

# **Mejoramiento tecnológico de los silos secadores de café usados en las fincas cafeteras de la región del sur occidente Caucano**



Trabajo de Grado

**Fabián Darío Guzmán Mamián**

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda.

*Universidad del Cauca*  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control**  
**Ingeniería en Automática Industrial**  
Popayán, 2016

# **Mejoramiento tecnológico de los silos secadores de café usados en las fincas cafeteras de la región del sur occidente Caucaño**



Trabajo de Grado

**Fabián Darío Guzmán Mamián**

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda.

*Universidad del Cauca*  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control**  
**Ingeniería en Automática Industrial**  
Popayán, 2016

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION .....	10
1.1	ESTADO DEL ARTE .....	10
1.2	DESCRIPCION DEL PROCESO DEL CAFÉ .....	10
1.3	DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE TRASFORMACIÓN DEL CAFÉ .....	13
1.3.1	Productos derivados del café .....	15
1.4	SECADO TRADICIONAL .....	15
1.4.1	Secado en patio .....	16
1.4.2	Secador solar parabólico .....	16
1.5	SECADO ARTIFICIAL DE CAFE.....	17
1.5.1	Secadores Mecánicos de Flujos Concurrentes .....	17
1.5.2	Secadores mecánicos de capa estática .....	18
1.6	PROBLEMÁTICA DEL SECADO DEL CAFÉ.....	20
1.6.1	Recomendaciones para un secado de café óptimo .....	20
1.7	DESCRIPCION DEL PROCESO DE SECADO DEL CAFÉ .....	21
1.8	DESCRIPCION DE LAS PLANTAS DE SECADO DE CAFÉ .....	21
2.	IDENTIFICACIÓN DEL SECTOR CAFETERO EN LA REGIÓN DEL SUR OCCIDENTE CAUCANO .....	23
2.1	CREACIÓN DEL MARCO DE REFERENCIA .....	23
2.2	GENERALIDAD DE ACERCAMIENTO A LOS CAFICULTORES DE LA REGIÓN DEL SUR OCCIDENTE DEL CAUCA.....	23
2.2.1	Técnica e instrumento de recolección de información .....	23
2.2.2	Población .....	23
2.2.3	Ficha técnica.....	24
2.2.4	Construcción de cuestionario.....	24
2.2.5	Bases lógicas.....	24
2.2.6	Preguntas del cuestionario.....	25
2.2.7	Prueba piloto .....	28
2.2.8	Ubicación geográfica de las fincas seleccionadas .....	29
2.2.9	Análisis y conclusiones de la investigación .....	30
2.2.10	Experiencias proceso de entrevistas .....	37
2.3	MODELADO ISA 88.01 DEL SECADO DE CAFÉ EN LA REGION DEL SUR OCCIDENTE CAUCANO .....	37

2.3.9	Diagrama flujo de proceso de secado del café .....	38
2.4	Análisis de los modelos ISA S88.01 .....	39
2.4.9	Análisis general del modelo de proceso.....	40
2.4.10	Análisis general del modelo físico .....	40
2.4.11	Análisis general del modelo de control procedimental .....	40
2.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENTREVISTAS.....	41
2.5.9	Requerimientos en el aspecto administrativo .....	41
2.5.10	Requerimientos en el aspecto técnico .....	41
2.5.11	Requerimientos en el aspecto funcional.....	42
3	INGENIERIA BÁSICA .....	44
3.2	Cumplimiento de requerimientos técnicos del proceso de secado del café .....	44
3.2.1	Cumplimiento del requisito técnico 1 .....	44
3.2.2	Cumplimiento del requisito técnico 2 .....	48
3.2.3	Cumplimiento del requisito técnico 3, 4, 5 .....	49
3.2.4	Cumplimiento requisito técnico 5 .....	56
3.2.5	Cumplimiento del requisito técnico 6 .....	59
3.3	Cumplimiento de requerimientos administrativos del proceso de secado del café .....	61
3.4	Cumplimiento de requerimientos funcionales del proceso de secado del café .....	66
4	MEJORAS TECNICAS EN EL SECADO DE CAFÉ MECÀNICO .....	70
4.2	Silo secador capa fija (SSCF) y Silo secador tipo guardiola (SSTG) .....	70
4.2.1	Diseño y medidas del SSCF .....	70
4.2.2	Evaluación termodinámica SSCF .....	72
4.2.3	Diseño y medidas del silo secador tipo guardiola SSTG .....	83
4.3	Comparación de indicadores térmicos del SSCF vs SSTG .....	92
4.4	Secador guardiola con unidad intercambiadora de calor .....	93
4.4.1	Intercambiador.....	94
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	104

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de transformación de la cadena de valor del café.....	12
Figura 2 Secado en patio. ....	16
Figura 3 Secador solar parabólico o marquesina.....	16
Figura 4 componentes de un secador mecánico.....	17
Figura 5 Silo mecánico tipo guardiola. ....	18
Figura 6 Secador Intermitente de Flujos Concurrentes.....	18
Figura 7 Silo secador circular de café. ....	20
Figura 8 Silo secador jotagallo. ....	20
Figura 9 Partes de un secador de café. ....	22
Figura 10 Diagrama de flujo de proceso secado de café en silos mecánicos de capa estática .....	39
Figura 11 Diagrama de flujo de proceso secado de café en silo tipo guardiola ....	47
Figura 12 P&ID del proceso de secado en silo tipo guardiola .....	51
Figura 13 Controlador Micro PLC 850.....	54
Figura 14 Termocupla tipo K .....	54
Figura 15 Fuente de voltaje OMRON .....	55
Figura 16 Motor monofásico ½ Hp siemens unidad calefactora.....	55
Figura 17 Celda de carga mono bloque LEXUS.....	55
Figura 18 Motor monofásico 5Hp siemens unidad de secado.....	55
Figura 19 Ventilador extractor de aire SIEMENS .....	55
Figura 20 Modulo de pesaje WS HARDY PROCESS .....	55
Figura 21 Variador de velocidad 4M.....	55
Figura 22 Moto reductor NORD relación 300:1 .....	55
Figura 23 Módulo de termocupla de 4 canales 2085-IRT4.....	56
Figura 24 Rodamientos de soporte del cilindro .....	56
Figura 25 Diagrama de mando motor ventilador M_2 .....	57
Figura 26 Diagrama de potencia motor ventilador M_2.....	57
Figura 27 Diagrama de mando motor unidad secadora M_3 .....	58
Figura 28 Diagrama de potencia motor unidad secadora M_3.....	58
Figura 29 Vistas y medidas de la unidad de secado del SSCF. a) isométrica, b) frontal, c) lateral derecha, d) vista rejilla. ....	71
Figura 30 Distribución de temperaturas de la unidad de secado del SSCF. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) izquierda, f) isométrica 2. ....	73
Figura 31 Distribución de temperatura en las rejillas de la unidad de secado del SSCF. a) Vista normal b) Vista ampliada. ....	76
Figura 32 Distribución térmica del flujo de aire del SSCF. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) izquierda, f) isométrica 2. ....	79
Figura 33 Caja negra eficiencia global silo capa fija.....	83

Figura 34 Medidas de la unidad de secado del SSTG. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) superior. ....	84
Figura 35 Distribución de temperaturas de la unidad de secado del SSTG. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) isométrica 2, f) izquierda. ....	85
Figura 36 Vistas de la distribución térmica del flujo de aire del SSTG. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) izquierda, f) isométrica 2. ....	88
Figura 37 caja negra eficiencia global del SSTG.....	91
Figura 38 Intercambiador de calor en 3D. ....	94
Figura 39 Medidas del intercambiador de calor para el SSTG. a) isométrica intercambiador, b) isométrica tubo de cobre. ....	95
Figura 40 Vistas de distribución térmica de la temperatura del intercambiador de calor. a) isométrica tubo de cobre, b) isométrica laberinto, c) frontal, d) derecha, e) posterior, f) inferior. ....	96
Figura 41 Distribución térmica del intercambiador en paredes internas. a) vista isométrica, b) vista superior.....	98
Figura 42 Vistas de la distribución térmica del flujo de aire en el intercambiador de calor. a) vista superior (líneas), b) vista superior (esferas).....	99

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ficha técnica del proceso de acercamiento a caficultores. ....	24
Tabla 2 Preguntas del cuestionario no basadas en el marco de referencia .....	25
Tabla 3 Preguntas del cuestionario basadas en el ámbito de planificación empresarial.....	26
Tabla 4 Algunas de las preguntas del cuestionario reformuladas .....	29
Tabla 5 Identificación del ámbito Planificación empresarial .....	31
Tabla 6 Identificación del ámbito de Calidad.....	32
Tabla 7 Identificación del ámbito en mantenimiento.....	33
Tabla 8 Identificación del ámbito de planificación de producción .....	35
Tabla 9 Identificación del ámbito de inventario.....	36
Tabla 10 Identificación del ámbito Programación de la producción.....	36
Tabla 11 Entrada y salidas de flujos de materiales del secado de café en fincas del sur occidente caucano .....	38
Tabla 12 Características de los silos secadores de café para simulación Solid Works 2015. ....	44
Tabla 13 Modelo físico del silo secador de café tipo guardiola. ....	48
Tabla 14 Modelo físico del silo secador de café tipo guardiola con unidad intercambiadora.....	49
Tabla 15 Lista de elementos del silo tipo guardiola.....	51
Tabla 16 Instrumentación recomendada para el silo secador de café tipo guardiola .....	53
Tabla 17 Equipos e instrumentos recomendados para el silo secador tipo guardiola.....	54
Tabla 18 Lista de elementos electrónicos para los diagramas de mando y potencia motor M_2 .....	57
Tabla 19 Lista de elementos electrónicos para los diagramas de mando y potencia motor M_3 .....	59
Tabla 20 Lista de chequeo y mantenimiento para silo secador tipo guardiola .....	60
Tabla 21 Modelo físico general de un secador mecánico de capa fija .....	62
Tabla 22 modelo de control, de procedimiento genérico de un silo mecánico de capa fija .....	63
Tabla 23 Modelo control de procesos genérico de un silo mecánico de capa fija .	64
Tabla 24 Modelo físico del silo secador de café tipo guardiola con unidad intercambiadora.....	66
Tabla 25 Modelo de control de procesos del secado de café en silo tipo guardiola .....	67
Tabla 26 Modelo de control de procedimiento secado de café en silo tipo guardiola .....	68

Tabla 27 Características de los silos secadores de café para simulación Solid Works 2015. ....	70
Tabla 28 Medidas usadas en la simulación del SSCF. ....	71
Tabla 29 Temperaturas características en las paredes de la unidad de secado del SSCF.....	75
Tabla 30 Eficiencia térmica de las caras de la unidad de secado del SSCF.....	75
Tabla 31 temperaturas características de las rejillas del SSCF. ....	78
Tabla 32 Eficiencia térmica de las rejillas del SSCF. ....	78
Tabla 33 Temperaturas características del flujo de aire del SSCF.....	81
Tabla 34 Eficiencia térmica del flujo de aire del SSCF.....	81
Tabla 35 Medidas usadas en la simulación del SSTG. ....	84
Tabla 36 Temperaturas características del cilindro interno del SSTG.....	87
Tabla 37 Eficiencia térmica en el cilindro interno del SSTG.....	87
Tabla 38 Temperaturas características del flujo de aire SSTG. ....	90
Tabla 39 Eficiencia térmica del flujo de aire del SSTG.....	90
Tabla 40 Indicadores térmicos del SSCF y SSTG.....	92
Tabla 41 Medidas usadas en la simulación del intercambiador de calor.....	95
Tabla 42 Eficiencias térmicas del intercambiador de calor.....	99
Tabla 43 Valores de temperatura de la salida y entrada del flujo de aire. ....	100

**TABLA DE GRAFICAS**

Grafica 1 Temperatura de las cuatro caras de la unidad de secado del SSCF. ....	74
Grafica 2 Distribución térmica de temperatura de la rejilla 1. ....	76
Grafica 3 Distribución térmica de temperatura de la rejilla 2. ....	77
Grafica 4 Temperatura del flujo de aire de la unidad de secado del SSCF. ....	80
Grafica 5 Temperatura de salida del flujo de aire en la chimenea del SSCF. ....	82
Grafica 6 Temperatura del contorno de las perforaciones en el cilindro interno del SSTG. ....	86
Grafica 7 Temperatura del flujo de aire dentro del cilindro del SSTG. ....	89
Grafica 8 Temperatura de salida del flujo de aire en la chimenea del SSTG. ....	92
Grafica 9 Temperatura del intercambiador en el tubo de cobre. ....	97
Grafica 10 Temperaturas de las caras del intercambiador de calor. ....	98

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 ESTADO DEL ARTE**

Desde el año 1990 se han venido incrementado y mejorando los estudios acerca del proceso del café [1], este producto ha venido llamando la atención de muchas partes del mundo, obligando así a Colombia a mejorar los productos derivados del café [2], y generando recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores de café [3], para tener una calidad alta en el proceso de secado del café, se plantearon estudios relacionados al cálculo del flujo másico de aire [4], [5], esto permite modelar [6], caracterizar y obtener curvas [7] de temperatura y humedad durante el secado del café [8] [7], además se complementan con estudios de simulación en herramientas software [9], que permiten observar el comportamiento mecánico de un silo de café, y las variables presentes durante el proceso de secado, también de modelar la estructura física del grano de café [10], esto permite conocer más específicamente la dinámica de la transferencia de calor y la pérdida de humedad del café [11].

Durante el periodo de auge del café desde 1992, se han construido silos secadores de café de diversos tamaños y formas como por ejemplo, [12] desarrollo un diseño de un sistema con lógica difusa para realizar el control interno de la presión de aire de un silo de café que emplea energía solar, o la modificación de un carro secador artesanal [13], [14] simulo y diseño un silo secador de café electromecánico, desde ahí se parte de una base, que permite a los caficultores producir más café en menos tiempo, sin la preocupación de que su cosecha se pierda por falta de sol, o espacio. Gracias al ingenio y estudios de las personas que comercializan equipos para el beneficio del café, se desarrollaron dos tipos de silos secadores, [15] y [16].

El secado en lecho fijo [15], me permite depositar en varias bandejas una determinada cantidad de café, el flujo de aire caliente no es uniforme, lo cual no garantiza un secado parejo, el secado en silo tipo guardiola [17], permite depositar el café en un área cilíndrica, con movimiento constante, mejorando la uniformidad de flujo de aire caliente y aumentando la calidad del grano seco.

### **1.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DEL CAFÉ**

Los procesos de producción de alimentos exigen cada vez el uso de tecnologías que permitan obtener productos de excelente calidad y con costos relativamente bajos [16]. Estos procesos requieren el uso de maquinaria especializada que no siempre está al alcance de los pequeños productores [18].

La situación de nuestro país en el área agrícola no escapa de esta realidad. Las técnicas, máquinas y herramientas usadas por los pequeños y medianos productos nacionales son muchas veces rudimentarias lo que se traduce en una

baja producción con costos relativamente altos que obliga en algunas oportunidades a importar productos [16].

La producción de café en Colombia, es un ejemplo claro de la situación planteada. Las rudimentarias técnicas usadas en la producción de café sumado, los bajos precios y un incremento del consumo han obligado al estado colombiano a aumentar las inversiones en este sector. Dichas inversiones han sido destinadas a los pequeños y medianos productores que representa más del 60 % de la producción nacional del grano y que por mucho tiempo han sido los menos asistidos [16].

Son pocas las investigaciones asociadas a la optimización de la cadena del café en el medio colombiano y mundial. Dentro de estos trabajos se incluyen dos: por un lado [1], quienes presentan un modelo bipropósito de la cadena de abastecimiento del café en Colombia, cuyos objetivos son minimizar y maximizar el servicio. Por otro, [19], quienes presentan una técnica que permite integrar las variables cuantitativas y cualitativas que conforman un problema de naturaleza estocástica.

Para una mayor comprensión del proceso del café, en la figura 1 se presenta un resumen del proceso de transformación y los agentes involucrados en cada etapa.

## Etapas de transformación de la cadena de valor del café

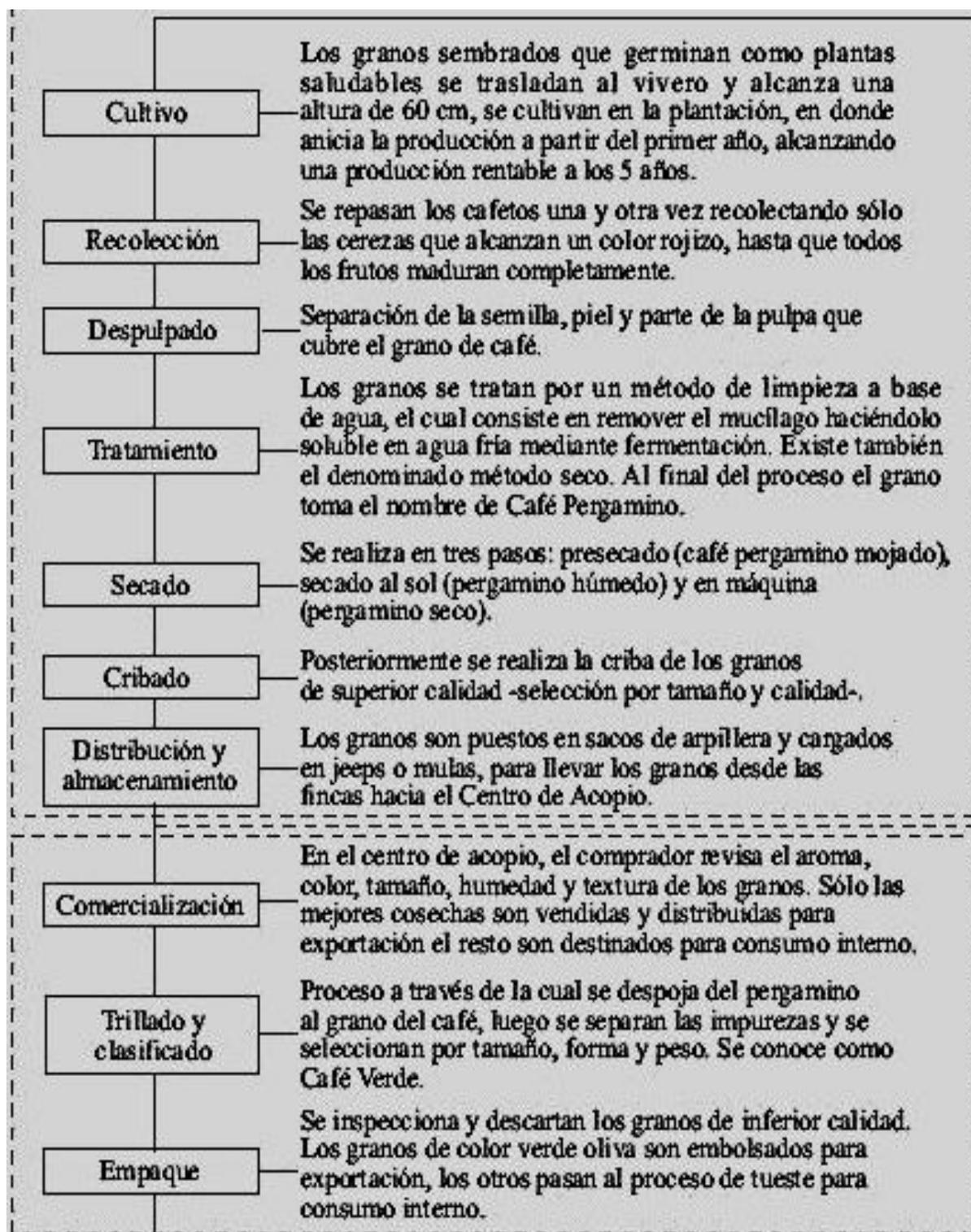


Figura 1. Fuente tomada de [1]

### 1.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE TRASFORMACIÓN DEL CAFÉ

La cadena de abastecimiento agroindustrial del café está constituida por una serie de etapas que conforman su proceso de transformación desde el cultivo hasta el café procesado, ver figura 1: cultivo, recolecta, despulpado, descascarado, lavado y limpiado de grano entero y separación de las dos mitades, etapa en la cual el grano es conocido como pergamino, en pre secado, café pergamino mojado y secado al sol y en máquina pergamino seco [1], [20]. A continuación se describen las etapas involucradas:

- **Cultivo:** las zonas tropicales reúnen las características propicias para el cultivo del café. El cafetal exige un clima caluroso y húmedo, a temperaturas constantes (20 - 23 °C) y precipitaciones que varíen entre 1.500 y 1.800 milímetros por año. Las plantaciones están situadas en la montaña o en mesetas, para la especie arábica, o en las planicies o llanuras, para la especie robusta. El cultivo de café en Colombia inicia en el vivero, donde se plantan los granos cuidadosamente seleccionados. Estos se siembran cerca los unos de los otros y se cubren con tierra rica y fértil. Unas ocho semanas más tarde, las semillas germinan y las raíces se desarrollan. Las plantas más saludables son seleccionadas y trasplantadas en el vivero, donde se les nutre cuidadosamente durante seis meses. Cuando los brotes alcanzan una altura de aproximadamente sesenta (60) centímetros, son trasplantados a la plantación, donde se cultivan con cuidado. Cada árbol de café produce una libra (455 gramos) en promedio de café en un año [1].
- **Recolección:** para la especie arábica ocurre de 6 a 8 meses después de la floración y para la especie robusta el evento ocurre entre 9 a 11 meses después de la floración. La recolección de los granos de café es un proceso largo y minucioso. Primero han de madurar las cerezas hasta que alcancen un color rojizo y luego los recolectores repasan los cafetos y recolectan una a una las cerezas maduras; así, el proceso se alarga hasta que todos los frutos maduran completamente [1].
- **Despulpado:** en este proceso se realiza la separación de la pulpa y las semillas que se encuentran en el centro de cada cereza, mediante una máquina despulpadora[1].
- **tratamiento:** los granos, aún envueltos en una dura cáscara apergaminada, son puestos en enormes tanques de concreto. Allí se colocan en remojo en agua fría de montaña durante 24 horas. El remojo provoca una suave fermentación, vital para el aroma del café. Durante este proceso se separa la pulpa y se seleccionan los granos [1].

