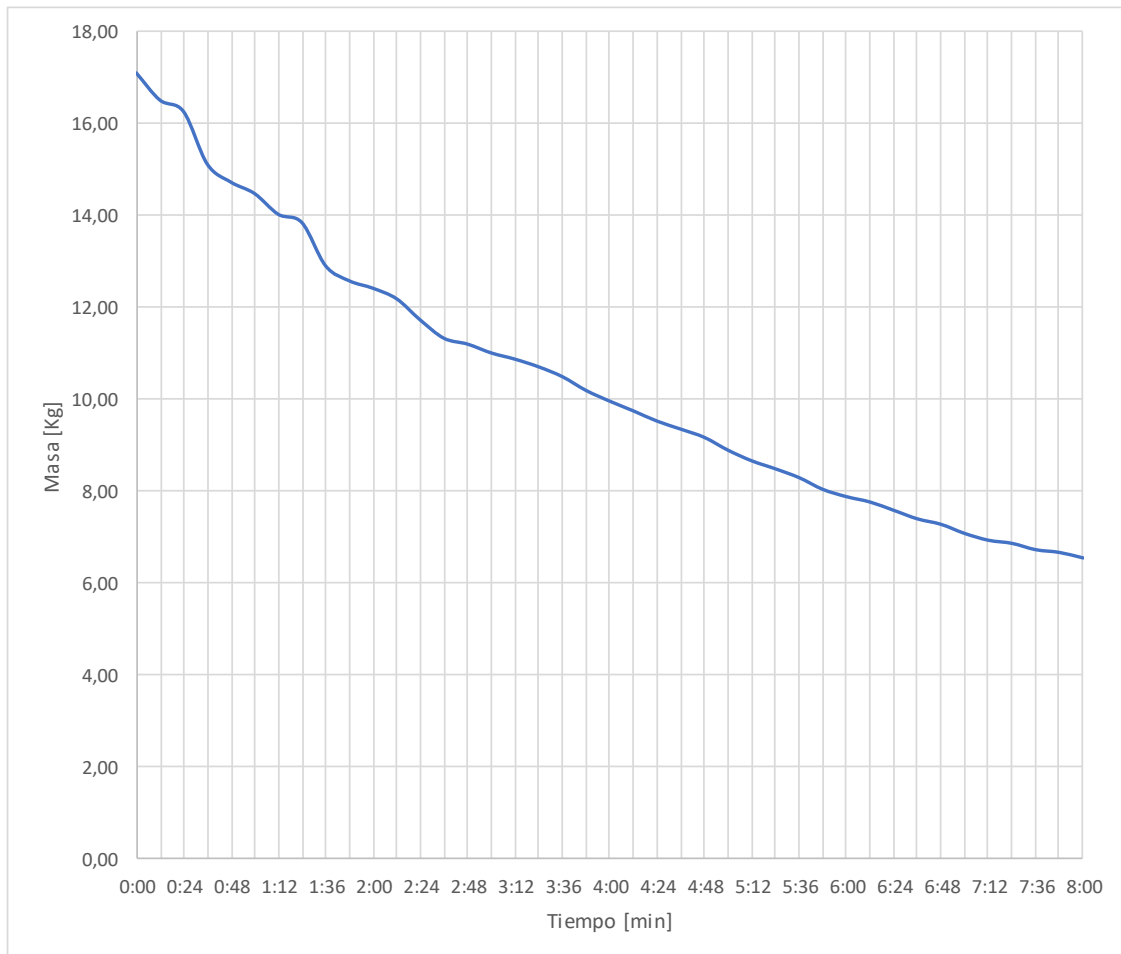


Figura 5.23. Comportamiento operativo de la masa del producto (kg) en función del tiempo (min) con el uso de difusor en la cámara de secado.