- **Secado:** los granos son recogidos y puestos en grandes canastas de mimbre, luego son esparcidos en grandes terrazas al aire libre, donde se les da vuelta una y otra vez hasta que el sol y el aire los seca. Este proceso se realiza en tres pasos: presecado (café pergamino mojado), secado al sol (café pergamino húmedo) y en máquina (café pergamino seco). Es necesario cubrir los granos cuando llueve y durante la noche para que no absorban humedad. Posteriormente se realiza la criba de los granos de calidad superior [1].
- **Distribución:** los granos son puestos en sacos de arpillera y cargados en campesinos. En algunas regiones, las mulas aún son importantes medios de transporte para llevar los granos desde las fincas hacia el mercado [1].
- **Comercialización:** el comprador los revisa para comprobar el aroma, el color, el tamaño, la humedad y la textura del café verde. Solo las mejores cosechas son vendidas y distribuidas para exportación, el resto son destinados para el consumo interno [1].
- **Trillado y clasificado:** los granos de café verde son luego llevados al molino, donde son introducidos en máquinas que les quitan la cáscara apergamina y plateada que envuelve a cada grano. Los granos son sometidos a varios procesos, en los cuales son separados de todas las impurezas y seleccionados por tamaño, forma y peso [1].
- **Empaque:** en esta etapa es crucial llevar a cabo una inspección y descartar los granos de inferior calidad. A partir de ese momento, los granos de color verde oliva están listos para ser embolsados y sellados para exportación [1].
- **Sello de aprobación:** la entidad encargada del aseguramiento de los estándares de calidad del café (Federación Nacional de Cafeteros para Colombia [Federacafe]) se reserva el derecho de otorgar su sello de aprobación antes de que las bolsas sean selladas. El proceso se divide en dos: inicialmente una muestra es extraída, pesada y calificada, momento en que ocurre una primera selección; luego se obtiene otra muestra de los sacos obtenidos de la primera escogencia, que es tostada, molida y degustada en una taza de café debidamente preparada. Los expertos dan puntaje por aroma, acidez y uniformidad. Si los expertos no están satisfechos con la calidad de una cosecha en particular, es rechazada para su exportación [1].
- **Regulación:** la realizan entidades que intervienen en el mercado cafetero interno y externo con el fin, no solo de promover el consumo del producto, sino de regular la oferta y la demanda del café y así buscar un régimen estable de precios. El precio interno al productor del café es un precio de sustentación que se fija por concertación entre las organizaciones de apoyo

del sector y el gobierno nacional de un país. Desde un punto de vista técnico, las prácticas inadecuadas durante el secado del café pueden causar 10 de los 14 defectos establecidos por los estándares de calidad aplicados al Café de Colombia. Estos parámetros exigen un contenido de humedad entre 10 – 12 % en los granos, con el fin de asegurar la calidad establecida para comercializar un producto excelso [1].

### 1.3.1 Productos derivados del café

De cada una de las etapas de transformación presentadas [1] se obtiene una forma o estado del café, para ser comercializado. Los siguientes son algunos de los productos que se obtienen durante el proceso de beneficio del café.

- **Café pergamino:** es el fruto del cafeto compuesto por la semilla, desprovista del pericarpio y mesocarpio. Este producto se obtiene al finalizar el proceso denominado tratamiento. El café pergamino es la materia prima de entrada para el proceso de secado.
- **Café verde:** es el grano o almendra de café libre de las capas que lo recubren; es el producto que se obtiene del proceso de trillado, mediante el cual se descascara el café pergamino, se limpia o eliminan impurezas, se clasifica el grano (por tamaño, densidad y color) y se pule para eliminar el episperma o película plateada.
- **Café tostado:** el café verde es sometido al proceso de torrefacción para que sea apto en la preparación de la infusión y desarrolle su aroma y sabor. Cada clase de grano tiene un tiempo y tipo de tostados óptimos, cuyas variaciones alteran el sabor final. Se pueden distinguir tres tostados distintos: claro (de delicado sabor), mediano (de sabor fuerte) y oscuro (elimina la acidez y confiere un sabor amargo).

## 1.4 SECADO TRADICIONAL

El método de secado solar se practica desde el principio en que se inició la producción de café en Colombia, y todavía se utiliza básicamente el mismo procedimiento, casi no ha cambiado durante los años y no se espera que cambie en el futuro, porque la utilización de la energía es muy buena y los costos de los equipos utilizados son razonablemente bajos, principalmente para los pequeños productores de la región del Cauca.

A continuación se presentan los tipos de secado más tradicionales utilizados en la región del sur occidente del Cauca.

### 1.4.1 Secado en patio

En este método de secado, el café se distribuye en patios de cemento o ladrillo, en capas de aproximadamente 3,5 centímetros de alto, que es el equivalente a 1 arroba (11.3 kg) de café pergamino seco por metro cuadrado. Los patios deben tener una leve inclinación, y sobretodo ser completamente planos para evitar el encharcamiento. ver figura 2 [21].

Secado en patio.



Figura 2. Fuente tomada de <http://www.coffeeiq.co/>

### 1.4.2 Secador solar parabólico

Esta es una forma muy práctica (alta eficacia física, bajos costos y fácil manejo del proceso) para utilizar la radiación y la energía del aire en el secado del café. Consiste de un techo plástico transparente y una estructura rústica en guadua de forma parabólica, que permite aprovechar mejor la radiación difusa, durante los días pocos soleados o lluviosos y la radiación directa durante las horas del sol, ver figura 3 [22].

Secador solar parabólico o marquesina.



Figura 3. Fuente tomada de <http://www.coffeeiq.co/>

## 1.5 SECADO ARTIFICIAL DE CAFE

El secado en silo es una alternativa apropiada cuando el flujo de café y las condiciones climáticas del lugar no permiten emplear secadores solares en forma económica y segura. El promedio del costo de secado de café asciende a \$ 751 por arroba de café pergamino seco (c.p.s.). Para su disminución debe darse especial énfasis a la selección de la tecnología, al manejo del equipo y al combustible a utilizar, el cual representa en promedio el 75 % de los costos del secado en silos[23].

Un secador mecánico consta de una, dos o tres cámaras con piso perforado, donde se deposita el café, un calentador del aire indirecto, un ventilador que entrega el caudal de aire para el secado del café y un dispositivo para el suministro de combustible (Carbón, cisco, o madera), Ver figura 4. Adicionalmente, cuenta con dispositivos como termostato y termómetro para lograr que en secadores de capa fija, la temperatura del aire de secado se mantenga en el rango adecuado para café, entre 48 y 52°C[23].

Componentes de un secador mecánico.

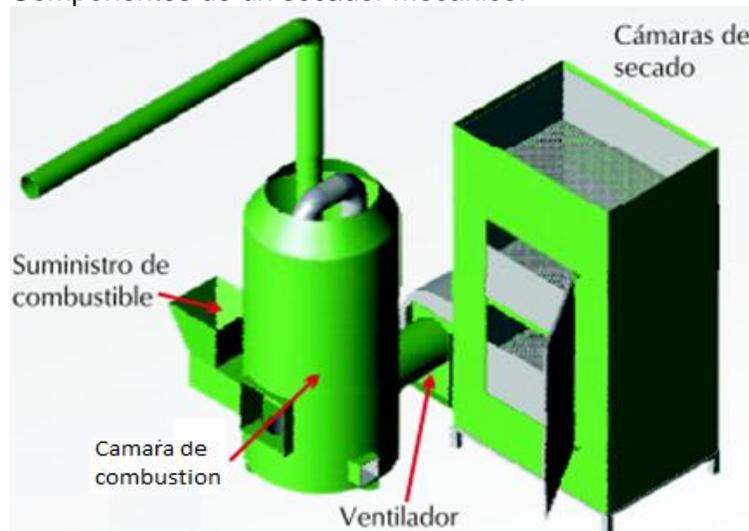


Figura 4. Fuente tomada de [23]

### 1.5.1 Secadores Mecánicos de Flujos Concurrentes

Los secadores mecánicos intermitentes de flujos concurrentes (IFC) son aquellos secadores en los cuales el café está en constante movimiento durante el proceso de secado. Los secadores de flujo concurrente de café fueron utilizados en Colombia desde hace más de tres décadas y uno de los primeros que se usaron fueron los secadores rotatorios tipo guardiola.

Los secadores tipo guardiola constan de un cilindro en forma horizontal, el cual gira alrededor de su eje continuamente manteniendo los granos en su interior, levantándolos hasta dejarlos caer por gravedad desde la parte superior, por medio de palas metálicas empotradas en la parte interna del cuerpo al cual se le inyecta aire caliente por medio de un tubo perforado coaxial al eje del cilindro, ver figura 5.

Para facilitar la evacuación del aire húmedo se perforaban las paredes externas del cilindro, este no posee un sistema de control que nos permita regular la velocidad, así que, si la velocidad es mucha el grano de café se podría triturar generando la parada del proceso, dejan así el grano trillado y sin haber obtenido el porcentaje de humedad adecuado, también se presenta la dificultad de acceder al grano para verificar si ya tiene la humedad requerida [16].

El segundo modelo creado en la década del 80, un secador intermitente de flujos concurrentes de disposición horizontal el cual consta, en su estructura básica, de dos partes principales: la cámara de secado y la cámara de reposo. La cámara de secado se divide en dos, inferior y superior. La masa de granos recibe aire caliente por medio de un sistema de calefacción con cangilones que realizan el movimiento al grano de café, la entrada del aire caliente se alterna por varios conductos dispuestos en la cámara de secado, así se puede dar una uniformidad en el grano de café, en este modelo la forma del silo es similar a una edificación con varias salidas o chimeneas, las cuales evacuan el aire con humedad, este silo, puede secar grandes cantidades de café ya que su tamaño es bastante grande, pero se pueden presentar dificultades al generar la energía suficiente para calentar el aire, ya que no posee un control de la temperatura inyectada en los recintos, ver figura 6 [24].

Silo mecánico tipo guardiola.



Figura 5. Fuente tomada de [www.bendig.co](http://www.bendig.co)

Secador Intermitente de Flujos Concurrentes.



Figura 6. Fuente tomada de [repositorio.utp.edu.co](http://repositorio.utp.edu.co)

### 1.5.2 Secadores mecánicos de capa estática

Los secadores más utilizados por los caficultores en Colombia actualmente son los silos de capa fija, el más popular es un diseño de Cenicafé construido en el año de 1991, actualmente no ha sufrido cambios en su diseño [13], su proceso de secado es el siguiente; el grano se deposita en una cámara de secado, provisto de un piso construido en lámina metálica perforada y el aire lo atraviesa en una o alternativamente en dos direcciones. Pero antes dicho aire debe ser calentado en

un intercambiador de calor hasta llevarlo a una temperatura de 50°C (incluso a veces es permisible una temperatura máxima 54 °C pero no es recomendable por razones físicas del grano) y luego impulsarlo con una determinada presión por un ventilador, generalmente centrifugo, el cual debe vencer la resistencia al paso del aire que produce la masa de café [15]. Los primeros silos de capa estática fueron registrados en una investigación por Cenicafé realizada en el año 1968.

Los secadores de capa fija en los cuales el aire atraviesa la masa de café en una sola dirección, producen un gradiente muy marcado de humedad a lo largo de toda la capa. Para el caso del café pergamino esta diferencia de humedad es todavía más grande debido al alto contenido inicial de humedad del café con relación a los demás cereales [15]. En los estudios realizados en Cenicafé en los años 90, se indicaba que al secar café en un silo secador de capa fija de 0,40 m, sin invertir la dirección del flujo de aire, con temperaturas de aire de 50°C y un caudal de 60 m<sup>3</sup>/min-Ton CPS, después de 26 horas de secado, las diferencias en el contenido de humedad entre las capas extremas fueron del 13 %, mientras que la humedad promedio de los granos era de 17 % [25].

Para el silo de capa estática, Cenicafé estableció un caudal recomendado de 100 m<sup>3</sup>/min-Ton, una altura de capa de grano de 0,35 m para secador de dos capas y 0.25 m para secador de tres capas con el fin de disminuir el tiempo de secado de hasta 18 a 24 horas y a su vez que el secado sea uniforme para toda la carga a secar. Para lograr una disminución considerable en el gradiente de humedad en la capa estática del café se ha demostrado valida la opción de invertir la dirección del sentido del aire en la capa, a intervalos de 6 a 12 horas, de forma que se disminuye efectivamente el sobre secado en los granos que reciben el aire con mayor temperatura [4] [26].

Un secador de capa fija circular, describe una forma cilíndrica, con perforaciones en la parte superior e inferior, para permitir la circulación del aire, posee compuertas en su costado para acceder a dos bandejas, las cuales almacenan la masa de café, estas bandejas están perforadas con pequeños círculos, que permiten el paso de aire caliente. La unidad de calor genera la energía necesaria para calentar el aire y ser inyectada al cilindro por un conducto inferior, y por ultimo un ventilador el cual impulsa el aire caliente de la unidad de calor hacia la unidad de secado, ver figura 7.

El silo secador rectangular, es similar al descrito anteriormente, solo cambia su forma y tamaño de la unidad de secado, también se puede apreciar que este secador funciona con un material combustible de cisco, y posee una sola compuerta en su costado para introducir el café a secar. El material de combustión que utilizan las unidades de calor son combustibles como carbón mineral, gas o petróleo, y el mejor de todos cisco (cascara de café seca), ver figura 8.

Silo secador circular de café.

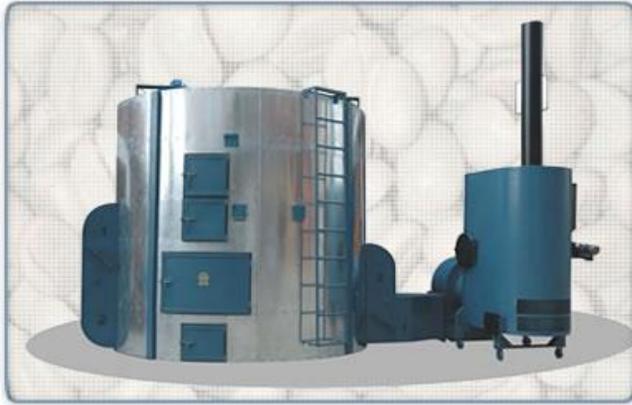


Figura 7. Fuente tomada de ingesecltda.com

Silo secador jotagallo.



Figura 8. Fuente tomada de jotagallo.com

## 1.6 PROBLEMÁTICA DEL SECADO DEL CAFÉ

No todos los cafés son iguales, y las circunstancias varían de un país a otro, en consecuencia, se generan inconvenientes al obtener un café de alta calidad. En general, un grado de 11 % de humedad es probablemente un buen objetivo para la mayoría de cafés. Además de una pérdida posterior de calidad de la bebida, un secado insuficiente puede producir mohos, que es un caso muy grave si se presenta en el café. Un almacenaje y secado limpios, adecuados y eficientes del café son probablemente la mejor defensa contra la aparición de mohos y sus posibles consecuencias. El exceso de secado cuesta dinero. Esto hace que sea tan grave como un secado insuficiente: no solo se pierde peso, y por lo tanto dinero, sino que también se traduce directamente en una calidad inferior de la infusión. Cuando la humedad baja más del 10 %, el aroma, la acidez y la frescura empiezan a evaporarse y con una humedad del 8 % o menos, estas han desaparecido completamente. El café poco seco, al igual que el café demasiado seco, no debería mezclarse con café secado correctamente. No son compatibles.

El secado excesivo también afecta el tostado del café. El café con un grado de humedad de hasta solo el 8 % puede sorprender a los tostadores de cafés especiales. El secado es la etapa más delicada e importante del beneficio del café, por lo que se debe tener cuidado para conservar la calidad.

### 1.6.1 Recomendaciones para un secado de café óptimo

En general las recomendaciones para un secado de café aceptable y que cumpla con las mínimas características establecidas para su posterior venta a los compradores de café o trilladoras comerciales se listan a continuación [2]:

1. Inicie el secado del café inmediatamente después del lavado.

2. El secado del café convierte el café lavado en un producto estable, almacenable y duradero.
3. Sí utiliza silos, la temperatura del aire no debe pasar de 50°C.
4. El aire de secado a temperaturas de 55°C o más deteriora la calidad del café.
5. Evite interrumpir el proceso de secado del grano.
6. El café húmedo es atacado por hongos que causan taza de café con fenol o químico.
7. La humedad final del café pergamino debe estar entre el 10 % y el 12 %.

## **1.7 DESCRIPCION DEL PROCESO DE SECADO DEL CAFÉ**

El secado de Café mecánico se realiza en cámaras, en las cuales se introduce aire caliente, a una temperatura aproximada de 50°C, este aire caliente atraviesa la masa de café, que es impulsado por un ventilador, el cual extrae este aire caliente de una recamara ubicada al lado del silo, esta recamara es calentada con quemadores de gas, ACPM, termo resistencias alimentadas eléctricamente o carbón mineral.

Este proceso demora entre 25 y 30 horas, ayudado de una persona que está pendiente de que la recamara de aire caliente siempre este alimentada de combustible o algún material, también se debe estar revisando periódicamente el café dentro del silo, se extrae una pequeña cantidad de café y se procede a trillarlo (manualmente), observar su color y dureza para “determinar” el porcentaje de humedad presente en el grano, garantizando el secado optimo del café.

El encargado del secado debe retirar el café antes de que el grano alcance la humedad apropiada (10 % al 12 %), ya que el café al irse enfriando sigue perdiendo humedad, esto se aprende con la experiencia de años en la práctica de este proceso, muchas veces el café no alcanza este punto de humedad, así que el grano muchas veces queda por debajo del porcentaje de humedad óptimo. (Entrevista al extensionista del comité nacional de cafeteros, seccional Timbío, Regulo Guzmán Manquillo)

## **1.8 DESCRIPCION DE LAS PLANTAS DE SECADO DE CAFÉ**

Un silo secador de café, se compone principalmente de 3 estructuras, que son: la cámara plenum, encargada de contener el café y mantener el aire caliente dentro de su estructura. La segunda es el ventilador, que tiene la tarea de extraer aire caliente y hacerlo circular hacia la cámara plenum, este flujo másico de aire que mueve el ventilador, debe ser calculado cuidadosamente, para evitar que se produzca un secado no uniforme en el grano de café, y por último tenemos el calentador de aire, compuesto por un elemento que genera una diferencia térmica,

y alimentado por una masa (gas, ACPM, carbón, cisco) que le permite realizar esta tarea, ver figura 9.

Partes de un secador de café.

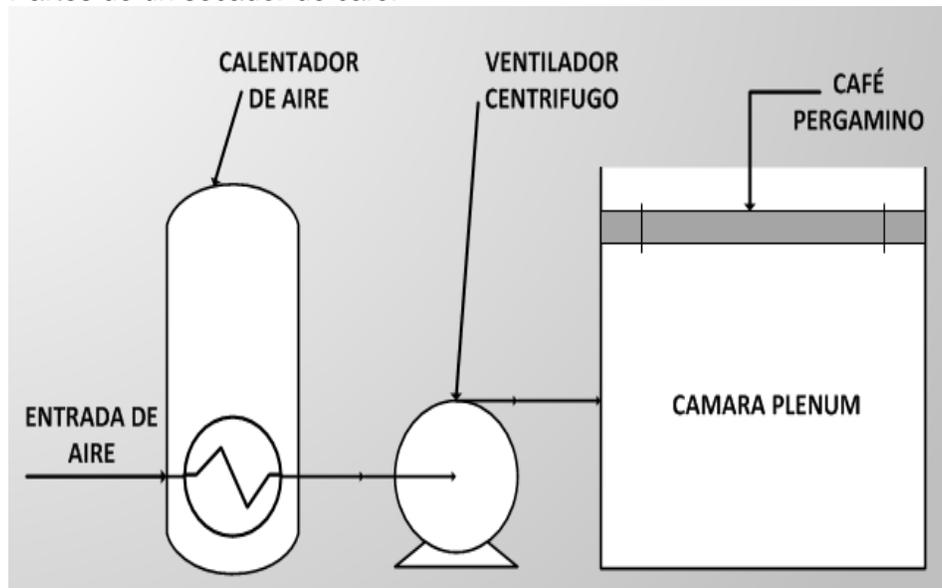


Figura 9 Figura adaptada de dialnet.unirioja.es

## **2. IDENTIFICACIÓN DEL SECTOR CAFETERO EN LA REGIÓN DEL SUR OCCIDENTE CAUCANO**

### **2.1 CREACIÓN DEL MARCO DE REFERENCIA**

Este proyecto de grado atiende la necesidad de organizar y consolidar la actividad cafetera en la región del sur occidente del Cauca, Popayán, la cual requiere mejorar, adaptar y desarrollarse dentro de un mercado globalizado y dinámico, que exige productos con altos niveles de calidad y fincas de adaptación y respuesta rápida ante las necesidades del entorno. Para dar cumplimiento a este objetivo se usan herramientas conceptuales de integración y organización empresarial que abordan las actividades y funciones de una empresa de manufactura (ver anexo “Creación del marco de referencia”).

### **2.2 GENERALIDAD DE ACERCAMIENTO A LOS CAFICULTORES DE LA REGIÓN DEL SUR OCCIDENTE DEL CAUCA**

#### **2.2.1 Técnica e instrumento de recolección de información**

Para la recolección de información proporcionada por los caficultores se utilizó la técnica de entrevista, acompañada de un cuestionario estructurado como instrumento. El cuestionario se construyó a partir de algunas de las actividades del estándar ISA-95, como son: planificación empresarial, planificación de la producción, calidad y mantenimiento. Estas actividades nos permiten recolectar la información necesaria para el proyecto de optimización del silo secador de café.

#### **2.2.2 Población**

La población objeto de estudio son las fincas cafeteras de la región del sur occidente del Cauca (Timbío). Dado que no existe una fuente secundaria que contabilice la cantidad de estas, se solicitó al Comité Nacional De Cafeteros, seccional Timbío (FNC) la lista de fincas registradas en esa región, las cuales contarán con más de 4 hectáreas y que se consideran aptas para realizar una entrevista, además de tener un silo mecánico para secar café en la finca. De lo anterior, resultó una población de 52 fincas (ver anexo B “Listado de las fincas preseleccionadas de la región del sur occidente caucano”), de las cuales se seleccionó una muestra de 15 donde se incluyeron fincas de tamaño mediano y grande, que variaban de 4 a 100 hectáreas sembradas de café. Este grupo de fincas cafeteras se escogió teniendo en cuenta disponibilidad de tiempo y equipo utilizado para el secado de café. Este último implica el tipo de silo mecánico que

utiliza la finca (silo de capa estática, o silo de flujos concurrentes), tipo de producto (café pergamino seco) y tipo de unidad productiva (café seco 10 %-11 % b.h).

### 2.2.3 Ficha técnica

La ficha técnica del proceso de acercamiento a caficultores de la región del sur occidente caucano se presenta en la tabla 1.

Tabla 1 Ficha técnica del proceso de acercamiento a caficultores.

GENERALIDADES	
Tipo de investigación	Investigación exploratoria
Técnica de recolección de datos	Entrevista
Instrumento de recolección de datos	Cuestionario estructurado
DE LOS ENTREVISTADOS	
Numero de entrevistados	15
Heterogeneidad de los entrevistados	Por tipo de producto Por ubicación geográfica Por similitud en maquinaria de secado
DE LAS ENTREVISTAS	
Tiempo estimado	30 minutos
TIEMPOS DE LA INVESTIGACION	
Elaboración del cuestionario	Marzo/abril/ 2016
Prueba piloto y ajuste de cuestionario	abril 2016
Trabajo de campo, obtención de citas y aplicación de encuestas	Mayo/junio 2016
Tabulación y ajustes de resultados	Junio 2016
Redacción y análisis de resultados	Junio/julio 2016

### 2.2.4 Construcción de cuestionario

Para el proceso de construcción del cuestionario se siguieron los siguientes pasos [27]:

1. Determinar bases lógicas
2. Formular preguntas
3. Realizar prueba piloto

### 2.2.5 Bases lógicas

Una base lógica es una “cuestión a comprobar” [27], para este trabajo de grado, las bases lógicas son cuestiones a comprobar. Las bases lógicas no se preguntan directamente a los entrevistados dadas las siguientes razones:

- Dificultades tipo lingüístico: las bases lógicas podrían ser interpretadas equivocadamente.

- Preguntar con un lenguaje familiar facilita que los entrevistados expresen sus opiniones, sin temor a equivocarse y sin ser juzgados de algún contexto.
- Teniendo en cuenta la gran cantidad de preguntas por recolectar, se debe preguntar con un lenguaje familiar, utilizar léxico que manejan los caficultores, y evitar que el entrevistado se aburra con la entrevista.
- El deseo de prestigio o la vergüenza podrían ocasionar respuestas falseadas.

### 2.2.6 Preguntas del cuestionario

Se determinaron tres tipos de preguntas:

1. Preguntas de apertura
2. Preguntas no basadas en el marco de referencia
3. Preguntas basadas en el marco de referencia

Las preguntas de apertura son abiertas, buscan romper el hielo e iniciar una conversación fluida con el entrevistado. Las cuales son:

- ¿Qué tamaño tiene su finca?
- ¿Por qué cultiva café en su finca?
- ¿Qué tipo de variedad de café cultiva?

Las preguntas no basadas en el marco de referencia buscan recolectar datos generales del encuestado y la empresa, ver tabla 2.

Las preguntas basadas en el marco de referencia son preguntas cerradas. A excepción de las preguntas de apertura, cada pregunta proviene de una base lógica, ver tabla 3.

Tabla 2 Preguntas del cuestionario no basadas en el marco de referencia

BASE LÓGICA (cuestión a comprobar)	PREGUNTA DEL CUESTIONARIO
¿Se tiene conciencia del concepto "razón social"?	¿Cuál es el nombre de la finca?
	¿Qué tamaño en hectáreas tiene su finca?
	¿Qué tipo de variedad de café cultivan en su finca?
¿Motivos o razones por las cuales cultivan café en sus fincas?	¿Porque cultiva café en su finca?
	¿Le es rentable cultivar café?
¿Durante cuánto tiempo se desarrolló la actividad informalmente? ¿Qué motivo a formalizarla?	¿Cuál fue la fecha de inicio de la actividad cafetera?
	¿Cuál fue la fecha de registro de la actividad en el comité de cafeteros?

¿Se ha desarrollado la actividad de forma ininterrumpida?	¿Cuál fue la fecha de reinicio de la actividad cafetera? (Si aplica)
¿Por qué razón se interrumpió el desarrollo de la actividad? (Si aplica)	¿Ha desarrollado la actividad cafetera de forma ininterrumpida?
	¿Ha desarrollado la actividad cafetera de forma ininterrumpida?
¿Qué se entiende por el concepto "empresa familiar"?	¿Son una empresa familiar?
¿Cuál es el tamaño de la empresa en cuanto a número de empleados vinculados?	¿Qué número de empleados permanentes y temporales maneja?
A nivel económico, ¿Qué representaba la finca en sus inicios?	En sus inicios ¿Qué representaba la finca económicamente para usted?
	¿Actualmente, que representa la finca para usted?

Tabla 3 Preguntas del cuestionario basadas en el ámbito de planificación empresarial

BASE LOGICA (cuestión a comprobar)	FUNCION/SUBFUNCION DEL AMBITO	PREGUNTA DEL CUESTIONARIO
¿Es claro quién está a cargo de la empresa?	Función: análisis de la empresa.  Subfunción: definición del perfil gerencial.	¿Quién gerencia o administra la finca?
¿Cómo está conformado el equipo gestor de la gerencia?		¿Cómo está conformada la gerencia? (persona a cargo de la finca)
¿Cuál es el nivel de formación del gerente?		Si está claramente definido quién es el gerente (persona a cargo de la empresa), ¿de qué áreas tiene conocimientos?
¿Están definidas las funciones del gerente?		Si está claramente definido quién es el gerente (persona a cargo de la empresa), ¿cuáles son sus funciones?
¿Están definidas la misión y visión de la empresa?	Función: análisis interno de la empresa Subfunción: definición de la filosofía empresarial	¿Está definido el propósito de la finca (empresa)?
		¿Cómo proyecta su finca en 3, 5, y/o 10 años?
¿Cuál es el estado del análisis DOFA?	Función: análisis interno de la finca Subfunción: análisis DOFA	¿Qué factores externos han afectado o están afectando negativamente su actividad?
¿Se conoce los costos de producción del café?	Función: planificación estratégica de la	¿Sabe cuál es el tiempo necesario para que una carga

	producción Subfunción: definición de la actividad económica.	de café en el silo este seco? ¿Sabe cuál es el costo de producir una libra de café en su finca?
¿Se tiene conocimiento de la capacidad instalada (capacidad de equipos y personal)?	Función: análisis interno de la finca	¿Realiza un pronóstico de producción de café por cosecha? ¿Sabe cuál es su capacidad de producción máxima de café por año? ¿Cuál es el tipo o tipos de secado implementado o usado en su finca? ¿Con que maquinaria cuenta la finca? ¿Conoce las características de las máquinas que posee? (máx. tiempo de trabajo continuo, frecuencia de mantenimiento, velocidad, etc.) ¿Tiene calculada su capacidad de producción máxima? (Es decir, la cantidad máxima de café que puede producir considerando sus instalaciones, equipo y personal). ¿Maneja inventarios?
¿Maneja el concepto de calidad dentro de su empresa?	Función: análisis interno de la finca  Subfunción: manejo de calidad en el producto	¿Verifica la calidad del café al terminar su proceso de secado? ¿Utiliza métodos o procedimientos para garantizar la calidad del café? ¿Los métodos que utiliza para garantizar la calidad del café dan resultado, y se reflejan en el precio que recibe a la hora de venderlo? ¿Utiliza algún tipo de servicio de laboratorio para medir la calidad del café seco?

¿Maneja el concepto de mantenimiento?	Función: análisis interno de la finca  Subfunción: mantenimiento de equipos	¿Realiza revisiones periódicas del estado de la maquinaria utilizada para el proceso de secado del café?
		¿Qué tipo de silo secador utiliza en su finca cafetera?
		¿Cuál es la capacidad máxima de carga de café en su silo de café?
		¿Recibió alguna capacitación del vendedor o de otra persona para utilizar un silo secador de café?
		¿Revisa las conexiones eléctricas antes y después de utilizar el silo?
¿Daños frecuentes en un silo secador de café?	Función: análisis interno de la finca.  Subfunción: identificar elementos de frecuente daño.	¿Qué tan frecuente son los daños o reparaciones en el silo secador de café?
		¿De qué tipo son los daños presentados en su silo secador de café?
		¿Tiene conocimiento sobre el mantenimiento que se debe hacer antes y después de utilizar un silo de café?
¿Cuáles son las piezas más comunes en un silo?	Función: análisis interno de la finca.  Subfunción: identificar las mejoras posibles en un silo secador de café.	¿Ha tenido que reemplazar elementos eléctricos por cortos o fallas del silo?  ¿Desea agregar algún comentario sobre el proceso de secado de café, su medición de calidad o el silo secador usado? ¿O cualquier otra cosa?

### 2.2.7 Prueba piloto

La prueba piloto del cuestionario se realizó con ocho (8) personas, caficultores de la región del sur occidente del Cauca, quienes se acercaron los días viernes

veintiséis (26) y sábado veintisiete (27) de febrero de 2016 a las instalaciones de la seccional del comité de cafeteros del Cauca, Timbío. Como resultado de estas encuestas se logró:

- Verificar la claridad de las preguntas, en consecuencia, se modificaron algunas y se agregaron otras más, para hacer un mejor análisis de las fincas cafeteras.
- Comprobar que las respuestas fueron satisfactorias para la investigación.
- Estimar tiempo de duración de la entrevista.
- Realizar un acercamiento previo, y reconocer las necesidades de los caficultores de la región.

Además, se identificaron preguntas del cuestionario que necesitaban ser reformuladas, para una mejor relación y comunicación entre entrevistador y entrevistado, ver tabla 4.

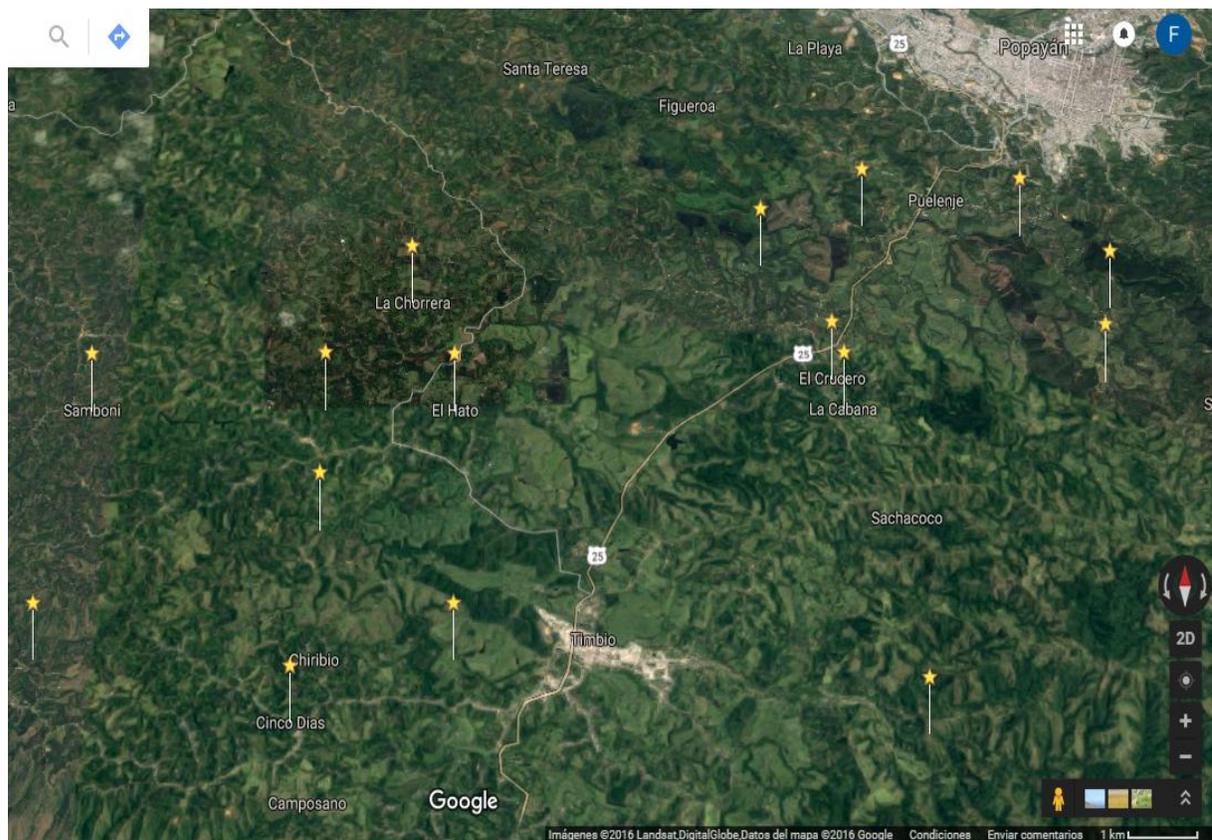
Tabla 4 Algunas de las preguntas del cuestionario reformuladas

PREGUNTA ORIGINAL	PREGUNTA MODIFICADA
¿Qué variedad de café cultiva?	¿Qué tipo de variedad de café cultivan en su finca?
¿Cree usted que su finca genera ingresos?	¿Le es rentable cultivar café?
¿Cuántas arrobas de café cosecha por año?	¿Sabe cuál es su capacidad de producción máxima de café por año?
¿Cuánto cuesta producir una arroba de café?	¿Sabe cuál es el costo de producir una libra de café en su finca?
¿Utiliza algún tipo de tecnología o maquinaria para el proceso de recolección, despulpado, lavado o secado de café?	¿Con que maquinaria cuenta la finca?
¿Posee algún tipo de silo secador de café?	¿Qué tipo de silo secador utiliza en su finca cafetera?

### 2.2.8 Ubicación geográfica de las fincas seleccionadas

Durante la realización de las 15 entrevistas en la región del sur occidente caucano, se contactaron a los dueños, acordando una cita para ir hasta cada una de las fincas, no solo recoger la información de la encuesta, si no también poder observar los equipos y lugares donde los trabajadores realizan sus actividades de transformación del café cerezo a café pergamino seco. El tiempo para trasladarse a las fincas respectivas fue de 2 meses (marzo y abril de 2016), ya que las fincas estaban separadas por distancias grandes, también los caficultores en ocasiones cancelaban las citas pactadas y a veces nunca llegaban o no están presentes cuando el entrevistador llegaba a la finca, fue difícil recolectar los datos, no solo por las distancias, sino también porque el caficultor no puede desatender las obligaciones que su finca y familia necesitan. En el mapa se muestra el mapa geográfico de la ubicación de las 15 fincas visitadas.

### Mapa distribución geográfica de las 15 fincas encuestadas en el trabajo de grado



#### 2.2.9 Análisis y conclusiones de la investigación

Como resultado de la investigación, se logró identificar los aspectos técnicos, funcionales, actividades de negocio y administración de producción en las fincas cafeteras de la región del sur occidente, adicionalmente:

- Análisis e interpretación de los resultados de las entrevistas
- Experiencia en la realización y proceso de entrevistas

Para realizar la identificación de las funciones y subfunciones de los ámbitos del marco de referencia y de la calificación si son o no fallas o falencias, se procede a considerar que una falencia es cuando no se ejecuta o carece de organización o documentación, dado que la muestra es de quince (15) fincas, se considera que es una falencia si mas del 50 % de las fincas o entrevistados no cumplen, ver tabla 5 a tabla 10.

Tabla 5 Identificación del ámbito Planificación empresarial

FUNCION O SUBFUNCION DEL AMBITO	IDENTIFICACION ¿Qué/como se hace?	FALENCIA	
		SI	NO
Función: análisis de la empresa.	Está definida la persona a cargo de la finca y sus funciones de manera informal. Dicha persona suele ser el mismo propietario.		X
Subfunción: definición del perfil gerencial.	En todos los casos siempre hay una persona a cargo de la finca cafetera.		X
	No está definido un proceso detallado en caso de que la persona encargada no este o falte a su labor.	X	
	Hay escasa presencia de cultura empresarial e industrial en los caficultores.	X	
Función: análisis interno de la empresa	Hay una dependencia única de ingresos que genera el café en su finca.	X	
Subfunción: definición de la filosofía empresarial	No se define una filosofía empresarial, se tiende a tener propósitos y proyecciones de tipo familiar	X	
	La filosofía empresarial no es tomada de forma responsable y necesaria para la actividad cafetera.	X	
	No existe una visión empresarial y por consiguiente no se toman o consideran estrategias de continuidad y mejora.	X	
Función: análisis interno de la finca	Los caficultores entienden e identifican los componentes DOFA sin hacer conciencia, ni invertir tiempo y recursos en el análisis y solución de ellos.	X	
Subfunción: análisis DOFA	Puede haber ventajas competitivas en el mercado del café, si se adoptan procesos de calidad y mejoras en el proceso.		X

Los resultados porcentuales de las preguntas de planificación empresarial de las entrevistas fueron:

- La rentabilidad de cultivar café en Colombia ha sido afectada, ya que el 46 % de los caficultores entrevistados, manifestaron que cultivar café no era rentable o era poco rentable, afectando sus ingresos económicos que dependen casi exclusivamente de la producción del café.
- El 74 % de los caficultores entrevistados depende exclusivamente de los ingresos económicos que genera la producción del café. Solo el 13 % de los caficultores ven como ingreso adicional el cultivo de café, y por último el otro 13 % ve su finca como una actividad organizada como empresa.

- La tradición de cultivar café en la región caucana aún no se ha visto tan afectada por los precios bajos del café, el clima o los altos precios de los insumos, el 93 % de los entrevistados han realizado de forma ininterrumpida la actividad cafetera, pero cabe resaltar que algunos de ellos manifestaron en la entrevista haber pensado reemplazar los cultivos de café por ganadería u otro cultivo más rentable.
- El 74 % de los cafeteros han aprendido la actividad cafetera de experiencia propia y de la transmisión de conocimiento de sus padres, mientras que el 26 % de los cafeteros han tomado cursos de capacitación y formación en la profesión de cultivar y producir café.
- Solo un 40 % de los caficultores tiene definido el propósito de la finca (misión), evidenciando una falencia en la filosofía empresarial.
- La proyección de la finca, como lo es la visión, solo el 26 % de los caficultores la han definido, esto apoya la necesidad de capacitación empresarial que deben tener los cafeteros de la región para mejorar sus ingresos y estilo de vida.
- Al analizar los resultados de los factores externos que han afectado negativamente la actividad cafetera, se concluyó que hay 3 grandes problemas, el primero son los precios bajos del café (afirmado por el 100 % de los entrevistados), luego son los precios altos en materias primas e insumos (afirmado por el 80 % de los entrevistados), y por último la calidad del café producido (afirmado por el 73 % de los entrevistados). También se nota que no hay un buen apoyo financiero para los caficultores, ya que muchos de ellos necesitan préstamos en bancos para temporadas de cosecha, y los intereses que adquieren por estos préstamos no son los mejores y afectan su bolsillo y la sostenibilidad de su finca, eso si logran cumplir con los requisitos que exigen las entidades bancarias y el mismo Comité nacional de cafeteros.

Tabla 6 Identificación del ámbito de Calidad

FUNCION/SUBFUNCION DEL AMBITO	IDENTIFICACION ¿Qué/como se hace?	FALENCIA	
		SI	NO
Función: análisis interno de la finca	Verificar la calidad del café después de terminado el proceso en el silo.		X
Subfunción: manejo de calidad en el producto	No aplicar métodos o procedimientos para garantizar la calidad del café	X	
	No utilizar servicio de laboratorio para medir calidad del café que está produciendo.	X	

Los resultados porcentuales de las preguntas de identificación de la calidad de las entrevistas fueron:

- Se identificó que el 73 % de los caficultores verifica la calidad del café al terminar su proceso de secado, este proceso de verificación solo se realiza

de forma visual, y posteriormente escogiendo los granos malos manualmente (no necesariamente por un procedimiento formal), garantizando que no haya imperfectos, negros, trillados o con indicios de broca.

- Un 60 % de los caficultores no utilizan métodos para garantizar la calidad del café, generando resultados no deseados en el café seco, disminuyendo su precio y calidad.
- Solo un 33 % de los caficultores utilizan un servicio de laboratorio para medir las propiedades fisicoquímicas del café que producen. Esto se ve reflejado en el pago que reciben por vender su café, si este cumple con estándares de acidez, aroma, contenido de cafeína, etc.

Tabla 7 Identificación del ámbito en mantenimiento

FUNCION/SUBFUNCION DEL AMBITO	IDENTIFICACION ¿Qué/como se hace?	FALENCIA	
		SI	NO
Función: análisis interno de la finca  Subfunción: mantenimiento de equipos	Realizar revisiones periódicas del estado del silo para el proceso de secado.		X
	Utilizar un silo de capa estática para el secado de café.		X
	Alimentar con cisco la cámara calefactora del silo.		X
	No estar suficientemente capacitado para manejar el silo secador de café.	X	
Función: análisis interno de la finca.  Subfunción: identificar elementos de frecuente daño.	Daños o fallas en el silo secador de café.	X	
	Daños mecánicos o eléctricos presentados en el silo.	X	
	Tener conocimiento del mantenimiento que se debe hacer antes y después de utilizar el silo		X
	Revisar conexiones eléctricas y elementos mecánicos antes y después de utilizar el silo.		X
	Desconocer los procedimientos de mantenimientos adecuados para evitar fallas.	X	
	Reemplazar elementos eléctricos por cortos o fallas en el silo.	X	

Los resultados porcentuales de las preguntas identificación del mantenimiento de las entrevistas fue:

- El 100 % de los caficultores realiza revisiones periódicas del estado de la maquinaria utilizada para el proceso de secado del café, pero a la hora de adquirir el equipo secador de café el 73 % recibió una capacitación básica de manejo más no de mantenimiento, el otro 17 % no recibió ninguna

capacitación y realizan el mantenimiento de forma instintiva y lógica de lo que ellos perciben debe hacerse al silo.

- El 100 % de los caficultores utiliza un silo secador de capa fija, además se concluyó con las entrevistas que cada caficultor compra el silo secador de café, pensando en mejorar la producción de café, y no evalúa la posibilidad de que en algún momento su producción pueda aumentar o tenga la posibilidad de expandirse, para luego quedarse corto con la capacidad del silo para secar su producto. Un detalle técnico interesante observado por el autor, en la visita a los caficultores, es que el 100 % de los silos observados no son energéticamente eficientes, en su diseño no hacen un aprovechamiento posterior de los gases de combustión.
- Se identificó que los daños presentados en los silos secadores adquiridos por los caficultores presentaban una o dos fallas por año, de los quince (15) entrevistados un 87 % presentaban este problema, y el 13 % restante daños de 3 a 4 veces por año en el silo secador.
- En general se identificó, que las fallas más comunes que presentan los silos secadores de café son de tipo mecánicas y luego de tipo eléctricas, el 100 % de los entrevistados manifestaron algún tipo de falla en su silo.
- Las actividades de mantenimiento más comunes que realizan los caficultores a sus silos secadores son: limpiar, engrasar, revisión de correas, revisión de conexiones eléctricas y revisión de elementos mecánicos. Estas actividades las realizan antes y después de ser utilizado el silo.
- Sobre las revisiones eléctricas, el principal elemento a revisar en el silo es el motor del ventilador que realiza la inyección de aire caliente proveniente de la unidad calefactora, luego el segundo elemento es la conexión principal, ósea de la red eléctrica a su contador o caja de alimentación del silo, luego en tercer y cuarto lugar, viene la revisión de los cables eléctricos y los breker respectivamente.
- Sobre las revisiones mecánicas, los principales elementos que tienen mayor frecuencia de revisión son; correas, motor y balineras, los caficultores les dan mucha relevancia ya que son muy importantes para el funcionamiento del silo como también de ser costosos o de difícil adquisición. Los elementos mecánicos faltantes que se revisan son; tolva del cisco, cámara plenum y las poleas, sin dejar atrás que estos elementos deben de limpiarse y engrasarse de ser necesario.
- Se identificaron las piezas más comunes que deben ser reemplazadas en los silos secadores, la frecuencia de reemplazo por daño más alto son los brekers, seguidos del motor, termocupla, contactor y finalmente el contador, muchas veces este tipo de daños son ocasionados por bajas y altas de energía que hay en la red eléctrica, es de saberse que la electricidad que llega a las veredas de la región del sur occidente caucano no es la mejor y hay variaciones de voltaje.