En la figura 5.24, captada por la cámara termográfica, se identifican varios puntos de medición (P2-P4-P6) que registran temperaturas comprendidas entre 57 y 63 °C. Por otro lado, los puntos (P1-P3-P5) presentan valores de temperatura cercanos a los 46 °C, evidenciando una diferencia térmica controlada dentro de la cámara de secado. Además, la cámara termográfica da a muestra una temperatura general máxima de 68,2°C, este valor se encuentra en el rango óptimo para el secado del cacao, de acuerdo a lo establecido en la norma INE NTE 176.

Cabe destacar que el sistema presenta una distribución térmica adecuada y homogénea, lo que favorece que el cacao alcance una humedad final del 7 %, evitando al mismo tiempo el riesgo de sobrecalentamiento o quemado del producto, lo cual garantiza la calidad del cacao durante el proceso de secado.

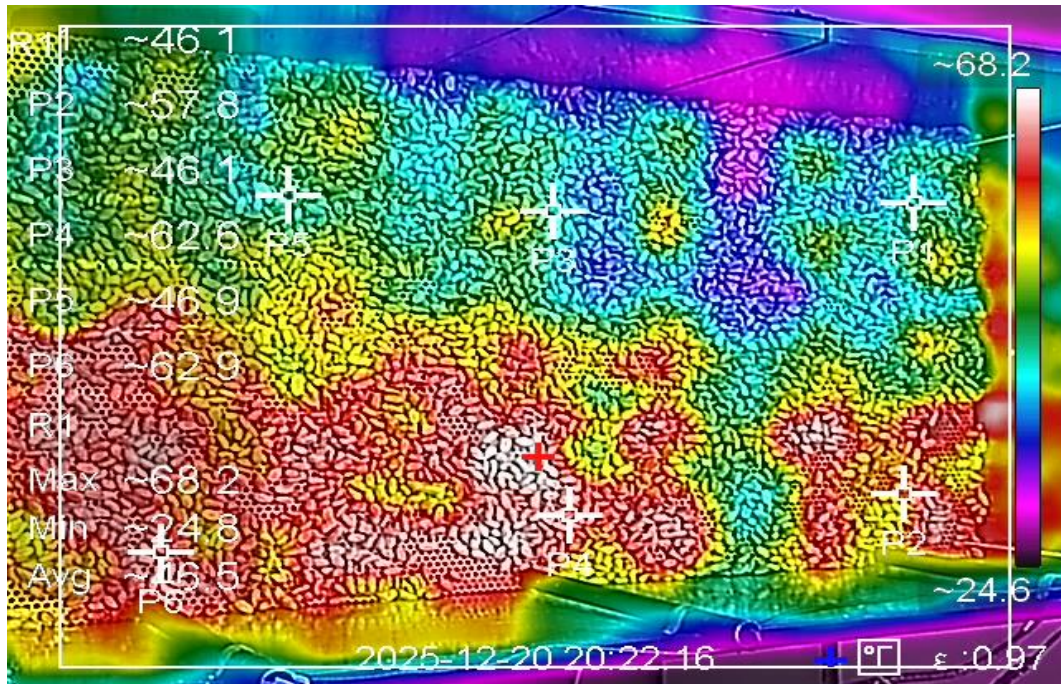


Figura 5.24. Perfil de distribución de temperatura en la cámara de secado en función al tiempo en (min), porcentaje de apertura de válvula proporcional en (%), porcentaje de apertura de ventilador en (%) y valores reflejados de temperatura (°C).

Bajo estas condiciones operativas, la cámara de secado logró una distribución homogénea del aire caliente, permitiendo reducir la humedad del cacao a un 7% como se observa en la figura 5.24.

El secado del cacao hasta alcanzar el 7%, figura 5.25, de humedad proporciona condiciones óptimas para su conservación y comercialización, reduciendo el riesgo de descomposición, formación de moho y pérdida de calidad. Este valor es el principal parámetro técnico de venta establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 176, que determina el contenido máximo de humedad permitido en el cacao para que se considere apto, estable y comercializable para el mercado nacional e internacional.