Tabla 8 Identificación del ámbito de planificación de producción

UNCION/SUBFUNCION DEL AMBITO	IDENTIFICACION ¿Qué/como se hace?	FALENCIA	
		SI	NO
Función: análisis interno de la finca  Subfunción: análisis de la planificación de la producción.	Poco más de la mitad de los caficultores, no realizan un pronóstico de producción.	X	
	Desconocer la capacidad de producción de la finca.	X	
	Implementar secados mecánicos de café para aumentar la producción de café seco.		X
	El proceso de secado mecánico de café tarda más de 20 horas en completarse.	X	
	No calcular el costo de producir una libra de café.	X	
	Desconocer las características de la maquinaria que compra o posee en su finca.	X	
	No tener calculada la producción máxima de café que su finca genera al año.		
	Manejar las cantidades de insumos, maquinaria, producto terminado etc.		X

Los resultados porcentuales de las preguntas de planificación de producción de las entrevistas fueron:

- Se concluyó que el 53 % de los caficultores no realiza ningún tipo de pronóstico de cosecha.
- El resultado anterior, de no realizar pronóstico de cosecha, se apoya con que el 67 % de los caficultores desconocen la capacidad máxima de café que produce su finca por año.
- Se identificó que el 60 % de los caficultores además de utilizar un silo mecánico para secar café, también se ayudan de un secado al sol y en invernadero, esto se debe a que cuando la cosecha excede la capacidad del equipo secador, deben secar el café antes de que este empiece a fermentarse más de lo debido.
- El 53 % de los caficultores desconoce las características de las máquinas que tiene en su finca (máximo tiempo de trabajo continuo, frecuencia de mantenimiento, velocidad, etc.).
- Se observó que el 73 % de los caficultores desconocían la capacidad de producción máxima, es decir, la cantidad de café que puede producir considerando sus instalaciones, equipo y personal.

Tabla 9 Identificación del ámbito de inventario

FUNCION/SUBFUNCION DEL AMBITO	IDENTIFICACION ¿Qué/como se hace?	FALENCIA	
		SI	NO
<b>Fun.</b> Planificación para inventario.	Los materiales almacenados más comunes son los insumos (materia orgánica, abonos, yute, etc.)		X
	El almacenamiento de materia prima es característico de empresas que hacen planes a corto plazo.		X
<b>Fun.</b> Administración de almacén.	El administrador de la finca maneja los inventarios para llevar control sobre las entradas y salidas de material y producto.		X

Los resultados porcentuales de las preguntas de identificación del ámbito de inventario de las entrevistas fueron:

- El 73 % de los caficultores maneja inventarios, en el análisis de las entrevistas se analizó que documentan en cuadernos u hojas de papel, pero esta información no la utilizan adecuadamente para hacer una planificación de la producción o realizar pedidos de materiales o insumos faltantes.
- Un 27 % de los entrevistados no poseen algún tipo de inventario, y solo durante los procesos o actividades que realizan van dándose cuenta de lo que hay y lo que falta, para posteriormente adquirir y seguir sus tareas.

Tabla 10 Identificación del ámbito Programación de la producción

FUNCION/SUBFUNCION DEL AMBITO	IDENTIFICACION ¿Qué/como se hace?	FALENCIA	
		SI	NO
<b>Fun.</b> Establecer programa de producción.	Aún no hay una tendencia generalizada hacia la generación de programas de producción formales.	X	
<b>Fun.</b> Planificación para el programa de producción.	El cálculo de las cantidades de material por pedir no tiende a estar documentado formalmente.	X	
	Durante la misma programación de la producción se tiende a hacer la asignación de materiales, equipo y personal.		X
<b>Fun.</b> Seguimiento de ejecución de orden de trabajo de producción.	En cuanto a la supervisión durante la producción, se tiende a hacer por observación esporádicamente.		X

Con la realización de las encuestas y posterior análisis de las mismas, se identificó que los caficultores de la región del sur occidente caucano no tiene una tendencia hacia la generación de un programa de producción, durante el correr de la actividad cafetera ellos van generando soluciones a los problemas, no poseen algún tipo de documentación para el proceso de beneficio del café, y no hay una supervisión adecuada para cada etapa de proceso al que debe someterse el café.

### **2.2.10 Experiencias proceso de entrevistas**

En el acercamiento realizado a los caficultores, permitió una relación de confianza, que logró respuestas a preguntas del cuestionario que de otro modo no hubiesen sido atendidas, debido a una interpretación errónea de las mismas, o que pensara que estaba respondiendo “más de lo debido”. Igualmente también se observó que los entrevistados con el pasar de la entrevista se sentían más cómodos y cada vez accedían a dar más información.

Los caficultores de la región en su mayoría tuvieron actitudes que apoyaron la entrevista.

- Deseo de aportar a la construcción de una herramienta que les permita progresar.
- Sentimiento de orgullo por lo que han logrado, de sus raíces y disposición de compartir la experiencia.
- Sentimiento de agradecimiento por prestar atención hacia las fincas cafeteras, que han estado abandonadas sin apoyo económico y desarrollo.

Las limitaciones del proceso de entrevistas fueron:

- Algunos entrevistados se sentían comprometidos con la respuesta proporcionada; por consiguiente, eran parciales o distorsionaban u ocultaban información.
- Algunas preguntas realizadas no las comprendían del todo, así que había que explicar la pregunta y poner un ejemplo.
- Disponibilidad de tiempo de los entrevistados
- Díficil acceso a las veredas y fincas.
- Algunos entrevistados no mostraban interés, postergando la entrevista.

## **2.3 MODELADO ISA 88.01 DEL SECADO DE CAFÉ EN LA REGION DEL SUR OCCIDENTE CAUCANO**

Esta sección contiene el análisis del levantamiento de los modelos del proceso de secado de café, implementado en las fincas cafeteras del sur occidente caucano (ver anexo C “Modelado ISA S88.01 del secado de café”), empezando por la

identificación de entradas y salidas, se realiza el diagrama de flujo de proceso. Se plantean los tres modelos propuestos por el estándar ISA S88.01 (Modelo de control de procesos, Modelo Físico, Modelo de control de procedimiento), se hace el diagnóstico del proceso, evaluando el nivel de dificultad, nivel de automatización, se elabora un análisis de los modelos y el proceso en general, por último se listan los requerimientos del proceso de secado del café.

### 2.3.9 Diagrama flujo de proceso de secado del café

Un diagrama de Flujo de Proceso (PFD) representa esquemáticamente la conversión de las materias primas a lo largo de un proceso de producción, sin ahondar en detalles de cómo se produce dichas conversiones. Éste puede ser tan complejo o sencillo como la persona que modela el proceso lo requiera, por lo general, se busca que el PFD sea lo más sencillo posible reduciendo el nivel de detalle al mínimo con el fin que sea fácilmente interpretado [28].

Para realizar el PFD es importante identificar las entradas y salidas de flujos de materiales de cada una de las operaciones del secado descritas en el ítem 1.6. La tabla 11 lista las entradas y salidas según las diferentes operaciones.

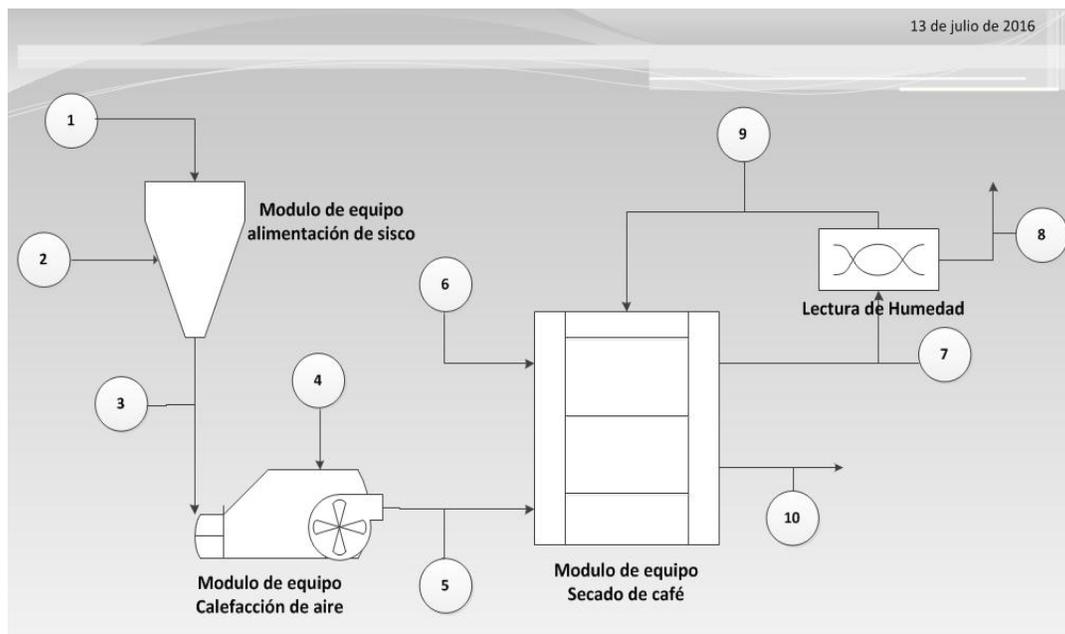
Tabla 11 Entrada y salidas de flujos de materiales del secado de café en fincas del sur occidente caucano

ENTRADA	TRANSFORMACION	SALIDA
Café pergamino	Recepción y acomodación del grano en el silo secador	Café pergamino seco con humedad entre 10%-11%
Cisco de café	Acomodación en la tolva de la unidad de calefacción	Flujo de aire caliente a 50°C.
Alimentación monofásica 220v	Alimentación de elementos eléctricos del silo	Movimiento de ventilador y funcionamiento de la electrónica.

Elaboración propia enero 2016

Con la identificación de entradas y salidas del proceso de secado de café, se procede a elaborar el PFD, ver Figura 10. El proceso inicia con la entrada de la materia prima café pergamino, hacia las bandejas correspondientes del silo. Luego se realiza la operación de encendido de la unidad de calor, y la alimentación con cisco a la tolva de distribución. En la operación de secado de café, se debe mantener una temperatura no mayor a 50 °C, durante un tiempo aproximado de 18 a 24 horas, dependiendo de la carga en kilogramos, grosor de capa y tipo de silo implementado en el secado. La humedad correcta del grano de café seco será de un 10 % al 11 %, obtenido esto se procederá a pagar el equipo y a extraer el café de las bandejas, luego de enfriar el grano, se procede a empacar para su posterior almacenaje o venta. A este subproducto obtenido después del secado se le llama café pergamino seco, listo para trillar y tostar.

### Diagrama de flujo de proceso secado de café en silos mecánicos de capa estática



ID	DESCRIPCION	OPERACIÓN
1	Recepción de Cisco	Alimentación con cisco a tolva
2	Conexión eléctrica	Alimentación a motor
3	Cisco dosificado	Alimentación al calefactor
4	Conexión eléctrica	Motor ventilador
5	Aire caliente	Suministro de flujo de aire a 50 °C
6	Café pergamino húmedo (53% bh)	Distribución en bandejas del silo
7	Muestra de café pergamino	trillar muestra húmeda de café a mano
8	Lectura de humedad	Observar color del grano
9	Café trillado a mano	Regresar muestra tomada en bandeja
10	Café seco (10%-11% bh)	Retirar café seco

Figura 10. Fuente Propia junio 2016

## 2.4 Análisis de los modelos ISA S88.01

El secado de café en silo mecánico, se realiza principalmente en fincas medianas y grandes, que varían en tamaño de 4 hasta 100 hectáreas de café sembrado, la región en la cual se realizó el estudio con entrevistas y visitas técnicas, fue la región del sur occidente caucano, con la ayuda del señor Regulo Guzmán Manquillo, quien ha trabajado en el sector cafetero por más de 25 años, y pertenece a la seccional Timbío del Comité Nacional de Cafeteros de Colombia.

Previamente se construyeron los modelos control de procesos, físico y de control procedimiento de ISA S88.01 (ver anexo C “Modelado ISA S88.01 del secado de café”) de los cuales se realiza un estudio general que muestra sus características principales.

#### **2.4.9 Análisis general del modelo de proceso**

El proceso de secado de café en silo mecánico, es de tipo *batch* porque en cada una de sus 4 etapas de proceso de secado del grano, se tratan cantidades finitas de material, sometiéndolas a tareas ordenadas de procesamiento y usando uno o varios equipos durante un tiempo definido.

Como operaciones de proceso, existen actividades de almacenar adecuadamente el café, después depositar el café en las bandejas correspondientes del silo mecánico, este deberá de hacer el proceso de secado, durante aproximadamente 20 horas o más, luego viene la persona encargada del secado, y procede a supervisar la humedad de forma manual, por último, se debe de dejar enfriar el café para su posterior venta o almacenaje. Durante estas 5 operaciones de procesos se ejecutan 17 acciones de proceso que garantizan el proceso de secado de café en silo.

Si se compara el nivel de dificultad en la realización del proceso de secado de café, entre las dos fincas, (ver figuras 4 Y 5 en anexo C “Modelado ISA S88.01 del secado de café”), se obtiene un resultado donde se ve la gran diferencia entre las acciones de proceso y los resultados finales que arroja la calidad del café. También se infiere que no se necesita personal especializado para realizar este proceso ya que para la finca 1, se considera que el 59 % de las operaciones son de nivel bajo, un 35 % de dificultad media, y finalmente el 6 % de nivel alto en dificultad. Mientras en la finca 2, se considera un nivel de dificultad bajo del 67 %, nivel medio del 33 % de dificultad, y no presenta porcentaje de dificultad alta.

#### **2.4.10 Análisis general del modelo físico**

El silo secador de café requiere de 8 módulos de control, de los cuales hacen parte 3 módulos de equipo, que constituyen la unidad de secado, todo esto se resume en la célula de procesos llamada secado de café por método mecánico en silo.

Se infiere por el resultado del nivel de automatización, que el proceso de secado de café es un 12 % semiautomático para la finca 1 y un 16 % semiautomático para la finca 2, lo que indica que el secado depende de la intervención de un operador en el proceso. Apoyando que este se ubica en el nivel 1 de automatización debido a que existen actividades de medición y manipulación de algunas fases en el proceso.

#### **2.4.11 Análisis general del modelo de control procedimental**

La ejecución del secado de café en silo mecánico se conforma por diecisiete (17) fases, que se resumen en cinco (5) operaciones, representando las actividades que se deben realizar para la fabricación de café seco pergamino.

Existe un 76 % del proceso (Finca 1 “La Fantasía”) que se lleva a cabo manualmente, ya que hay fases tan simples como almacenar los materiales (se ejecutan sin inconvenientes), y tan complejos como medir y determinar la humedad dentro del grano de café, el cual un operador no puede determinar si no tiene experiencia y buen ojo.

## **2.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENTREVISTAS**

A lo largo del análisis de las encuestas a los caficultores y de haber detallado el proceso en dos fincas diferentes, surgieron aspectos en los ámbitos de planificación empresarial, calidad, mantenimiento, planificación de la producción, programación de la producción e inventario, que se deben tomar en cuenta para obtener mejores resultados en la realización del proceso. Estos requerimientos administrativos, técnicos y funcionales se basan en los problemas más significativos que tiene el proceso y se citan a continuación.

### **2.5.9 Requerimientos en el aspecto administrativo**

A partir de la investigación, recolección y análisis de información de las entrevistas a los caficultores y las visitas a las fincas, se identificaron cinco (5) requerimientos administrativos listados a continuación:

**RA1:** Definir con un experto el proceso detallado del secado de café que se debe seguir en la finca, con el fin de obtener la mejor la calidad del producto.

**RA2:** Proponer un proceso documentado al 100 % del secado de café para la finca, modelándolo en términos de ISA S88.01, evitando una dependencia absoluta del trabajador encargado, en caso de ausentarse de su labor.

**RA3:** Mejorar en los trabajadores las acciones de proceso y actividades relacionadas con el secado del café acorde al proceso documentado.

**RA4:** Definir un pronóstico de producción por cosecha, preparando al caficultor para visualizar la cantidad de producto a procesar.

**RA5:** Promover la cultura empresarial e industrial, formando una visión y considerando estrategias de continuidad y mejoras en el desarrollo de la labor cafetera en los caficultores.

### **2.5.10 Requerimientos en el aspecto técnico**

A partir de la investigación, recolección y análisis de información de las entrevistas a los caficultores y las visitas a las fincas, se identificaron seis (6) requerimientos técnicos listados a continuación:

**RT1:** Disminuir el tiempo y mejorar la uniformidad del secado del café, proponiendo un mejor diseño del silo mecánico.

**RT2:** Mejorar la eficiencia energética del silo secador de café, realizando un aprovechamiento de los gases de combustión residuales de la cámara de secado.

**RT3:** Proponer instrumentación para la medición de humedad presente en la carga de café durante el proceso de secado.

**RT4:** Recomendar la instrumentación que permita mejorar el proceso de secado, controlando la humedad de la carga de café, el caudal y temperatura del aire de secado y la velocidad de rotación del lote de café.

**RT5:** Mejorar el sistema de protección eléctrica para evitar daños en los elementos electrónicos principales.

**RT6:** Proponer actividades de mantenimiento adecuados para el silo mecánico tipo guardiola.

#### **2.5.11 Requerimientos en el aspecto funcional**

Después de modelar el proceso de secado de café con el estándar ISA S88.01, en las dos fincas, se notaron las principales diferencias entre ellas, la primera se encontró en el modelo de control de procesos, las dos fincas manejaban las mismas etapas y operaciones de proceso, sin embargo, se diferenciaban en el número de acciones de proceso que cada una desarrollaba (finca 1, tiene 7 acciones de proceso más que la finca 2), además que en la finca 1 “La Fantasía”, las acciones de proceso se desarrollaban más detalladamente. Sobre el modelo de control de procedimiento del secado de café, se observa que la finca 1, realiza 15 fases, la finca 2, realiza 10 fases, en la obtención de café seco, afirmando aún más los resultados de la calidad del café producido por cada una de las fincas.

En el modelo físico del secado de café, se observó que las dos fincas poseían el mismo equipo secador de café, pero con diferente capacidad de carga, además se concluyó que la calidad del café que se producía en la finca 1 “La Fantasía” no se debía a equipo extra o mejor tecnología, si no a acciones de proceso y fases extra, que garantizaban un mejor beneficio (calidad) del café.

Al modelar y analizar los modelos de la ISA S88.01, sobre la finca “La Fantasía” y la finca “El Recreo”, se identificaron dos (2) requerimientos en el aspecto funcional, listados a continuación:

**RF1:** Adaptar los modelos de control de procesos y el modelo de control de procedimiento, detallándolos de forma correcta en sus acciones de proceso y fases para garantizar una mejor calidad en el proceso de secado de café usando el silo tipo Guardiola.

**RF2:** Recomendar e implementar nuevas y mejoradas fases, en particular la relacionada en fermentación en el proceso de secado de café, que contribuyan a un mejor resultado del producto seco.

### 3 INGENIERIA BÁSICA

La ingeniería básica hace parte del diseño de un proyecto de automatización, esta refleja la solución a problemas detallados en la ingeniería conceptual. Mediante la aplicación de la ingeniería básica se busca dar respuesta a los requerimientos técnicos del caficultor caucano, con referencia a las problemáticas asociadas al proceso de secado de café. En este capítulo se desarrolla la especificación técnica del proceso de secado de café, donde las soluciones planteadas cumplen los requerimientos previstos.

#### 3.2 Cumplimiento de requerimientos técnicos del proceso de secado del café

##### 3.2.1 Cumplimiento del requisito técnico 1

**RT1:** Disminuir el tiempo y mejorar la uniformidad del secado del café, proponiendo un mejor diseño del silo mecánico.

Para dar cumplimiento a **RT1** se pretende demostrar que el actual silo utilizado en las fincas cafeteras de la región del sur occidente caucano, de capa fija, no es el adecuado, que su diseño no permite un secado uniforme, y aumenta el tiempo del secado. Esto en comparación con un diseño de un silo secador tipo guardiola, que mejora el tiempo de secado y la uniformidad del grano. Para ello se hará uso de la herramienta software Solid Works 2015, modelando y simulando dos silos: uno de capa fija y otro guardiola incluyendo el proceso de secado, en ello se analizan los resultados de termodinámica, presiones, flujos de aire y masa de aire, ver tabla 12, y los detalles del resultado experimental comparativo en el capítulo 4.

Tabla 12 Características de los silos secadores de café para simulación Solid Works 2015.

Tipo de silo	Dimensiones	Capacidad	Tiempo de secado por carga	Materiales de la estructura	Costo aproximado 1 agosto de 2016
Capa fija	Ancho:1.2 m Largo:1.5 m Alto:2.3 m	80@ 907 kg	25-30 horas	Acero, Láminas de aluminio	16.000.000
Guardiola	Radio:1.2 m Altura:3 m	80@ 907 kg	18-20 horas	Acero, láminas de aluminio.	18.000.000

Durante la década del 60 y 70, se popularizaron los silos secadores en Colombia, mucho antes de esto solo se utilizaba el secado tradicional en patios, durante ese tiempo el secador más popular en Colombia era el tipo guardiola, el cual poseía un gran cilindro como cuerpo que gira continuamente con los granos de café en su interior, levantándolos hasta dejarlos caer por la gravedad desde la parte superior, utilizando unas palas metálicas empotradas en la parte interna del cilindro interno. La transferencia de calor hacia los granos de café, se produce cuando estos chocan con el aire caliente que entra al secador a través de un tubo perforado, coaxial al eje del cilindro y para facilitar la evacuación del aire húmedo eran perforadas las paredes externas del cilindro [2]. Este secador es recordado por la uniformidad en la humedad final que presenta el café obtenido de él, lo que se traducía en una muy buena calidad, ya que todos los granos recibían casi el mismo tratamiento térmico por el hecho de que ellos se movían continuamente durante todo el proceso de secado [29].

Después de la década del 70 el uso de los silos guardiola se redujo considerablemente y fueron substituidos por los secadores de capa estática, la razón fundamental del cambio fue estrictamente por consideraciones prácticas y económicas, de hecho en la década de los 60 y 70 adquirir un guardiola era muy costoso, en comparación al silo de capa fija, además de mencionar que las empresas o personas que fabricaban esta máquina eran escasos, y con poco conocimiento sobre la funcionalidad que debe tener un silo [25]. Debido a que este silo guardiola no era el más “apropiado” en ese tiempo, los cafeteros de Colombia optaron por utilizar el silo secador de capa fija, y por “tradición” lo siguen usando.