Además de los beneficios en la conservación y calidad del grano, alcanzar el nivel de humedad adecuado también optimiza los procesos posteriores de transformación del cacao. Un grano con la humedad correcta facilita la molienda y la producción de chocolate, mejorando la eficiencia de estos procesos y la calidad de los productos derivados. Por lo tanto, un secado eficiente y preciso es esencial para maximizar el valor del cacao en toda la cadena de producción.



a) Cacao CCN-51



b) Higrómetro

Figura 5.25. Muestra final del cacao CCN-51 y porcentaje de humedad al 7% establecido por el higrómetro.

5.6.1 Resultados del consumo de GLP en el transcurso del tiempo con carga.

Como se puede visualizar en la Tabla 5.13 a medida que transcurre el tiempo, el consumo de GLP aumenta gradualmente, alcanzado valores de 1,30 % alrededor de los 3 minutos de funcionamiento. Luego el consumo continuó incrementándose de forma sostenida conforme la máquina mantiene la generación para el proceso de secado. Finalmente, al llegar a los 8 minutos de operación, el consumo alcanza valores cercanos al 5,65 % lo evidencia que el sistema requiere una mayor cantidad de combustible para mantener la temperatura dentro de los 70°C y que el flujo de aire se mantenga caliente dentro de la cámara de secado.

Tabla 5.13. Consumo de GLP en función del tiempo

Tiempo (min)	Apertura de la válvula proporcional (%)	Masa (Kg)	Consumo de GLP (%)
0:00	0	17,10	0,00
0:12	13	16,51	0,01
0:24	13	16,26	0,02
0:36	20	15,12	0,62
0:48	20	14,73	1,22
1:00	13	14,48	1,22
1:12	13	14,03	1,23
1:24	13	13,84	1,24
1:36	13	12,90	1,25
1:48	13	12,58	1,26
2:00	13	12,42	1,26
2:12	13	12,19	1,27
2:24	13	11,72	1,28
2:36	13	11,33	1,29
2:48	13	11,20	1,30
3:00	13	11,01	1,30
3:12	13	10,87	1,31
3:24	20	10,70	1,91
3:36	20	10,49	2,51
3:48	20	10,19	3,11
4:00	13	9,96	3,12
4:12	13	9,75	3,13
4:24	13	9,52	3,14
4:36	13	9,35	3,14
4:48	20	9,17	3,74
5:00	13	8,89	3,75
5:12	13	8,66	3,76
5:24	13	8,48	3,77
5:36	13	8,29	3,78
5:48	13	8,04	3,78
6:00	20	7,88	4,38
6:12	13	7,76	4,39
6:24	13	7,58	4,40
6:36	20	7,39	5,00
6:48	13	7,28	5,01
7:00	13	7,08	5,02
7:12	13	6,93	5,02
7:24	13	6,86	5,03
7:36	20	6,72	5,63
7:48	13	6,66	5,64
8:00	13	6,54	5,65

La figura 5,26, muestra la variación del consumo de GLP en función del tiempo durante el proceso de secado. Se observa un incremento progresivo del combustible a medida que avanza la operación del sistema, alcanzando aproximadamente 5,6 kg de GLP al final del periodo analizado, lo cual evidencia el requerimiento energético necesario para mantener las condiciones térmicas del proceso de secado