La mejor opción para disminuir el tiempo y mejorar la uniformidad del secado del café caucano, es cambiar el diseño del secador de capa fija a un tipo guardiola [16] [29] [30]. Existen dos requisitos para lograr un secado eficiente en el silo tipo guardiola:

1. El secador tipo guardiola debe llenarse de café en toda su capacidad, ya sea 80, 100 o 120 arrobas, de lo contrario el aire caliente se perderá sin secar y esto representa un gran desperdicio de energía eléctrica, de combustible y de tiempo [29].
2. La temperatura de secado en el guardiola debe ser constante y no exceder de 60°C. Se recomienda usar preferiblemente 50°C a 55°C para asegurar una buena calidad. Debe asegurarse que el instrumento que mide la temperatura del aire de secado esté colocado en el ducto justo a la entrada de la secadora y este debe calibrarse para asegurar que la lectura sea la correcta [30] [29].

El secador tipo guardiola emplea la rotación constante del lote de café para una mejor homogenización de la exposición de los granos en el proceso de secado. Su estructura principal es la unidad de secado que consiste en dos cilindros, uno interno que contiene el café a secar y el otro externo el cual mantiene el calor dentro del secador, el cilindro interno va rotando y mezclado constantemente el café a una velocidad fija en el rango de 6 a 8 rpm [14], levantando los granos hasta dejarlos caer por gravedad desde la parte superior, por medio de cejas

metálicas empotradas en la parte interna del cuerpo al cual se le inyecta aire caliente a una temperatura fija (50°C), por medio de un tubo perforado coaxial al eje del cilindro. Para facilitar la evacuación del aire húmedo se perfora el cilindro externo al final de su extensión ubicando una chimenea. La unidad de secado debe garantizar que la humedad del lote de café se encuentre dentro del rango 10% al 12% para dar por finalizado el proceso de secado. La inyección del aire caliente la realiza un ventilador que extrae el aire caliente de una unidad denominada calefactora.

La unidad calefactora posee una tolva que contiene el cisco, un tornillo sin fin gobernado por un motor, lo dosifica continuamente hacia un horno de combustión, donde se calienta el aire que un ventilador extrae del ambiente, para posteriormente inyectarlo a una temperatura constante hacia la unidad de secado. La unidad calefactora debe garantizar una temperatura y caudal constante del aire que suministra a la unidad de secado.

El proceso que se debe seguir para secar café en un secador tipo guardiola es similar al proceso de secar café en un secador de capa fija. En primer lugar se debe suministrar y garantizar el combustible (cisco) necesario para el lote de café, el cual es dosificado por un tornillo sin fin accionado por un motor, luego se debe prender el horno de combustión de la unidad calefactora, y realizar un precalentamiento de 30 minutos antes de prender el ventilador. La temperatura del aire en el calefactor debe ser de 50°C o menos, para que el aire caliente sea transportado por un conducto de aire desde el calefactor hacia la unidad de secado, este transporte de aire lo realiza un ventilador que garantiza un flujo adecuado de aire tomado del ambiente. Se debe depositar la cantidad de café adecuada en el cilindro interno de la unidad de secado, asegurar su cierre y proceder a secar el café a 50°C durante las horas necesarias para que la almendra obtenga una humedad del 10% al 12%. En la figura 11 se presenta el DFP del secado de café, propuesto en el trabajo de grado.

Diagrama de flujo de proceso secado de café en silo tipo guardiola

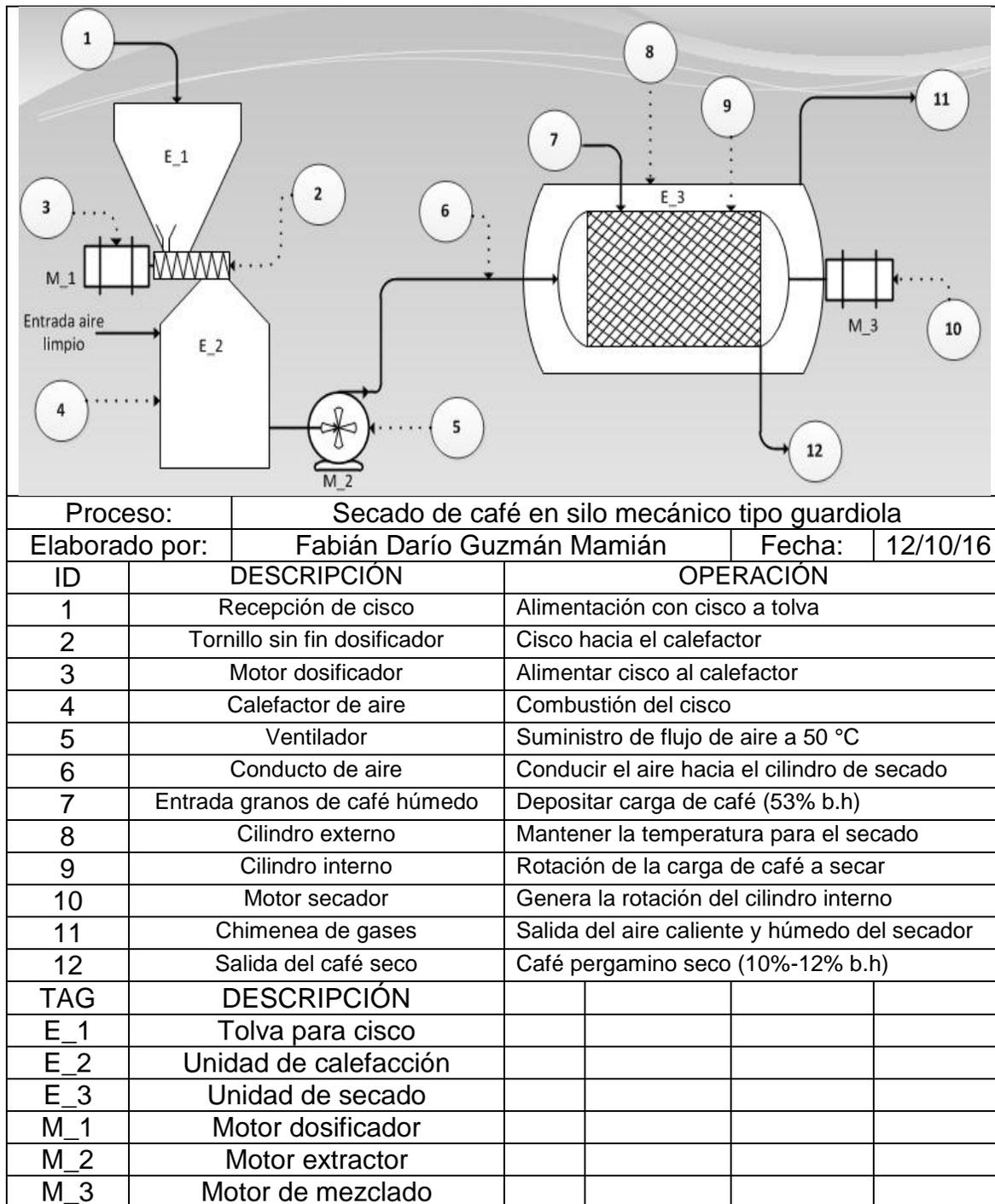


Figura 11. Fuente propia

Al analizar el PFD del secado de café en un silo secador tipo guardiola, se plantea un nuevo modelo físico para representar este secador. Se determina la célula de proceso llamada: secado de café por método mecánico en silo tipo guardiola, se divide el silo secador en dos (2) unidades, unidad calefactora y unidad de secado.

Cuatro (4) módulos de equipo: tolva de dosificación, calefactor de aire, cilindro interno de café y medición de humedad, estos cuatro módulos de equipo presentan sus propios módulos de control, en total once (11), ver tabla 13.

Tabla 13 Modelo físico del silo secador de café tipo guardiola.

Célula de proceso	Unidad	Módulo de equipo	Módulo de control
Secado de café por método mecánico en silo tipo guardiola.	Unidad calefactora	Calefactor de aire	Motor dosificador cisco
			Variador de velocidad
			Motor ventilador
			Arrancador motor ventilador
			Sensor de temperatura
	Unidad de secado	Agitador de café	Transmisor adaptador de temperatura
			Dosificador de café(operario)
			Motor de movimiento
		Medidor de humedad	Arrancador motor de movimiento
			Células de carga
		Trasmisor adaptador de señal	

### 3.2.2 Cumplimiento del requisito técnico 2

**RT2:** Mejorar la eficiencia energética del silo secador de café, realizando un aprovechamiento de los gases de combustión residuales de la cámara de secado.

En la actualidad se están optimizando los procesos industriales, aprovechando mejor el reciclaje de materiales y materias primas, implementando nuevas tecnologías, reciclando los residuos industriales y productos derivados. Se hace por lo tanto, imprescindible desarrollar tecnologías y sistemas de trabajo que ahorren energía para lograr un auténtico desarrollo, que se pueda llamar sostenible [31].

Para dar cumplimiento a **RT2** se propone aprovechar los gases de combustión salientes de la unidad de secado, y conducirlos a un intercambiador térmico donde son usados para calentar el aire tomado del ambiente para la unidad calefactora. En las fincas cafeteras visitadas en la región del sur occidente caucano, se identificó que ninguno de los equipos secadores posee esta mejora tecnológica. Por esta razón al modelo físico de la tabla 13 se le adiciona una unidad intercambiadora, ver tabla 14, e igualmente en el DFP se debe agregar esta unidad. La implementación de la nueva unidad, se espera traiga consigo un ahorro en el combustible utilizado, por ende un ahorro económico al producir más café seco con menos cantidad de cisco.

Tabla 14 Modelo físico del silo secador de café tipo guardiola con unidad intercambiadora.

Célula de proceso	Unidad	Módulo de equipo	Módulo de control
Secado de café por método mecánico en silo tipo guardiola.	Unidad calefactora	Calefactor de aire	Motor dosificador cisco
			Variador de velocidad
			Motor ventilador
			Arrancador motor ventilador
			Sensor de temperatura
	Unidad de secado	Agitador de café	Transmisor adaptador de temperatura
			Dosificador de café (operador)
			Motor de movimiento
			Arrancador motor de movimiento
	Unidad de intercambio térmico	Intercambiador de calor	Medidor de humedad
			Células de carga
			Transmisor adaptador de señal
			-

### 3.2.3 Cumplimiento del requisito técnico 3, 4, 5

Para dar cumplimiento al tercer y cuarto requisito técnico, se selecciona la instrumentación para un diseño de silo tipo guardiola, que permita un control de las variables: temperatura, velocidad de rotación, caudal del aire de secado y humedad de la carga de café presente en el silo durante el proceso de secado.

**RT3:** Proponer la instrumentación para la medición de humedad presente en la carga de café durante el proceso de secado.

Para instrumentar la medición de la variable de proceso humedad de la carga de café durante el secado, se propone hacer uso del método Gravimet (ver anexo D "Implementación del método Gravimet"). Este es un método indirecto para inferir la humedad del lote midiendo la masa de la carga de café, por lo que se propone la medición y monitoreo de la masa del lote de café al interior de la unidad de secado. Para ello se hace uso de celdas de carga ubicadas estratégicamente en los puntos de apoyo del cilindro interno, estas medirán constantemente la masa del café durante el proceso de secado, para inferir la humedad presente en el grano de café.

**RT4:** Recomendar la instrumentación que permita mejorar el proceso de secado, controlando la humedad de la carga de café, el caudal, temperatura del aire de secado y la velocidad de rotación del lote de café.

Para instrumentar el control de la humedad de la carga de café, se propone usar un algoritmo de control en lazo abierto de masa en un PLC, que a partir de la medición de la masa de café determine, por medio de una relación de humedad-masa pre establecida [32] si la carga de café está dentro del rango de humedad deseada (10% a 12% b.h) para detener el motor dosificador de cisco y el motor de rotación del cilindro interno, parando así el proceso de secado, ver figura 12, ver tabla 15.

Para instrumentar la variable de proceso temperatura del aire de secado ( $50^{\circ}\text{C}$ ), se propone implementar un lazo de control realimentado de temperatura del aire de secado en un PLC. El algoritmo de control de temperatura recibe la temperatura del aire de secado por medio de un pozuelo con termocupla, instalado en la tubería de entrada a la unidad secadora, conectado a un módulo de acondicionamiento de termocupla del mismo PLC. El algoritmo de control de temperatura determina el esfuerzo de control que un variador de velocidad debe interpretar para ajustar la velocidad de dosificación del cisco al horno de combustión, ver figura 12, ver tabla 15.

Para instrumentar la variable de proceso caudal del aire de secado, se propone implementar un algoritmo de control en lazo abierto del caudal de aire de secado en un PLC, que simplemente encienda o apague un ventilador que cumpla con las especificaciones que garanticen el volumen y flujo de aire requeridos, el ventilador se escoge dependiendo del tamaño en arrobas del silo secador, por este motivo solo se prende o paga el ventilador extractor ( $0.583\text{ m}^3/\text{s}$ , ver anexo E “Cálculos matemáticos y físicos para el silo tipo guardiola”) por el secador guardiola, ver figura 12, ver tabla 15.

Para instrumentar la variable de proceso velocidad de rotación, se propone implementar un algoritmo de control en lazo abierto de la velocidad de rotación en un PLC, que simplemente encienda o apague el motor del cilindro interno que disponga de una caja reductora que permita una velocidad de giro entre 6 y 8 rpm ver anexo D “Cálculos matemáticos y físicos para el silo tipo guardiola”, ver figura 12, ver tabla 15.

P&amp;ID del proceso de secado en silo tipo guardiola

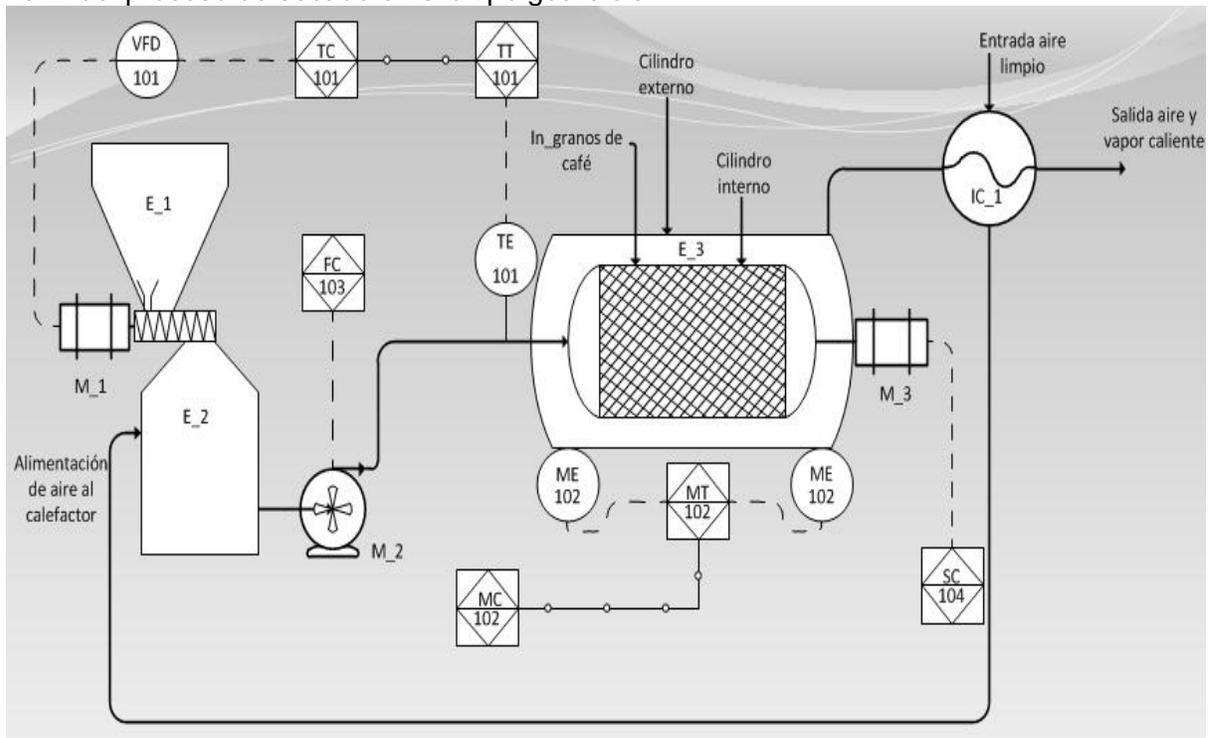


Figura 12. Fuente propia

Tabla 15 Lista de elementos del silo tipo guardiola

LISTA DE ELEMENTOS				
Tag	Descripción	In	Out	SP
TC	Algoritmo controlador de temperatura (PLC)	0°C a 100°C	4 mA-20mA	50°C
TT	Acondicionamiento de temperatura	0 mv 4,096 mv	0°C a 100°C	-
TE	Sensor de temperatura termocupla	0°C a 100°C	0 mv 4,096 mv	-
MC	Algoritmo controlador de masa (PLC)	0 a 800 kg	4 mA-20mA	52.7% Masa
MT	Acondicionamiento de masa	0 a 43.2 mv/v	0 a 800 kg	-
ME	Celdas de carga	0 a 800 kg	0 a 43.2 mv/v	-
SC	Algoritmo controlador de velocidad (PLC)	24 V	140-250 V	6 a 8 rpm
FC	Algoritmo controlador de flujo (PLC)	24 V-	127-220 V	0.583 m³/s
M_1	Motor de distribución de cisco	0-50 Hz/d127 V	234 gr/min	-
M_2	Motor ventilador	127-220 V	0.583 m³/s	-
M_3	Motor de unidad secadora	140-250 V	6-8 rpm	-
VFD	Variador de velocidad	4 mA-20 mA	0 -50 Hz	-
E_1	Tolva de distribución de cisco	Cisco	Cisco	-
E_2	Unidad calefactora	Café 53% b.h	Café 10-12% b.h	-
E_3	Unidad de secado	0 a 907 kg	0-477.98 kg	-
IC_1	Unidad intercambiadora de calor	Cisco	Energía térmica	-

Fuente: Propia Visio 2010

De acuerdo a la descripción del proceso de secado del café en secador tipo guardiola (Ver sección 3.1.1) se definen cuatro variables a controlar: temperatura del aire, humedad del lote, caudal de aire y velocidad de rotación. En el diagrama P&ID de la figura 12 se describe la instrumentación, y lazos de control

implementados en el silo secador de café tipo guardiola, mejorado por el control de las citadas variables de proceso.

Para la variable de proceso temperatura del aire de secado, se observa una unidad de calor (E\_3) con un lazo cerrado de control (101) de temperatura continuo, empleando un sensor de temperatura (TE) ubicado en la tubería de flujo de entrada de E\_3, un acondicionador de señal (TT) en PLC, un motor AC (M\_1) con tornillo sin fin y un variador de velocidad (VFD), los cuales dosifican continuamente el combustible desde la tolva (E\_1) con cisco hacia la unidad calefactora (E\_2) para así regular la temperatura del aire durante el periodo de secado del grano. El lazo de control de temperatura está gobernado por un algoritmo controlador TC en un PLC, que recibe la temperatura que mide el conjunto acondicionador (TT) - sensor (TE), aplicando una acción correctiva sobre el motor M\_1 por medio del variador (VFD), permitiendo la dosificación del cisco (combustible) a la unidad calefactora.

Para la variable de proceso humedad del lote de café, se usan dos celdas de carga (ME) que miden el peso de la masa del café (método gravimet), para realizar un cálculo aproximado de la humedad del mismo durante el proceso de secado [8]. La señal del sensor ME es acondicionada por el módulo MT en un PLC. El control de masa realizado por un algoritmo controlador (MC) en un PLC, determina la humedad de la masa de café usando una relación preestablecida masa-humedad disponible en el mismo algoritmo, finalizando el proceso cuando la masa del lote de café se haya reducido en un 47.3% indicando que la humedad se encuentra en el rango ideal entre 10%-12% base húmeda.

Para la variable de proceso caudal de aire se gobierna el motor-ventilador (M\_2), encargado de extraer el aire caliente de la unidad de calor (E\_2) e inyectarlo a la unidad de secado, se selecciona dependiendo del tamaño de la unidad de secado, entre más grande la capacidad del silo secador de café, más grande la capacidad del ventilador (ver anexo E “Cálculos matemáticos y físicos para el silo tipo guardiola”), este prende y apaga según un algoritmo controlador de flujo (FC) ejecutado en PLC.

Finalmente para la variable de proceso de velocidad de rotación, el motor M\_3 en conjunto con un reductor, aplican la fuerza necesaria para girar el peso completo de la carga de café incluyendo el cilindro (ver anexo E “Cálculos matemáticos y físicos para el silo tipo guardiola”), este prende y apaga según un algoritmo controlador de velocidad (SC) ejecutado en PLC. El cilindro interno debe girar a 6 u 8 revoluciones por minuto, garantizando una uniformidad del secado y una mejor distribución del calor en los granos de café.

En el P&ID del proceso de secado en silo tipo guardiola, ver figura 12, se observa que la unidad de secado (E\_3) posee dos cilindros, el cilindro interno almacena el café a secar con perforaciones de 0.5 cm de diámetro en todo su contorno, mientras el cilindro externo es encargado de retener el aire caliente que es inyectado por la unidad calefactora (E\_2). El aire caliente entrante se inyecta directamente en el cilindro interno, permitiendo que el aire se filtre por las

cavidades o perforaciones para luego pasar hacia la chimenea. Además se aprecia en el P&ID un sistema intercambiador de calor (IC\_1), el cual utiliza los gases salientes de la cámara de secado (E\_3), para calentar el aire entrante a la unidad calefactora.

A continuación la tabla 16 recoge las especificaciones de la instrumentación recomendada para el P&ID, la columna de costos, en miles pesos colombianos, según cotizaciones de julio-agosto de 2016, además en la tabla 17 se muestran las figuras de cada uno de los elementos recomendados para el silo secador tipo guardiola.

Tabla 16 Instrumentación recomendada para el silo secador de café tipo guardiola

Equipo	Referencia	Descripción	Función	Costo (Miles\$)
Controlador	Micro PLC 850 Allen Bradley- incluye software.	Ofrece 20 puntos, de conexión, I/O, 4 entradas analogías, entradas AC 120 V, canal de control de velocidad de un variador, salidas tipo relé, y análogas.	Controlar variables de proceso.	\$2000 Ver figura 21
Sensor de temperatura	Tipo K	0°C a 370°C Diámetro de 3,25 mm	Medir la temperatura dentro de la unidad de secado	\$23 Ver figura 22
Celda de carga	Celda de carga mono bloque SP24-AL	Capacidad 800 kg, fabricada en aluminio, sensibilidad 1.8 mV/V	Medir la pérdida de masa del café durante el proceso.	\$310 Ver figura 25
Módulo transmisor celda de carga	Módulo de pesaje Hardy Process WS	De 2 a 8 entradas para celdas de carga, se compatible con la familia de controladores Allen Bradley	Acondicionar la señal proveniente de las celdas de carga.	\$670 Ver figura 28
Módulo de entradas termopares	Allen Bradley módulo 2085-IRT4	Módulo de complemento de entradas, para RTD y termopares, de 4 canales	Acondicionar la señal en mV que entrega la termocupla.	\$870 Ver figura 31
Fuente de voltaje	S8VKG0302 4	Volteje de entrada 100-240 VAC, 1.2 Amp Voltaje salida 24 VDC	Alimentación de 24 VDC al controlador	\$230 Ver figura 23
Variador de velocidad	Variador 4M Allen Bradley	Alimentación eléctrica de 200 a 240 V, comunicación RS-485	Control de velocidad del Motor_1	520 Ver figura 29

Moto reductor	Moto reductor NORD	Relación 300:1, par nominal de salida 12971 Nm, peso máximo 1277 kg	Acondicionar par motor y velocidad de giro para la unidad de secado.	\$735 Ver figura 30
Motor_1	Monofásico ½ Hp	Voltaje nominal 127V-220V siemens	Dosificar el cisco en unidad calefactora.	\$45 Ver figura 24
Motor_2	Motor ventilador monofásico 1/2 -1 Hp	Voltaje nominal 127V-220V siemens, 3600 R.P.M	Extractor para cámara calefactora	\$520 Ver figura 27
Motor_3	Motor monofásico 5HP A7B825000 07973	Voltaje nominal de 140V-250V siemens	Rotar cilindro interno de la cámara de secado	\$670 Ver figura 26
Total:				\$5.525

Tabla 17 Equipos e instrumentos recomendados para el silo secador tipo guardiola.