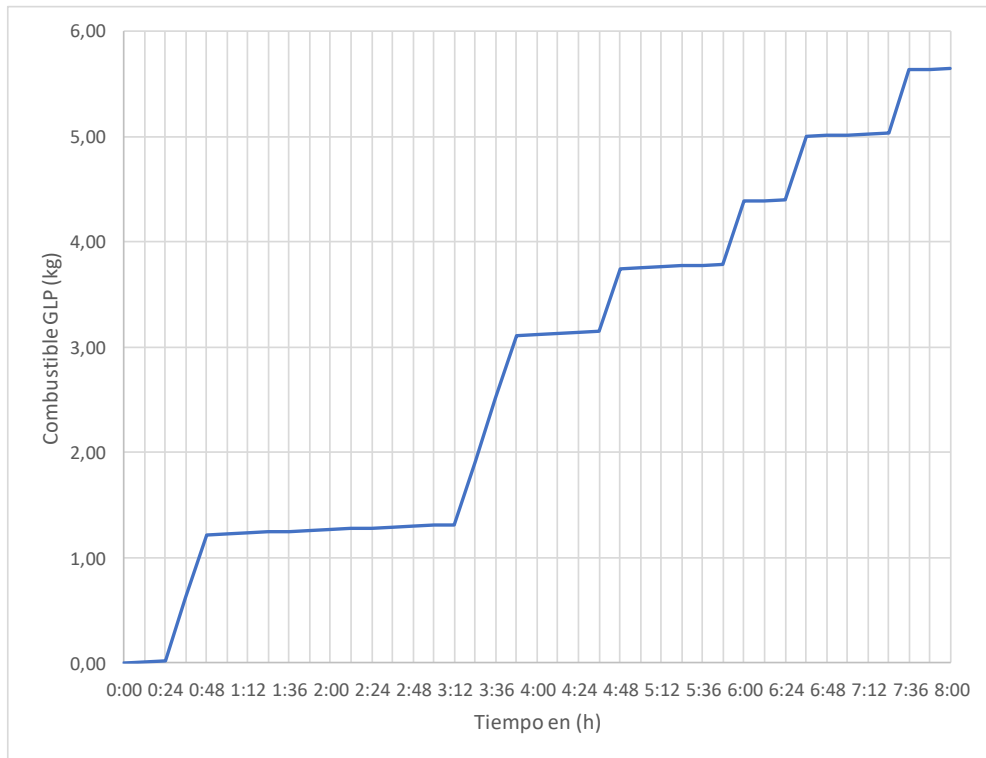


Figura 5.26. Consumo del GLP en función al tiempo

5.6.2 Impacto económico del consumo de GLP y eléctrico.

Consumo de GLP en función al tiempo de operación.

El impacto económico del consumo de GLP, al momento de secar el cacao CCN-51 con una masa inicial 17,10 kg y masa final de 6,54 kg de en un tiempo de operación de 8 horas tiene un costo de operación 1,14 \$ dólar, como se puede visualizar en la tabla 5.14. Como resultado final de la evaluación energética en la maquina secadora rectangular con el uso del difusor, la adecuada distribución de aire caliente en la cámara de secado mejora la eficiencia térmica del proceso reduciendo el consumo energético generado por el GLP durante la operación.

Tabla 5.14. Costo de GLP consumido en un tiempo de operación de 8 horas.

Consumo de GLP (\$)					
Tiempo (h)	GLP total (kg)	Precio de GLP (\$)	Precio por kilogramo de GLP (\$)	GLP consumido (kg)	Total (\$)
8	15	3	0,2	5,7	1,14

Consumo eléctrico en función al tiempo de operación.

ARCONEL estableció un valor de servicio de energía eléctrica para el año 2026 en el Ecuador, con un costo de 12,83 centavos de dólar por kilovatio-hora (kW.h), cifra para el próximo pliego tarifario [35].

Los valores de voltaje y corrientes se obtuvieron mediante la medición con la pinza amperimétrica, Anexo M.

Según la escuela universitaria de oficios UNLP el valor recomendado de un factor de potencia es de 0,85 con el fin de realizar los cálculos de potencia de un aproximado del consumo energético en función al tiempo, como se visualiza en la tabla 5.15. [36].

Tabla 5.15. Consumo eléctrico en función al tiempo de operación en 8 horas.

Consumo eléctrico						
Tiempo (h)	Voltaje (V)	Corriente (A)	f.p	Potencia (W)	Consumo (kW.h)	Costo (¢)
1	122,8	3,72	0,85	388,29	0,39	4,98
2	122,8	3,72	0,85	388,29	0,78	9,96
3	122,8	3,72	0,85	388,29	1,16	14,95
4	122,8	3,72	0,85	388,29	1,55	19,93
5	122,8	3,72	0,85	388,29	1,94	24,91
6	122,8	3,72	0,85	388,29	2,33	29,89
7	122,8	3,72	0,85	388,29	2,72	34,87
8	122,8	3,72	0,85	388,29	3,11	39,85

El consumo energético registrado durante el proceso de secado del cacao CCN-51 en la máquina rectangular presenta un incremento progresivo conforme avanza el tiempo de operación. Como se observa en la Figura 5.27, el consumo de energía eléctrica aumenta de forma continua a lo largo de las ocho horas de funcionamiento, mostrando un comportamiento prácticamente lineal. Esta tendencia se debe a que los componentes eléctricos del sistema, principalmente el ventilador y los dispositivos de control, permanecen en operación constante para mantener el flujo de aire y las condiciones térmicas requeridas dentro de la cámara de secado. Al finalizar el periodo de operación, el consumo energético acumulado alcanza un valor de 3,11 kW·h.”

Desde el punto de vista económico, este consumo representa un costo aproximado de 39,85 centavos de dólar por cada ciclo de secado de ocho horas. Este resultado evidencia que el sistema presenta un consumo eléctrico moderado durante su funcionamiento, lo cual refleja un uso eficiente de la energía en el proceso de secado.

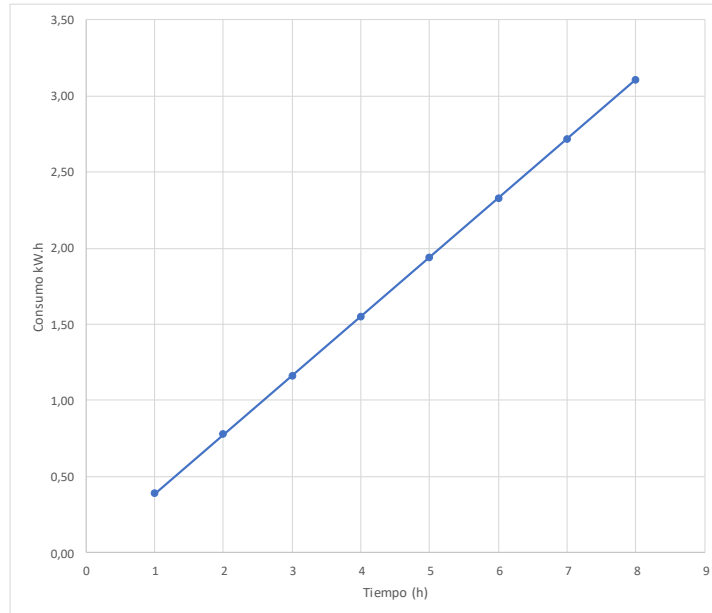


Figura 5.27. Consumo energético en función al tiempo de operación.

Mediante el análisis que se realizó en maquina secadora con carga se obtuvo el secado de 17,10 kg de cacao, con un consumo de 5,7 kg de GLP, manteniendo los parámetros de operación establecidos en el sistema. A partir de esta relación y considerando condiciones de operación similares, es posible realizar una proyección proporcional del proceso, estimando que el sistema podría alcanzar una capacidad aproximada de 45 kg de cacao, manteniendo un comportamiento energético similar del combustible y las mismas condiciones de funcionamiento del equipo. Tal como se puede visualizar en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Proyección del consumo de GLP en función de la masa de cacao a secar

Masa a secar (kg)	Consumo de GLP (kg)
17,10	5,7
17,10	5,7
10,80	4
TOTAL: 45	15

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones.