Controlador Micro PLC 850



Figura 13

Termocupla tipo K



Figura 14

Fuente de voltaje OMRON



Figura 15

Celda de carga mono bloque LEXUS



Figura 17

Ventilador extractor de aire SIEMENS



Figura 19

Variador de velocidad 4M



Figura 21

Motor monofásico 1/2 Hp siemens  
unidad calefactora

Figura 16

Motor monofásico 5Hp siemens  
unidad de secado

Figura 18

Módulo de pesaje WS HARDY



Figura 20

Moto reductor NORD relación 300:1



Figura 22

Módulo de termocupla de 4 canales Rodamientos de soporte del cilindro  
2085-IRT4



Figura 23



Figura 24

### 3.2.4 Cumplimiento requisito técnico 5

**RT5:** Mejorar el sistema de protección eléctrica para evitar daños en los elementos electrónicos principales.

Toda instalación eléctrica tiene que estar dotada de una serie de protecciones que la hagan segura, tanto desde el punto de vista de los conductores y los aparatos a ellos conectados, como de las personas que han de trabajar con ella, por esta razón se recomienda mejorar las protecciones del sistema eléctrico del silo secador tipo guardiola, evitando así daños en los elementos electrónicos o equipos durante el proceso de secado.

Para dar cumplimiento a **RT5** se diseñan los diagramas de mando y diagrama de potencia de los motores M\_2 y M\_3 (ver figura 25,26,27,28), para el motor M\_1 no es necesario diseñar diagrama de mando ya que este motor está gobernado por un variador de velocidad 4M Allen Bradley.

En el diagrama de mando del motor ventilador M\_2 (ver figuras 25 y 26), se aprecia dos maneras de gobernar el motor, la primera es modo manual, que consiste en el encendido y apagado con botoneras (S1/ON) (S0/OFF), y la segunda activación es modo PLC, que consiste en prender (R2X1) o apagar (R2X2) el motor gobernado por la lógica del proceso de secado de café, estos dos relés auxiliares están conectados a 2 salidas de 24 V del PLC, O-00 y O-01. Además se implementa un sistema que permite al PLC determinar si el motor está encendido, apagado o se encuentra en fallo (OVERLOAD), la entrada del PLC I-04 para encendido y apagado del motor y la entrada PLC I-05 para sobrecarga, cada uno de estos estados con su luz piloto.

Diagrama de mando motor ventilador M\_2

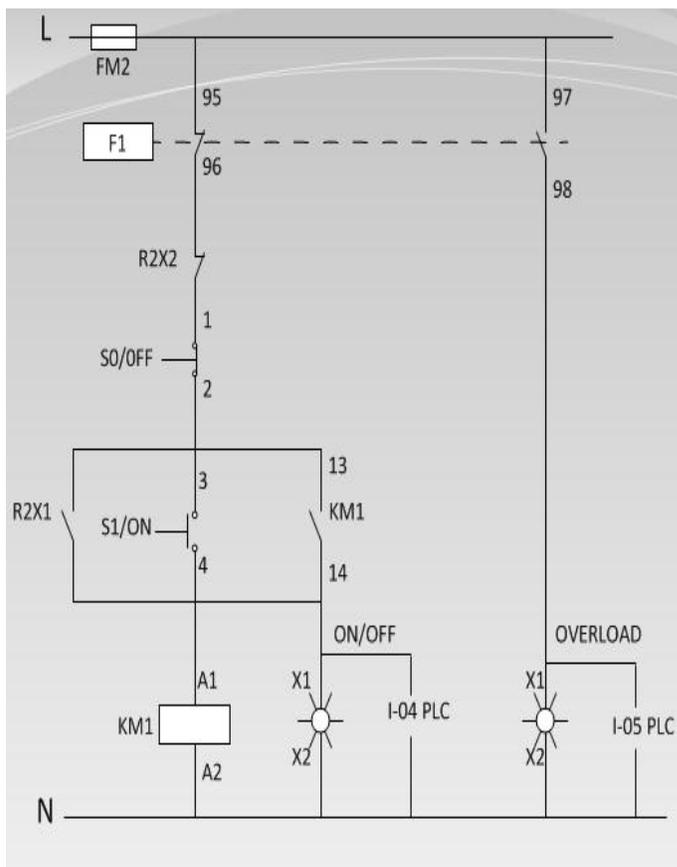


Figura 25. Fuente propia

Diagrama de potencia motor ventilador M\_2

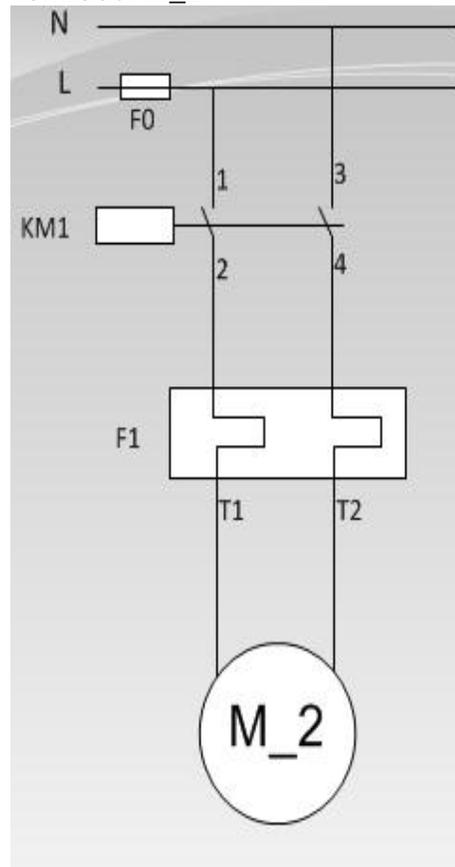


Figura 26. Fuente propia

A continuación en la tabla 18 se presenta la lista de elementos que componen los diagramas de mando y potencia del motor M\_2.

Tabla 18 Lista de elementos electrónicos para los diagramas de mando y potencia motor M\_2

Nombre	Abreviatura	I/V Motor	Referencia	I/V elemento
Contactora	KM1	15.5/6.6 A corriente nominal 127/220 V tensión nominal	LC1D25	25 A/220V
Relé térmico	F1		LR2D1322	17-25 A
Fusible	F0		RT18-32(X)	32 A/ 500 V
Cable	-		6 mm	29 A
Relé auxiliar	R2X1 (X2)	-	NC6-0608	20A/24V
Encendido	S0/OFF	-	XB4-V	220/240V
Apagado	S1/ON	-	XB4-R	220/240V
Fusible mando	FM2	-	XRNT1	2 A
Lámpara led	ON/OFF	-	17523	220V
Lámpara led	OVERLOAD	-	17522	220V

En el diagrama de mando del motor ventilador M\_3 (ver figuras 27 y 28), se aprecia dos maneras de gobernar el motor, la primera es modo manual, que consiste en el encendido y apagado con botoneras (S1/ON) (S0/OFF), y la segunda activación es modo PLC, que consiste en prender (R3X1) o apagar (R3X2) el motor gobernado por la lógica del proceso de secado de café, estos dos relés auxiliares están conectados a 2 salidas de 24 V del PLC, O-02 y O-03. Además se implementa un sistema que permite al PLC determinar si el motor esta encendido, apagado o se encuentra en fallo (OVERLOAD), la entrada del PLC I-06 para encendido y apagado del motor y la entrada PLC I-07 para sobrecarga, cada uno de estos estados con su luz piloto.

Diagrama de mando motor unidad secadora M\_3

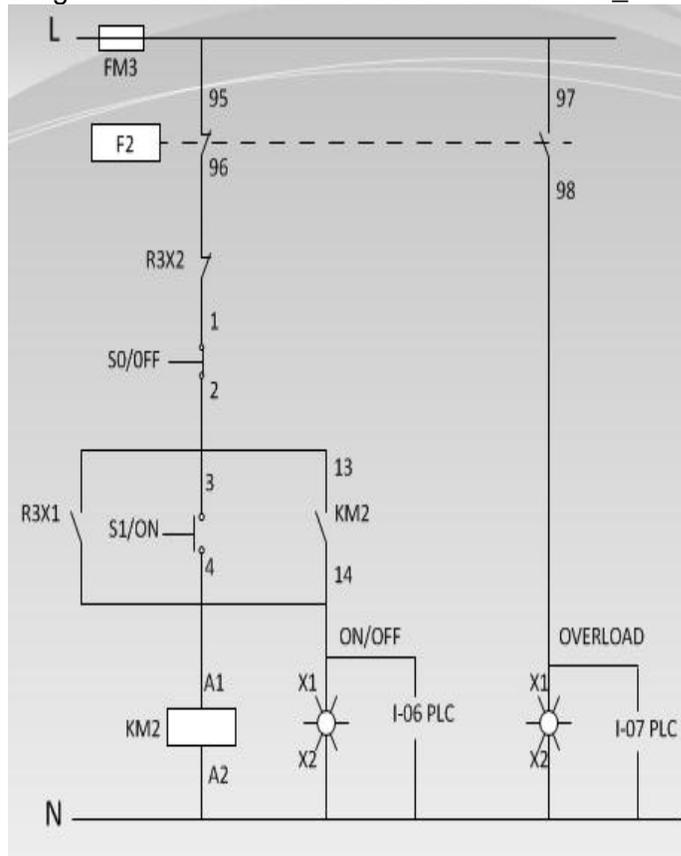


Figura 27. Fuente propia

Diagrama de potencia motor unidad secadora M\_3

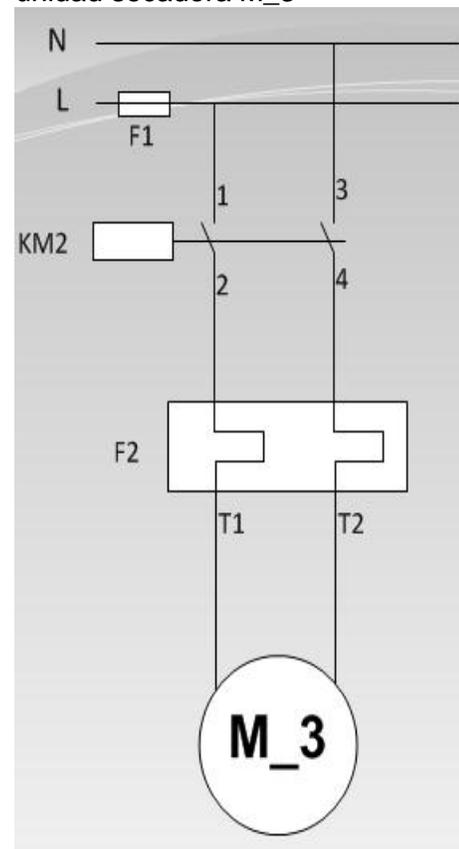


Figura 28. Fuente propia

A continuación en la tabla 19 se presenta la lista de elementos que componen los diagramas de mando y potencia del motor M\_3.

Tabla 19 Lista de elementos electrónicos para los diagramas de mando y potencia motor M\_3

Nombre	Abreviatura	I/V Motor	Referencia	I/V elemento
Contactador	KM2	23.5/13.8 A corriente nominal 127/220 V tensión nominal	LC1D32	32A/220V
Relé térmico	F2		LR2D2355	28-36 <sup>a</sup>
Fusible	F1		RT18-32(X)	32 <sup>a</sup>
Cable	-		8 mm	33 A
Relé auxiliar	R3X1 (X2)	-	NC6-0608	20A/24V
Encendido	S0/OFF	-	XB4-V	220/240V
Apagado	S1/ON	-	XB4-R	220/240V
Fusible mando	FM3	-	XRNT1	2 A
Lámpara led	ON/OFF	-	17523	220V
Lámpara led	OVERLOAD	-	17522	220V

Los elementos electrónicos y referencias presentes en los diagramas de mando y potencia, se consultaron y se adquieren en la distribuidora Eléctricas Bogotá [33].

### 3.2.5 Cumplimiento del requisito técnico 6

**RT6:** Proponer actividades de mantenimiento adecuados para el silo mecánico tipo guardiola

Para dar cumplimiento a RT6, se diseña y brinda al cafetero una guía sobre el buen uso del silo secador tipo guardiola, en forma de una lista de chequeo, que contiene las actividades de mantenimiento y reparación, organizada en pasos que debe realizar al iniciar el proceso de secado, el antes y después de utilizar el silo, para garantizar un correcto funcionamiento.

Para garantizar una correcta elaboración del café, se hace imprescindible realizar diariamente una estricta limpieza en la unidad de secado, evitando así el deterioro de la calidad del producto a procesar. El problema de la falta de limpieza, es uno de los factores que más influye en la mala calidad, pues, se mezclan cafés de días anteriores que están sobre secos y un lote de café con granos sobre secos, esto perjudica gravemente su calidad, ocasionando como consecuencia que el café no tenga una taza de calidad buena, o que no sea apto para la exportación.

En la planta de beneficiado seco (secado y almacenado), se debe mantenerse una limpieza estricta. Así, se previenen plagas como el gorgojo y otras que destruyen el grano del café. Es importante que se revise el café almacenado para detectar focos de infección y combatirlos inmediatamente. Al finalizar el procesamiento se debe proceder a barrer toda la planta incluyendo la limpieza de los equipos de tal forma que no permanezcan residuos de café de la cosecha anterior.

Entre las recomendaciones generales a tener en cuenta:

- Lavar y limpiar la unidad de calefactora y unidad de secado diariamente.

- No permitir que haya granos rezagados en la unidad de secado que se mezclen con el nuevo lote de café a elaborar.
- Implementar controles de limpieza estrictos (operario encargado).
- Mantener limpieza en el almacén.
- Mantener revisión periódica de su café almacenado una vez por semana.
- Recordar que la calidad del café es afectada si no hay limpieza estricta.

### Limpieza del silo secador guardiola

Es importante, por seguridad y funcionamiento eficiente, mantener el secador limpio, las partes del interior de la máquina que no pueden alcanzarse directamente desde las puertas de acceso, se debe entrar en el secador (cuando este frío y detenido). Utilizar un cepillo suave, un trapo, una espátula de plástico y una cubeta.

### Inspección diaria.

- Retirar la basura de la cámara y ductos de aire, mantener sumo cuidado con los sensores.
- Inspección de los ductos limpiando el material acumulado.
- Limpiar la estructura cilíndrica de residuos, dejando las ranuras (malla de acero) de escape completamente limpias
- Retirar el polvo del quemador (unidad calefactora) y revisar si hay desgaste o corrosión.
- Al terminar el proceso de secado, se debe tapar la entrada de aire del calefactor, para evitar taponamientos.
- Verificar las conexiones eléctricas.

A continuación la tabla 20 recoge una lista de chequeo para ayudar al caficultor a identificar problemas y hacer un buen uso del silo tipo guardiola.

Tabla 20 Lista de chequeo y mantenimiento para silo secador tipo guardiola

POSIBLES CAUSAS		#	POSIBLES SOLUCIONES	#					
PROBLEMAS EN EL MOTOR DOSIFICADOR M.1	ATASCAMIENTO DEL TORNILLO SIN FIN	1	INSPECCIONAR, LIMPIAR Y ENGRASAR	1	5	13	9		
	DESCONEXION EN CABLES DE ALIMENTACION DEL MOTOR	2	INSPECCIONAR Y RECONECTAR	2	6	10	19	4	
	DESCONEXION DEL VARIADOR HACIA EL MOTOR	3	INSPECCIONAR, VER DIAGRAMA DE LAZO Y CONECTAR	3	8	12	14	18	
	FALLO DEL VARIADOR	4	INSPECCIONAR MOTOR	7	11	9	4		
PROBLEMAS EN EL MOTOR VENTILADOR M.2	ATASCAMIENTO VALINERAS DEL VENTILADOR	5	INSPECCIONAR FUSIBLE Y RELE TERMICO	7	11				
	DESCONEXION EN CABLES DE ALIMENTACION DEL MOTOR	6	REEMPLAZAR FUSIBLE Y RELE TERMICO	7	11				
	ESTADO DE SOBRE CARGA (OVERLOAD)	7	REEMPLAZAR O REPARAR MOTOREDUCTOR	9					
	DESCONEXION MOTOR AL RELE DEL VARIADOR	8	INSPECCIONAR, LIMPIAR Y RECONECTAR	15	16	17			
PROBLEMAS EN EL MOTOR DE GIRO M.3	DAÑO EN MOTOREDUCTOR	9	REEMPLAZAR TERMOCUPLA	15	16	17			
	DESCONEXION EN CABLES DE ALIMENTACION DEL MOTOR	10	INSPECCIONAR CELDAS, VER DIAGRAMA DE LAZO Y RECONECTAR	19	20				
	ESTADO DE SOBRE CARGA (OVERLOAD)	11	CONTACTAR A LA COMPAÑIA O INGENIERO	21	22	23			

	DESCONEXION MOTOR AL RELE DEL VARIADOR	12	UTILIZAR EL SECADOR DE CAFÉ DE MODO MANUAL	21				
	ATASCAMIENTO MOTOREDUCTOR-MOTOR	13						
PROBLEMAS CON EL SENSOR DE TEMPERATURA	DESCONEXIÓN DEL SENSOR AL MODULO	14						
	LECTURA DE TEMPERATURA HERRATICA	15						
	TEMPERATURA SUPERIOR A LOS 50°C	16						
	ALIMENTACION EXCESIVA DEL MOTOR DOSIFICADOR HACIA EL HORNO DE COMBUSTION	17						
PROBLEMAS CON LAS CELDAS DE CARGA	DESCONEXION DE LOS CELDAS DE CARGA AL MODULO DE PESAJE	18						
	LECTURA ERRATICA DEL PESO VS HUMEDAD	19						
	NO MUESTRA LECTURA DE MASA	20						
	FALLO DEL PLC	21						
	DAÑO DEL VARIADOR	22						
	DAÑO PERMANENTE DE MOTOR (M_1-M_2-M_3)	23						

### 3.3 Cumplimiento de requerimientos administrativos del proceso de secado del café

**RA1:** Definir con un experto el proceso detallado del secado de café que se debe seguir en la finca, con el fin de obtener la mejor la calidad del producto.

Para dar cumplimiento con el requerimiento administrativo **RA1**, se pidió una asesoría de un técnico cafetero de la seccional Timbío del Comité nacional de cafeteros, para que explicase las actividades y pasos que se deben seguir en el secado mecánico.

Con la ayuda del señor Jorge Eduardo Hurtado Valencia, identificado con la cedula 10.547.280 de Popayán, con más de 19 años trabajando como técnico en el Comité Nacional de Cafeteros, lista trece (13) pasos para realizar un secado apropiado en fincas cafeteras que utilizan silos secadores mecánicos, y hace una recomendación de la publicación de la cartilla [34], para complementar esta información.

1. Para utilizar el secado mecánico en una finca cafetera se deben de tener por lo mínimo una producción de café por año de 500@ de café.
2. El caficultor debe tener un conocimiento básico sobre el cultivo y beneficio del café.
3. El aire del secado en silos mecánicos no debe de sobrepasar los 50°C.
4. Se recomienda que el combustible utilizado sea lo menos contaminante posible, no utilizar ACPM y en lo posible utilizar Cisco.
5. Al utilizar un secador mecánico se disminuye considerablemente el tiempo de secado del café.
6. Se debe iniciar el secado de café tan pronto se termine el lavado del café.
7. Dejar escurrir el agua después de lavar el café, para evitar demoras y daños en el equipo mecánico.

8. No hay que permitir que el café se rehumedezca durante el secado, esto quiere decir que no se debe de agregar agua si el proceso de secado está en marcha.
9. Distribuir muy bien el grano en capas delgadas, abstenerse de sobre pasar el límite de carga del silo.
10. Revolver el café constantemente, por decirlo cada hora.
11. Jamás tratar de devolverle la humedad al café sobre secado, porque se blanquea y los granos tienden a fermentarse. (pérdida parcial del lote).
12. Sacar el café del silo cuando su humedad este entre el 10 % y 12 % de humedad, estar revisando el grano después de 23 horas más seguido.
13. Finalmente dejarlo reposar (enfriar).

**RA2:** Proponer un proceso documentado al 100 % del secado de café para la finca, modelándolo en términos de ISA S88.01, evitando una dependencia absoluta del trabajador encargado, en caso de ausentarse de su labor.

Para dar cumplimiento al requerimiento **RA2**, se proponen los modelos ISA S88.01 generales para un secado de café en silo mecánico capa fija, se aplican las recomendaciones realizadas por el experto, basándose en los modelos de la finca “La Fantasía” (ver anexo C “Modelado ISA S88.01 del secado de café”) y los resultados obtenidos en el estudio de las entrevistas, además se propone dividir el silo secador en dos (2) unidades, unidad calefactora y unidad de secado.

En primer lugar se establece un nuevo modelo físico del secador mecánico, con sus módulos de equipo y módulos de control mínimos para desarrollar el proceso de secado, ver tabla 21.

Tabla 21 Modelo físico general de un secador mecánico de capa fija

Célula de proceso	Unidad	Módulo de equipo	Módulo de control
Secado de café por método mecánico en silo.	Unidad calefactora	Dosificador	Motor dosificador
			Arrancador MD
		Calefactor de aire	Termocupla
			Motor extractor
	Unidad de secado	Cámara de secado	Arrancador ME
			Dosificador (operario)
			Mezclador (operario)
			Medidor de humedad (operario)

Desarrollando el modelo físico general de un secador mecánico de capa fija, se presenta el modelo de control de procedimiento del secado de café en silo mecánico basado en las recomendaciones del experto, a este modelo se agregó una fase llamada “evitar rehumedecer”, al referirse a esta fase, se quiere evitar el agregar agua al lote de café si este se sobre seca, al perder masa de café el precio por lote sería menor, por esta razón algunos caficultores agregan agua para recuperar masa y humedad en el lote seco de café, Ver tabla 22.