- Los ensayos experimentales sin difusor evidenciaron un comportamiento térmico inestable. Al operar con la válvula proporcional al 18 % y el ventilador al 45 % se registraron temperaturas superiores a los 100°C en un tiempo de 3 minutos de operación. Cuando el ventilador estaba al 100 % facilita el transporte del flujo de aire hacia la zona posterior de la cámara, determinando la concentración del aire caliente principalmente en la parte delantera, lo que permite alcanzar temperaturas superiores a 130°C, generando sobrecalentamiento sin lograr una estabilidad y homogeneidad térmica adecuada.
- Los ensayos experimentales con difusor evidenciaron que al operar la máquina con la válvula proporcional al 14% y el ventilador al 75%, se registraron temperaturas de un promedio de 51 °C en un tiempo de 16 min de operación como resultado una distribución térmica más homogénea dentro de la cámara de secado. Estos resultados permiten concluir que una menor apertura de la válvula y una mayor velocidad del ventilador se obtiene flujos de aire adecuados para el secado del cacao.
- En la prueba experimental realizada con el cacao CCN-51, los valores de temperatura registrados dentro de la cámara de secado se mantuvieron en un rango entre 50 °C y 70 °C, la combinación de convección forzada, el control de la válvula proporcional al (20%, 13%) y el ventilador al (45%, 75%, 100%). Estas condiciones operativas posibilitaron completar el proceso de secado con una masa inicial de 17,10 kg y una humedad inicial de 61,75%, en un tiempo de operación de 8 horas, logrando una reducción del contenido de humedad al 7% y una masa final de 6,54 kg, sin exponer el producto a temperaturas críticas que puedan afectar su calidad, aroma y propiedades físicas del cacao.

6.2 Recomendaciones.

- Se recomienda ejecutar el proceso de secado en modo automático, controlando la temperatura entre 50 °C y 70 °C para evitar daños térmicos y preservar la calidad del cacao. Además, es indispensable que el operador de la máquina secadora de cacao revise y siga rigurosamente el manual de funcionamiento.

- Se sugiere remover el cacao durante las primeras tres horas de operación cada 15 a 20 minutos, ya que el alto contenido de la humedad inicial ayuda a proteger el grano de posibles daños. Posteriormente, el volteo del cacao debe realizarse cada 10 minutos, debido a la disminución progresiva de humedad y mayor riesgo de sobrecalentamiento, hasta alcanzar aproximadamente un 7 % de humedad.
- Implementar un ventilador con mayor capacidad, ya que un mayor flujo de aire mejora la convección forzada dentro de la cámara de secado, permitiendo un secado más rápido del cacao y reduciendo el tiempo de enfriamiento de la máquina.
- Incrementar el número de sensores de temperatura dentro de la cámara para obtener un perfil térmico más detallado.

7. REFERENCIAS.

- [1] L. Suárez y F. Kuonquí, «DESARROLLO DE UNA SECADORA DE CACAO DE 500 LIBRAS POR LOTE.», pp. 20-21, feb. 2025, Accedido: 20 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29909/1/UPS-GT006095.pdf>
- [2] E. Villacís, «Cacao ecuatoriano: historia e identidad - LAPALABRABIERTA», ene. 2019, Accedido: 19 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lapalabrabierta.com/2019/01/13/cacao-ecuatoriano-historia-e-identidad/>
- [3] R. Chiluisa y B. Defaz, «ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN UNA SECADORA DE CACAO RECTANGULAR CON EL USO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR.», Universida Tecnica de Cotopaxi, Latacunga, 2022. Accedido: 23 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/PI-002214.pdf>
- [4] D. Jaramillo, «UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI», 2022. Accedido: 29 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/items/f96edbac-00e4-4bba-820b-c0ab7e4a0a3d>
- [5] A. Joao y E. Hanspach, «SECADO DE CACAO MECÁNIZADO VS SECADO AL SOL», *Comersa Trading S.A.C*, mar. 2023, Accedido: 19 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.comersatrading.com/post/secado-de-cacao-mecanizado-vs-secado-al-sol>
- [6] J. Nogales, «EL SECADO NATURAL DEL CACAO Y SU INFLUENCIA PARA LOGRAR UN BUEN SABOR Y AROMA DEL CHOCOLATE. - Poscosecha Cacao», ago. 2017, Accedido: 19 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://poscosechacacao.com/2017/08/el-secado-natural-del-cacao-y-su-influencia-para-lograr-un-buen-sabor-y-aroma-del-chocolate/#google_vignette

- [7] B. F. Dzelagha, N. M. Ngwa, y D. N. Bup, «Una revisión de las tecnologías de secado del cacao y su efecto en los parámetros de calidad del grano», *Int. J. Food Sci.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8830127.
- [8] «Secado del cacao en grano | Descargar Diagrama Científico». Accedido: 19 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Secado-del-cacao-en-grano_fig3_325583808
- [9] «Elba o Helda - Federación Nacional de Cafeteros». Accedido: 19 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/glosario/elba-o-helda/>
- [10] «Invernadero Para Secado De Cacao - Tropical Invernaderos». Accedido: 19 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tropicalinvernaderos.com/invernadero-para-secado-de-cacao/>
- [11] I. López Cerino, E. Chávez García, I. López Cerino, y E. Chávez García, «Eficacia de secador solar tipo túnel con cacao (*Theobroma Cacao L.*) en Tabasco», *Rev. Mex. De Cienc. Agric.*, vol. 9, n.º SPE21, sep. 2018, doi: 10.29312/REMEXCA.V0I21.1528.
- [12] G. Conforme, «CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE SECADO DE GRANOS DE CACAO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SUS PROCESOS», feb. 2025. Accedido: 20 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/1fc899ea-ba02-461a-93d2-83f52ac95373/content>
- [13] N. Ramírez y D. Viteri, «DESARROLLO DE UNA SECADORA AUTOMÁTICA PARA CACAO DE ALTA CAPACIDAD MEDIANTE FLUJO DE AIRE CALIENTE», Universidad Politécnica Salesiana Ecuador, 2024. Accedido: 20 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29329/1/UPS-GT005947.pdf>
- [14] «Secador rotatorio para cacao », SODOOWO. Accedido: 29 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sodoowo.com/en/equipments/rotary-drier-for-cocoa/>
- [15] J. Rosas, «UNIVERSIDAD DE LOS ANDES INGENIERÍA MECÁNICA», UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, 2022. Accedido: 29 de octubre de 2025. [En línea].

Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/78086685-38ed-4079-af28-362304ea6218/content>

- [16] N. D. Peñaherrera González, «Estudio de métodos de fermentación y secado del cacao», UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS QUÍMICA DE ALIMENTOS, Quito, 2021. Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/24717>
- [17] «Secadores de flujo cruzado continuo |», GSS. Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://es.gssag.ru/cross-flow-process-dryers-product/>
- [18] R. Torres, P. Lugo, y M. Padilla, «Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca.», *SciELO*, vol. 20, n.º 39, abr. 2017, Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992017000200005
- [19] J. E. Orna Chávez, N. Chuquín, L. Saquina, y O. Cueva, «Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg», *Enfoque UTE*, vol. 9, n.º 2, pp. 159-174, jun. 2018, doi: 10.29019/ENFOQUEUTE.V9N2.185.
- [20] A. Villamar, «Manejo poscosecha del fruto de cacao *Theobroma cacao* L.», UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS ESCUELA DE AGRICULTURA, SILVICULTURA, PESCA Y VETERINARIA CARRERA DE AGROINDUSTRIA, Babahoyo, 2024.
- [21] «Secadora Rectangular - Novo», NOVO AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL. Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://novoautomatizacionindustrial.com.pe/secadora-rectangular/>
- [22] «Convección forzada: La ciencia detrás de los sistemas de cocción, secado y rostizado de Laitram», *Laitram Machinery*, ago. 2025, Accedido: 23 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.laitrammachinery.com/es/post/convecci%C3%B3n-forzada-la-ciencia-detr%C3%A1s-de-los-sistemas-de-cocci%C3%B3n-secado-y-rostizado-de-laitram>