Tabla 22 modelo de control, de procedimiento genérico de un silo mecánico de capa fija

Procedimiento	Procedimiento de Unidad	Operación	Fase
Obtención de café seco	Secado de café en capa estática	Recepción café (53% bh)	Fermentar
			Lavar
			Escurrir
		Depositar café en bandejas	Dosificar
			Medir
			Ajustar
			Preparar y depositar cisco
		Secar	Preparar módulos
			Inyectar aire caliente
			Medir temperatura
			Mezclar café
		Supervisar humedad	Tomar muestra
			Evaluar
			Determinar
			Evitar rehumedecer
		Enfriar café	Apagar unidades
			Esperar
Empacar			

En la tabla 23 del modelo de control de procesos del secado de café, se realizaron dos cambio sugeridos por el experto, el primero de ellos fue el tiempo de mezclado del café en un silo mecánico de capa fija debería de realizarse cada hora aproximadamente, no cada 5 horas como se modeló en “La Finca la Fantasía” (ver tabla 2 en anexo C, “Modelado ISA S88.01 del secado de café”), y el segundo cambio fue agregar la acción de proceso de “evitar rehumedecer” el café si este se sobre seca.

Tabla 23 Modelo control de procesos genérico de un silo mecánico de capa fija

Proceso	Etapas de proceso de secado.	Operaciones de proceso	Acciones de proceso
Secado de café en silo.	Recepción	Almacenar café pergamino.	Fermentación del café durante 24 horas para aumentar calidad y aroma
			Medir y comprobar PH del sustrato café fermentado
			Lavado de café removiendo el mucilago (baba) completamente.
			Ecurrir el lote de café a secar, para eliminar la mayor cantidad de agua posible después del lavado
			Almacenado de cisco en lugar libre de humedad.
	Preparación del silo.	Depositar el café en las bandejas.	Dosificar la cantidad de café a secar
			Medición del grosor de la capa de café a secar. Depende de la capacidad en kg del silo.
			Ajustar el grosor al nivel deseado.
			Dosificación del cisco en tolva, lleno total en tolva.
	Secado del café	Secar	Preparar módulos, realizar encendido del módulo calefactor y modulo dosificador
			Inyectar aire caliente en silo no mayor a 50°C (secado tradicional)
			Medir y mantener temperatura por más de 20 horas en el secado
			Variar temperatura de secado (30°C) si se necesita, para aumentar calidad del café.
			Mezclar café en las bandejas durante el secado, para que el grano adquiriera uniformidad.(cada hora aproximadamente)
		Supervisar humedad	Tomar muestra accediendo al silo, trillar pequeña cantidad (6 gr) de café a mano.
Evaluar la humedad presente con método del color de la almendra.			

			Determinación de la humedad.
			Evitar rehumedecer el café si este está por debajo del 10% de humedad, porque se blanquea y los granos tienden a fermentarse.
			Apagado de la unidad calefactora y unidad secadora.
	Enfriamiento	Enfriar café	Espera de 30 minutos.
			Acomodar café en costales de yute de 50 kg.

**RA3:** Mejorar en los trabajadores las acciones de proceso y actividades relacionadas con el secado del café acorde al proceso documentado.

Al recopilar las recomendaciones de secado de café en silo mecánico del experto y haber dado cumplimiento a **RA2** desarrollando los modelos de la ISA S88.01, es responsabilidad del dueño o administrador de la finca, que la información se guarde como uno de sus activos intangibles más valiosos, y se preocupe de brindar al interior de la finca la debida capacitación periódica a sus trabajadores, con el fin de que ellos sigan acciones de proceso y fases adecuadas sobre el proceso de secado del café.

**RA4:** Definir un pronóstico de producción por cosecha, preparando al caficultor para visualizar la cantidad de producto a procesar.

Para dar cumplimiento a RA4, se deben organizar actividades de capacitación organizadas por el Comité Nacional de cafeteros con la ayuda de Cenicafé para desarrollar una agenda de campañas de enseñanza sobre como prever y organizar un pronóstico de producción en su finca cafetera, esto serviría como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, puede ser de utilidad en aspectos relacionados con la programación de labores administrativas en el cultivo, en la determinación del número de trabajadores necesarios para recolección de la cosecha, en el cálculo de la capacidad y dimensión de la infraestructura para los procesos por los cuales pasa el grano hasta su comercialización, en especial para el proceso de secado, y esto ayuda mucho en la venta anticipada de su producción con algún comprador de café especial. Los métodos recomendados por el Comité Nacional De Cafeteros y Cenicafé que establecen pasos para los pronósticos de la producción se encuentran en [35].

**RA5:** Promover la cultura empresarial e industrial, formando una visión y considerando estrategias de continuidad y mejoras en el desarrollo de la labor cafetera en los caficultores.

Para dar cumplimiento a **RA5** se quiere que los caficultores vean su finca como una organización que comprende un conjunto de valores, hábitos y tradiciones compartidos por las personas que integran su organización, para esto se necesita

el apoyo de la Federación Nacional de Cafeteros, la cual debe crear programas y capacitar a sus técnicos sobre el cómo convertir al caficultor en un empresario, y proyectarlo cada vez más hacia los retos administrativos, comerciales y económicos que actualmente enfrenta el sector cafetero.

### 3.4 Cumplimiento de requerimientos funcionales del proceso de secado del café

**RF1:** Adaptar los modelos de control de procesos y el modelo de control de procedimiento, detallándolos de forma correcta en sus acciones de proceso y fases para garantizar una mejor calidad en el proceso de secado de café usando el silo tipo Guardiola.

Para dar cumplimiento a RT1 se desarrollan los modelos ISA S88.01, basados en el diseño y optimización del silo secador tipo guardiola del presente trabajo de grado, ver tabla 24, 25, 26.

Tabla 24 Modelo físico del silo secador de café tipo guardiola con unidad intercambiadora.

Célula de proceso	Unidad	Módulo de equipo	Módulo de control
Secado de café por método mecánico en silo tipo guardiola.	Unidad calefactora	Tolva de dosificación	Motor dosificador cisco
			Variador de velocidad
		Calefactor de aire	Motor ventilador
			Arrancador motor ventilador
			Sensor de temperatura
	Unidad de secado	Cilindro interno de café	Motor de movimiento
			Arrancador motor de movimiento
		Medición de humedad	Celdas de carga
			Controlador masa de café
	Unidad de intercambio térmico	Intercambiador de calor	-

Tabla 25 Modelo de control de procesos del secado de café en silo tipo guardiola

Proceso	Etapas de proceso de secado.	Operaciones de proceso	Acciones de proceso	
Secado de café en silo tipo guardiola.	Almacenar café.	Recepción de café	Fermentación del café durante 24 horas para aumentar calidad y aroma	
			Medir y comprobar PH del café fermentado	
			Lavado de café removiendo el mucilago (baba) completamente.	
			Ecurrir el lote de café a secar, para eliminar la mayor cantidad de agua posible después del lavado	
	Preparación del silo.	Depositar café en unidad secadora.	Medición de la masa de café a secar. Depende de la capacidad en kg del silo guardiola.	
			Ajustar la masa de café deseado.	
			Dosificación del cisco en tolva, lleno total en tolva.	
	Secado del café	Secar	Encender la cámara de combustión de la unidad calefactora, chispa para el horno	
			Establecer Set Point de la temperatura de secado	
			Preparar unidades, realizar encendido unidad calefactora y unidad de secado	
			Mantener temperatura por más de 20 horas en el secado (50°C)	
			Inyección de aire caliente hacia la unidad de secado	
			Medir la temperatura de entrada del aire de la unidad de calor	
			Dosificación de cisco hacia la cámara de combustión	
			Giro del silo guardiola entre 6 y 9 rpm, para garantizar uniformidad en el secado del grano	
			Supervisar humedad	Medir masa del café durante el proceso de secado
				Comparar masa de café con la humedad correspondiente del 10%-12% b.h
	Observar el registro de peso vs			

			humedad (Gravimet) en pantalla PLC.
			Parar proceso de secado
			Evitar rehumedecer el café si este está por debajo del 10% de humedad, porque se blanquea y los granos tienden a fermentarse
	Enfriamiento	Enfriar café	Espera de 30 minutos.
			Acomodar café en costales de yute de 50 kg.

Tabla 26 Modelo de control de procedimiento secado de café en silo tipo guardiola

Procedimiento	Procedimiento de Unidad	Operación	Fase		
Obtención de café seco	Secado de café en capa estática	Recepción café (53% bh)	Fermentar		
			Medir PH		
			Lavar		
			Ecurrir		
		Depositar café unidad secadora	Medir		
			Ajustar		
		Secar	Secar	Secar	Preparar y depositar cisco
					Encender cámara de combustión
					Establecer Set Point
					Preparar unidades
					Mantener temperatura
					Inyección de aire
					Medir temperatura
					Dosificar cisco
					Mezclado de café
					Supervisar humedad
		Comparar masa			
		Parar proceso			
		Evitar rehumedecer			
		Enfriar café	Enfriar café	Enfriar café	Esperar
Empacar					

**RF2:** Recomendar e Implementar nuevas y mejoradas fases, en particular la relacionada en fermentación en el proceso de secado de café, que contribuyan a un mejor resultado del producto seco.

Para dar cumplimiento a RF2 se implementan las fases de “fermentación” y “Evitar rehumedecer” en el proceso de secado de café en silo mecánico tipo guardiola, estas dos fases nos permiten mejorar la calidad final del lote de café seco.

Mediante la práctica del proceso de fermentación, lavado y secado controlados del café despulpado, se obtienen bebidas con aromas y sabores de buena calidad. Por el contrario, si se sobre pasa el tiempo de fermentación y no se controlan los factores y no se conocen los cambios que ocurren en este proceso, se pueden generar defectos en la calidad, como el grano manchado, vinagre, sabores agrios y fermento en la bebida. En particular, la velocidad y compuestos formados en la fermentación del café dependen de la calidad del sustrato, madurez y sanidad del fruto que influyen en la composición química y microbiológica de los granos despulpados; de factores ambientales como la temperatura externa y la higiene de las instalaciones, ambientes y equipos; del tiempo y del sistema mismo de fermentación [36].

Al evitar rehumedecer el café durante o después del secado, se evita que el grano se blanquee y fermente, esta actividad arruina totalmente la calidad del café, algunos caficultores agregan agua a su café si este ha perdido mucha humedad, esto les permite recuperar masa a la hora de venderlo, pero lo que esto trae es problema al venderlo y su precio de venta baja considerablemente [37] [34].

## 4 MEJORAS TÉCNICAS EN EL SECADO DE CAFÉ MECÁNICO

En este capítulo se validan las mejoras técnicas y de automatización aplicadas al silo secador de café estático, más específicamente la unidad de secado, reflejadas en el nuevo diseño de silo tipo guardiola, por medio de la medición de criterios de desempeño obtenidos de simulaciones en el software Solid Works.

### 4.2 Silo secador capa fija (SSCF) y Silo secador tipo guardiola (SSTG)

Se construyen los modelos 3D de dos unidades de secado, una por cada silo (SSCF y SSTG) en la herramienta Solid Works: el silo secador de capa fija (SSCF), más utilizado en la región del sur occidente caucano, y el silo secador tipo guardiola (SSTG). Esto permitió simular el comportamiento termodinámico, distribución del flujo de aire entre otros factores dentro de la unidad de secado que afectan considerablemente la calidad del grano, tiempo de secado y costos de producción, ver tabla 27.

Tabla 27 Características de los silos secadores de café para simulación Solid Works 2015.

Tipo de silo	Dimensiones	Capacidad	Tiempo de secado por carga	Materiales de la estructura
SSCF	Ancho:1.25 m Largo:1.5 m Alto:2.3 m	80@ 907 kg	25-30 horas	Acero, Láminas de aluminio
SSTG	Radio:1.2 m Altura:3 m	80@ 907 kg	18-20 horas	Acero, láminas de aluminio.

#### 4.2.1 Diseño y medidas del SSCF

En el diseño de SSCF se usaron las medidas de un secador estático convencional como los normalmente usados en las fincas cafeteras de la región del sur occidente caucano de 80@ (907 kg), ver tabla 27, en la figuras 29.a) a 29.d) se observan sus vistas: isométricas, frente, lateral derecha y superior. Este es un silo donde se deposita el café en dos bandejas ubicadas a distancias de 86 y 126 centímetros de la base del silo, cada una de ellas debe tener perforaciones en su área para permitir el paso del aire, el calibre de las perforaciones y la regularidad de las mismas se determina por el comprador o por la empresa que construye el silo, hay una puerta de 205 centímetros de altura que permite acceder y depositar el café, en la parte inferior hay una apertura circular de radio 11 centímetros para la entrada de aire caliente ( $50^{\circ}\text{C}$  ó  $323.15^{\circ}\text{K}$ ) y finalmente en la parte superior hay un cilindro de altura 120 centímetros y radio de 12.5 centímetros que forma una chimenea y permite el escape de aire caliente y humedad, ver tabla 28-para

detallar las diferentes medidas de la unidad de secado del SSCF modelado en Solid Works.

Vistas y medidas de la unidad de secado del SSCF. a) isométrica, b) frontal, c) lateral derecha, d) vista rejilla.

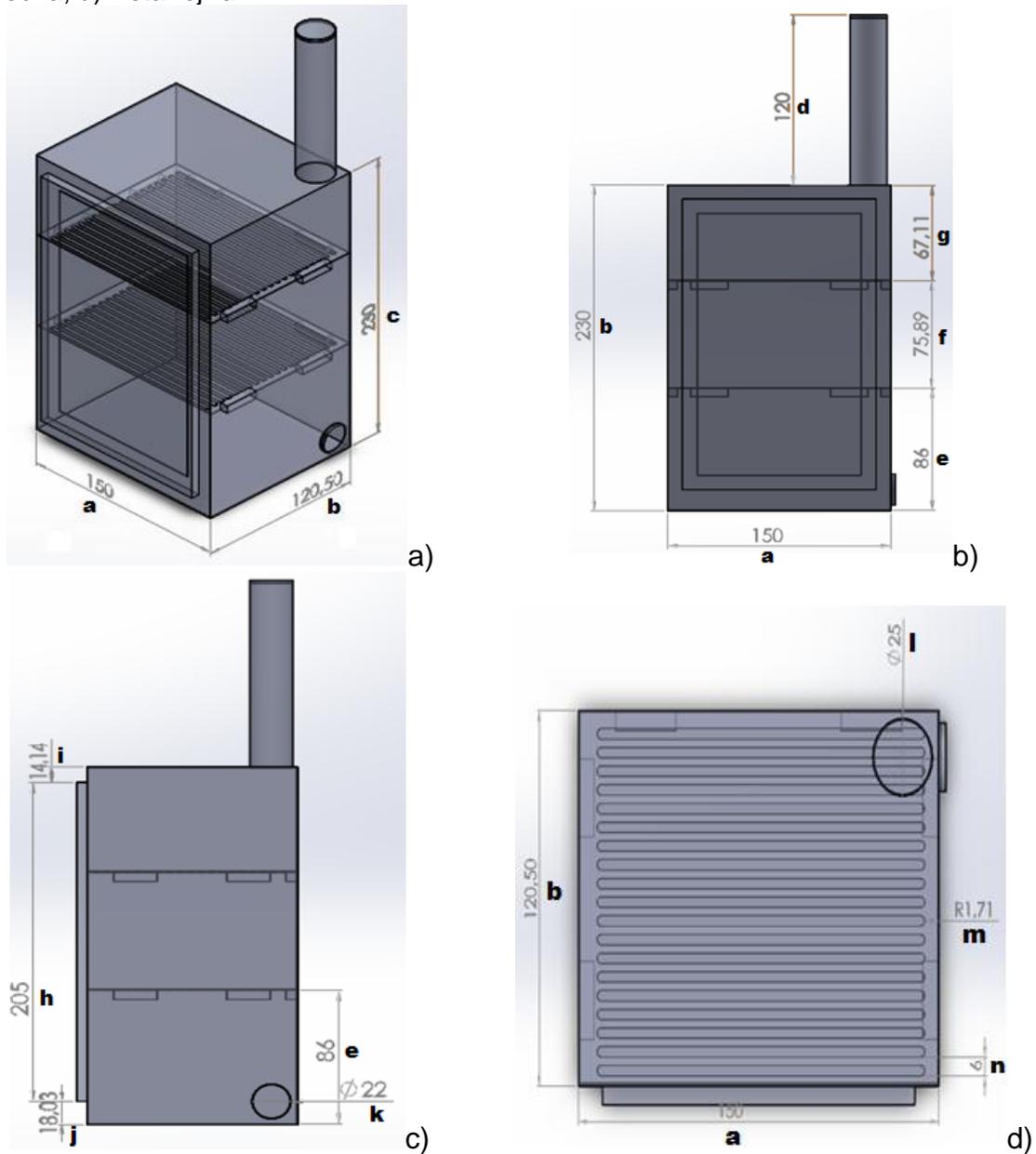


Figura 29. Fuente propia

Tabla 28 Medidas usadas en la simulación del SSCF.

	Nombre	cm
c	Altura máxima del silo	230
a	Largo del silo	150

b	Ancho del silo	120
d	Altura de la chimenea	120
e	Distancia base a primera bandeja	86
f	Distancia de bandeja a bandeja	76
g	Distancia de segunda bandeja a tapa superior	67
k	Diámetro entrada de aire caliente	22
l	Diámetro chimenea	25
h	Altura puerta de acceso	205
j	Distancia de la base a base de la puerta	18
i	Distancia de la puerta a tapa superior	14
m	Longitud del ovalo de perforaciones	1.7
n	Distancia entre perforaciones	6
o	Número de perforaciones por cada rejilla	19

#### 4.2.2 Evaluación termodinámica SSCF

La evaluación termodinámica del SSCF, se llevó a cabo en la herramienta Solid Works, para ello se configuraron una serie de parámetros de simulación que parten de establecer cuáles son las especificaciones, propiedades físicas de los materiales, laminas y soldaduras, además de las condiciones iniciales de flujo de aire (0.7 Kg/s), caudal de aire (0.583 m<sup>3</sup>/s) y temperatura (50°C- 323.15 °K) a la entrada de la unidad de secado o la salida de la unidad de calefacción, todo esto para que el estudio del silo sea lo más similar al secador en condiciones reales de trabajo, (ver anexo F “Procedimiento de simulación termodinámico en Solid Works”).

##### 4.2.2.1 Distribución de temperatura de las caras unidad de secado del SSCF

Para analizar el comportamiento de la temperatura en las paredes de la unidad de secado del SSCF, esta se simula en funcionamiento con las condiciones iniciales de las variables temperatura, flujo y masa de aire y junto con las propiedades físicas de los materiales de construcción. Se presentan en las figuras 30.a) a 30.f) los resultados e imágenes de la simulación de distribución de temperatura de la unidad de secado del SSCF. Las caras de la unidad de secado están enumeradas así, cara 1 vista frontal, cara 2 vista lateral derecha, cara 3 vista posterior y cara 4 vista lateral izquierda.

Distribución de temperaturas de la unidad de secado del SSCF. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) izquierda, f) isométrica 2.

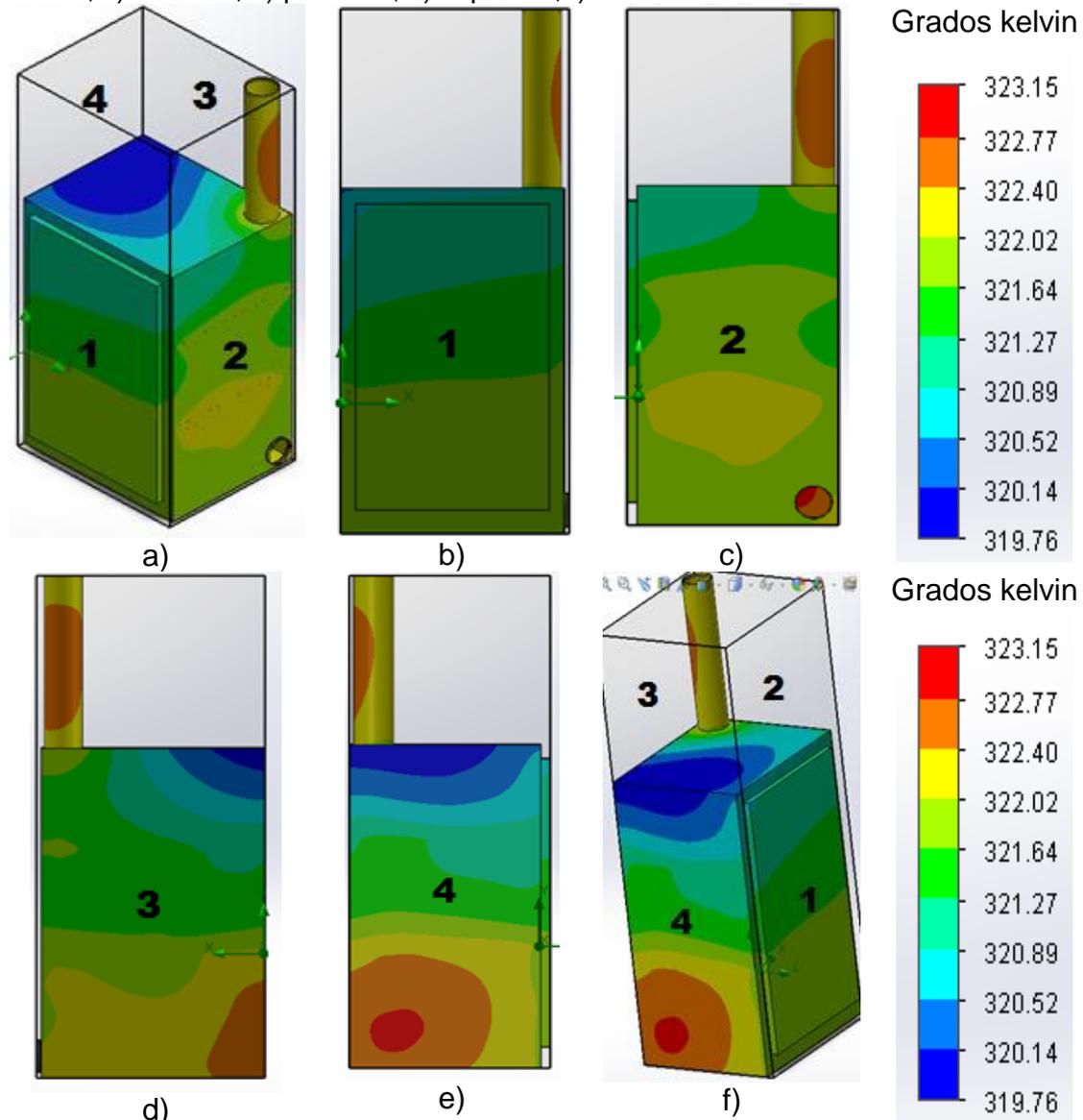
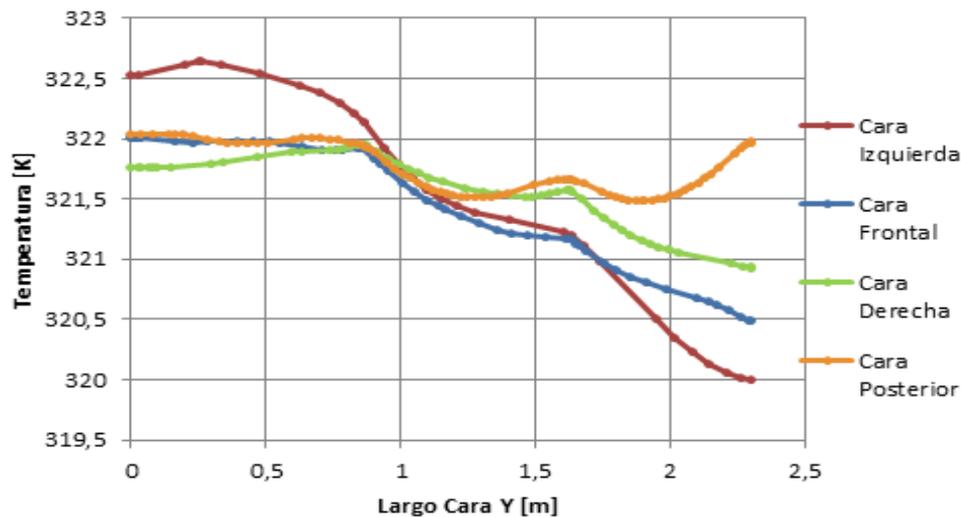


Figura 30. Fuente propia

Con el fin de analizar el comportamiento de la temperatura en cada pared o cara en la unidad de secado, se analizan las curvas de temperatura versus el largo de cada una de las caras. Como cada cara posee un alto y ancho Solid Works promedia la temperatura a lo largo de su ancho en un punto a lo largo de su altura. Se muestra en la gráfica 1 la temperatura de las paredes laterales de la unidad de secado del SSCF.