- [23] «Calor sensible, calor latente y radiación | La ciencia de la fatalidad», Science of doom. Accedido: 23 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://scienceofdoom.com/2010/04/09/sensible-heat-latent-heat-and-radiation/>
- [24] T. W. S. Equipo 3 2017-2, «Transporte de Energía UNAM: Introducción a la Convección», Blog. Accedido: 16 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://equipo3transportedeenergia.blogspot.com/2017/05/introduccion-la-conveccion.html>
- [25] E. Sanguinetti, «Eficiencia Térmica y Eficiencia Energética – OCPe – CIP», OCPe. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://ocpe.cip.org.pe/energia-eolica/?utm_source
- [26] C. Aire y L. Aguilar, «Ensayos de control del concreto lanzado con fibras en el túnel de la línea 12 del metro de la CDMX», *Revista ALCONPAT*, vol. 11, n.º 1, pp. 73-87, ene. 2021, doi: 10.21041/ra.v11i1.493.
- [27] METAL-PANEL, «ESPECIFICACIÓN TÉCNICA FIBRA DE VIDRIO.», 2016.
- [28] M. A. E. M. Mohamed, A. Meana-Fernández, y A. J. Gutiérrez-Trashorras, «Improvement of tube heat exchanger performance with perforated ring inserts, tube rotation and using nanofluids», *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 149, n.º 7, pp. 2907-2928, abr. 2024, doi: 10.1007/s10973-023-12864-0.
- [29] «Cómo el GLP está transformando la agricultura moderna - GASNOVA», CASNOVA. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.gasnova.co/como-el-glp-esta-transformando-la-agricultura-moderna/>
- [30] L. Quintero, «Efecto del secado con combustión directa de GLP sobre la composición química del grano de café.», ago. 2022, Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/GLP_CITAR.pdf
- [31] «Tanque de Gas de 15 KG para Uso Doméstico - Fainsa», FAINSA FIS. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://fainsa.com.ec/producto/tanque-de-gas-de-15-kg-para-uso-domestico/>
- [32] J. Gavilema y C. Rosillo, «Implementación experimental de un secador híbrido para reducción del tiempo en el secado de cacao mejorado.», Universidad Técnica de

- Cotopaxi, Latacunga, 2021. Accedido: 20 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en:
file:///C:/Users/Usuario/OneDrive/Documentos/1.(TESIS%20UTC)/00.%20Tesis%20Rosillo-Gavilema%202121.pdf
- [33] J. Millán, «Cálculos Psicrometría», Dto. de Máquinas y Motores Térmicos Makina eta Motore Termikoetako Saila. Accedido: 2 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/CartaPsy.htm>
- [34] T. L. . Bergman y A. S. . Levine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, vol. : 8th edition. John Wiley & Sons, Inc., 2019. Accedido: 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en:
file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Incropera%208va%20Edici%C3%B3n.pdf
- [35] E. Sánchez, «Costo del servicio de energía eléctrica 2026 para Ecuador», *El Diario*, 9 de diciembre de 2025. Accedido: 11 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.eldiario.ec/ecuador/costo-servicio-energia-electrica-2026-ecuador-09122025/>
- [36] «Fundamentos teóricos: Factor de Potencia.» Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://yold.unlp.edu.ar/frontend/media/87/27587/e874c1957ec82f81eb3499675337b55c.pdf>