Temperatura de las cuatro caras de la unidad de secado del SSCF.



Grafica 1. Fuente propia

Los resultados arrojados de la simulación de la unidad de secado del SSCF, muestran que las caras laterales que reciben el aire caliente varían y disminuyen su temperatura conforme aumenta la distancia de la base de la unidad (desde 0 m a 2.3 m).

Se observa que en las distancias 0.86 m y 1.62 m (ver grafica 1.) donde se encuentra la primera y segunda rejilla que contiene el lote de café, se presenta una caída de temperatura. Esto se debe a que las rejillas se oponen al paso del aire caliente, absorben energía térmica y se disipa el calor presente en la unidad, esto afecta directamente la temperatura a la que se expone el grano de café durante el secado.

Se puede notar que en la vista frontal unidad de secado es una de las más frías de todas ya que esta pared es la más alejada del ducto de alimentación de aire caliente, y la cara de la vista izquierda del silo es la más caliente, ya que el aire caliente que ingresa por el ducto choca directamente en esta pared, y por lo tanto absorbe más calor. Se puede decir que el comportamiento térmico de la unidad de secado no es uniforme.

Una de las propiedades del aluminio es su gran conductividad térmica (209.3 W/(m K)) permitiendo conducción de calor y poca disipación de energía térmica, por esta razón la perdida de máxima temperatura (ver grafica 1.) presente en las paredes de la unidad de secado es de 3.39°K.

Al analizar la cara izquierda de la vista de la unidad de secado, se observa que en el punto más bajo la temperatura alcanza un máximo de 322.6 K, pero también se nota que en la parte superior de esta cara y en la cara superior se ve la superficie más fría de toda la unidad, esto se debe a pérdidas de calor durante todo el recorrido del aire hasta llegar al tope de la unidad de secado.

Al tener los datos de la gráfica 1, el software Solid Works entrega los valores mínimos, máximos y promedio de la temperatura presente en unidad durante el proceso de secado, mostrados en la tabla 29.

Tabla 29 Temperaturas características en las paredes de la unidad de secado del SSCF.

Temperaturas características	Valor (K)	Valor promediado (K)	Valor mínimo (K)	Valor máximo (K)
Mínima de las caras	319.76	319.65	319.46	319.84
Promedio de las caras	321.77	321.73	321.69	321.77
Máxima de las caras	323.15	323.15	323.15	323.15

Con los valores de la tabla 29 de temperaturas características obtenidas de la simulación se hallan los valores del factor de disipación (eficiencia térmica) de la unidad de secado, ver tabla 30, a continuación se muestra la ecuación utilizada:

$$Df = \text{Factor de disipacion} = \frac{t_{in} - t_{cara}}{t_{in}} \quad (1)$$

Tabla 30 Eficiencia térmica de las caras de la unidad de secado del SSCF.

Temperatura	Valor promediado (K)	Factor de disipación %
Mínima de las caras	319.65	7%
Promedio de las caras	321.73	2.84%
Máxima de las cara	323.15	0%

Al ser el factor de disipación promedio un valor de 2.84%, indica que la pérdida de temperatura de las paredes es poca, y que la eficiencia térmica de las paredes es de 97.16% muy buena, solo se pierde un 2.84% de temperatura que equivale a 1.42°C durante el proceso de secado.

#### 4.2.2.2 Distribución térmica de las rejillas unidad de secado del SSCF

Al realizar el secado de café en un SSCF, es importante tener en cuenta la temperatura del flujo de aire y la temperatura presente en las rejillas que contienen el café, por esta razón se debe analizar la distribución térmica de las rejillas contenedoras de café, simular la unidad de secado de café en funcionamiento, con las condiciones iniciales de variables (temperatura, flujo y masa de aire) y propiedades físicas de los materiales. Se presentan en las figuras 31.a) a 31.b) los resultados e imágenes de la simulación realizada en las rejillas de la unidad de secado del SSCF.

Distribución de temperatura en las rejillas de la unidad de secado del SSCF. a) Vista normal b) Vista ampliada.

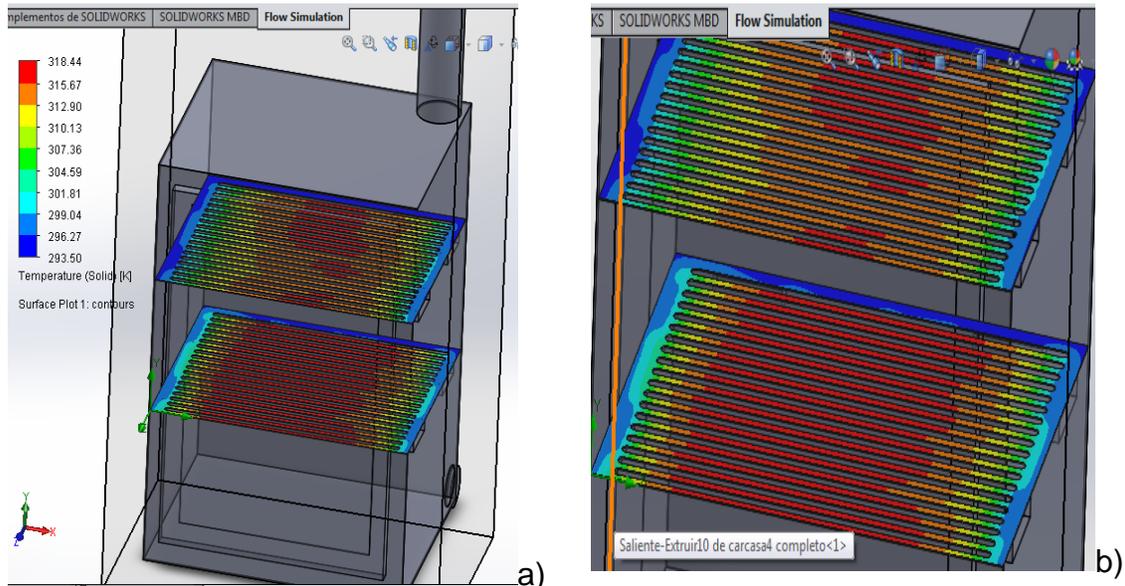
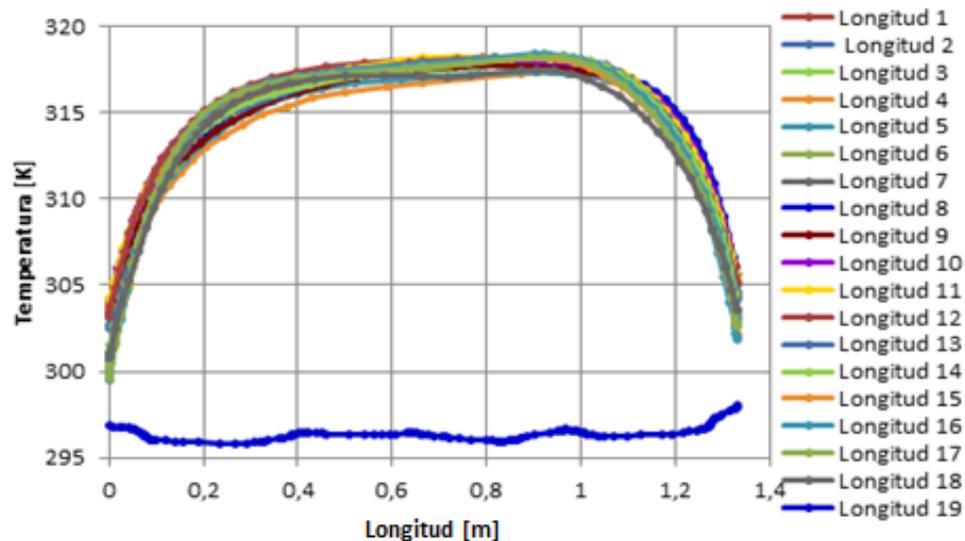


Figura 31. Fuente propia

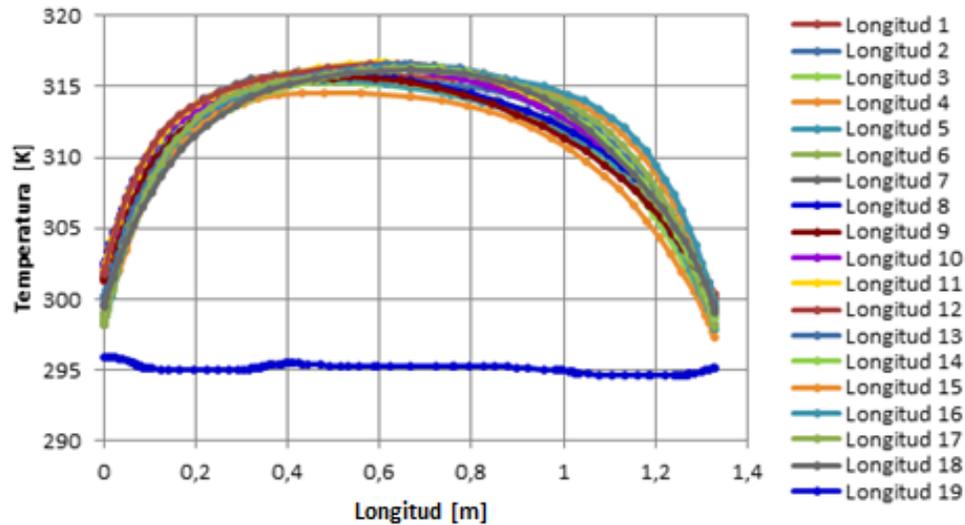
En las figuras 31.a) a 31.b) se aprecia la distribución de temperatura durante el proceso de secado del café presente en las rejillas de la unidad de secado, con el objetivo de analizar el comportamiento en las rejillas, se analizan las curvas de temperatura versus longitud de la rejilla a lo largo de las 19 aristas que la conforman, ver graficas 2 y 3.

Distribución térmica de temperatura de la rejilla 1.



Grafica 2. Fuente propia

Distribución térmica de temperatura de la rejilla 2.



Grafica 3. Fuente propia

Los resultados arrojados de la simulación de la unidad de secado SSCF, muestran que las rejillas varían la temperatura de su área de contacto, mostrando que entre más cerca al centro de la rejilla hay más temperatura. Se aprecia que la distribución de temperatura de las rejillas no es uniforme y que hay disipación de calor en sus extremos, ver figuras 31.a) a 31.b).

El comportamiento de la temperatura, de la rejilla 1, la distribución térmica de casi toda su área esta entre 315°K (41°C) y 318°K (45°C), pero en sus extremos la rejilla presenta una disminución considerable de temperatura en la superficie que baja hasta los 299°K (25°C) ver grafica 2.

El comportamiento de la temperatura en la rejilla 2, al variar su área varia la temperatura considerablemente, esto se debe a la perdida de temperatura por transferencia y disipación de calor, además el área de los extremos es mayor y más fría, descendiendo hasta los 297°K (23,8°C) si se compara con la rejilla 1, ver grafica 3.

Se observa que en la rejilla 1 la concentración de calor está ubicada entre los 0.4 metros hasta 1 metro, alcanzando la máxima temperatura en la rejilla de 318°K (45°C), en la rejilla 2 la concentración de calor está ubicada entre 0.4 metros hasta los 0.7 metros aproximadamente, alcanzando una temperatura máxima de 316°K (42.8°C). La región térmica de contacto con el grano de café no es uniforme, por este motivo no hay un secado uniforme en el proceso.

Al comparar las gráficas 2 y 3, se observa la línea azul (longitud 19 rejilla 1 y longitud 19 rejilla 2), que está por debajo de las demás líneas graficadas y es la más fría de todas, esta es la última y la más cercana a la pared trasera del SSCF, por esta razón la disipación de calor es mayor, ya que está físicamente unida a

una superficie más grande la cual trasfiere la energía calórica hacia la cara posterior de la unidad de secado.

El software Solid Works entrega los valores mínimos, máximos y promedio de la temperatura de las rejillas presente del SSCF durante el proceso de secado, mostrados en la tabla 31.

Tabla 31 temperaturas características de las rejillas del SSCF.

Temperaturas características	Valor (k)	Valor promediado (K)	Valor mínimo (K)	Valor máximo (K)
Mínima de las rejillas	293.50	293.49	293.46	293.52
Promedio de las rejillas	295.10	295.10	295.09	295.13
Máxima de las rejillas	318.44	318.42	318.35	318.52

Con la ecuación de eficiencia térmica y los valores de la tabla 31 de temperaturas obtenidas de la simulación se hallan los valores de eficiencia térmica de las rejillas 1 y 2, ver tabla 32.

$$\eta_t = \text{eficiencia termica rejilla} = \frac{t_{in} - t_{rejilla}}{t_{in}} \quad (2)$$

Tabla 32 Eficiencia térmica de las rejillas del SSCF.

Temperatura	Valor promediado (K)	Factor de disipación %
Mínima de las rejillas	293.49	59.32%
Promedio de las rejillas	295.10	56.1%
Máxima de las rejillas	318.42	9.46%

El comportamiento de la temperatura en las rejillas no es uniforme, si el factor de disipación es pequeño indica que la eficiencia térmica es mayor, si se observa la tabla 32, los porcentajes de eficiencia térmica varían considerablemente, el promedio de temperatura aprovechada por la rejillas es de un 43.9% (22°C), lo que se refleja en las figuras 31.a) a 31.b, además hay un gradiente de temperatura más alto en el centro de las rejillas que aprovecha un 90.54% del calor inyectado, (47.7%), esto refleja la uniformidad de las rejillas en el secado de café del SSCF.

#### 4.2.2.3 Trayectoria y temperatura de flujo de aire en la unidad de secado del SSCF

Un flujo de masa de aire a una temperatura de 50°C, proporciona las condiciones adecuadas para un proceso de secado aceptable [4], pero las condiciones de uniformidad, humedad y calidad del café también dependen del diseño de la unidad de secado del SSCF que se esté utilizando y la manera en cómo se siguen

las acciones o fases en el proceso. Para comprobar la distribución térmica del flujo de aire y analizar las temperaturas presentes en la unidad de secado, se simula en la herramienta Solid Works, las condiciones de temperatura, flujo y masa de aire presentes durante el secado de café, ver figuras 32.a) a 32.f).

Distribución térmica del flujo de aire del SSCF. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) izquierda, f) isométrica 2.

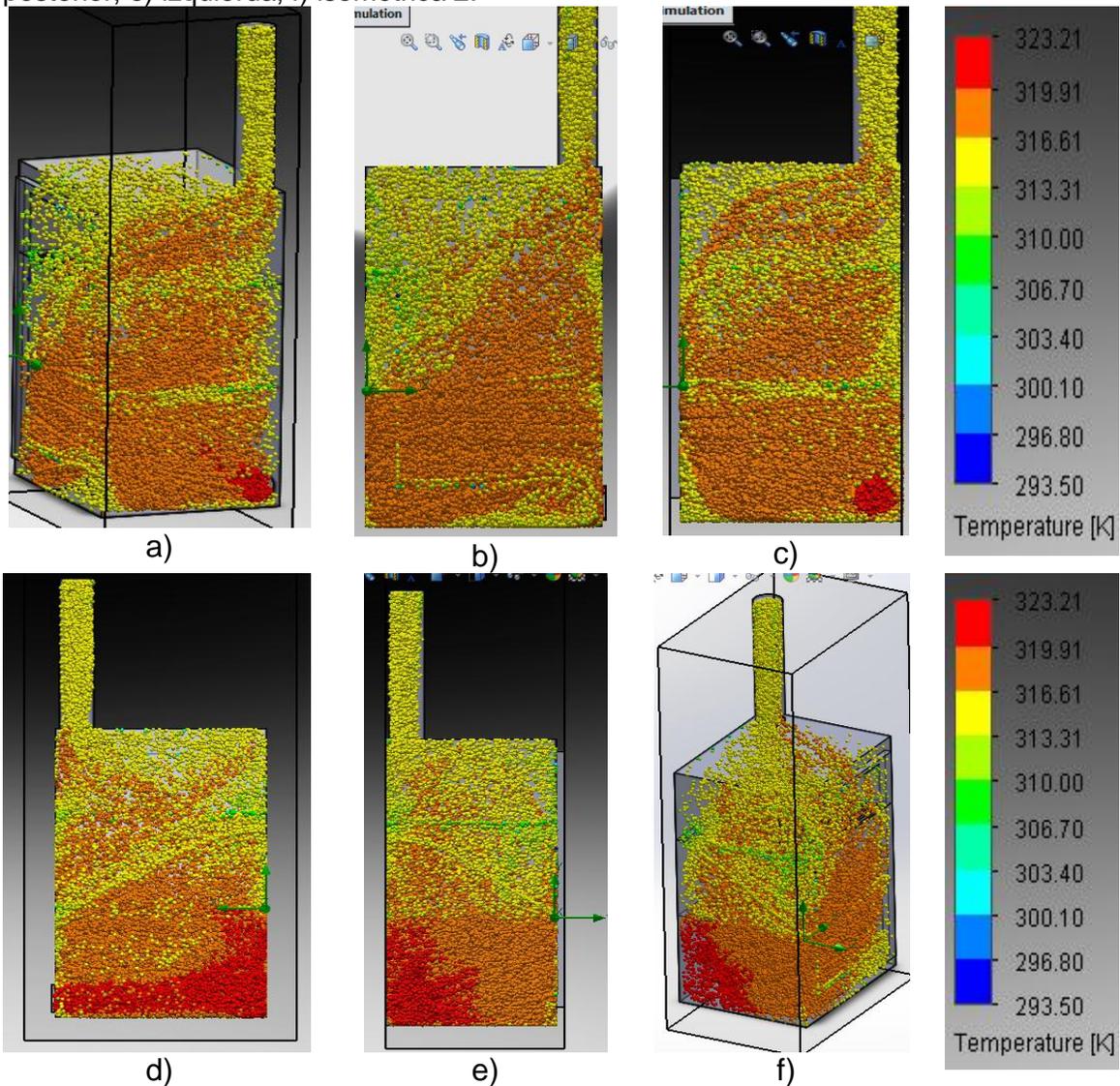


Figura 32. Fuente propia

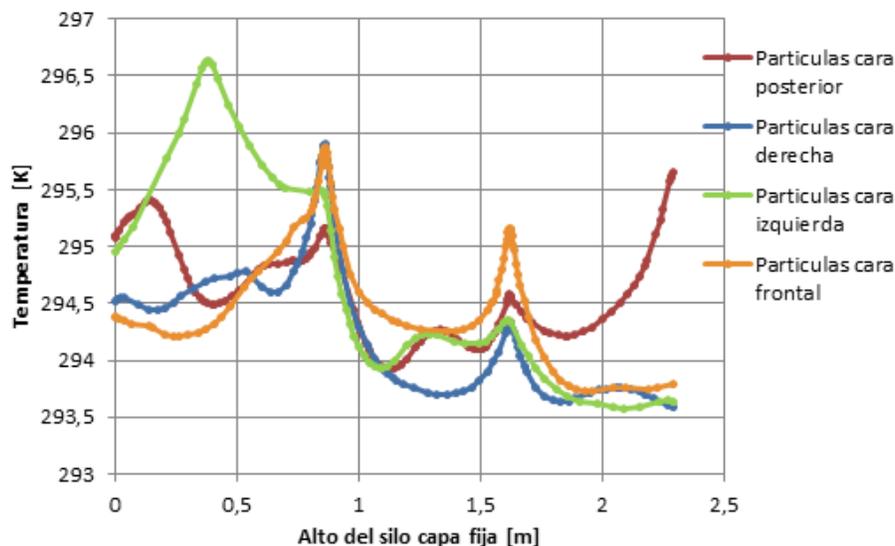
En las figuras 32.a) a 32.f), se aprecia la distribución térmica del flujo de aire y su temperatura durante el proceso de secado, la disipación de calor al contacto con las paredes y rejillas de la unidad de secado, permite observar un gradiente de temperaturas en los niveles que se aprecian en cada una de las rejillas. El flujo de aire presente para la rejilla 1 alcanza una temperatura entre los 323.21°K (50°C) y 316.61°K (43.5°C), temperatura del aire aceptable para secar café, pero este flujo

no es uniforme en toda el área de la rejilla 1, hay variaciones de temperatura que no garantizan uniformidad de la humedad en el lote. El flujo de aire presente para la rejilla 2 alcanza temperaturas entre menores a 319.91°K (46,76°C) hasta 306.70°K (33.55°C), temperatura no recomendable para el secado de café, además el flujo de aire caliente no es uniforme y se observan variaciones de temperatura de más de 13°C.

En las figuras 32.a) a 32.f) se observa que la distribución térmica del flujo de aire dentro de la unidad de secado, no es uniforme y que en todo su volumen la temperatura del aire varía, llegando a la conclusión de que el aire que pasa a través y está en contacto con el grano no proporciona uniformidad térmica para secar el lote de café.

Para tener una mejor visualización de las temperaturas del aire en la unidad de secado, se grafican las temperaturas de las partículas de aire, ver grafica 4, tomando como referencia las 4 caras de la unidad, de esta forma se obtuvieron curvas que representan la temperatura del aire dentro de la unidad de secado.

Temperatura del flujo de aire de la unidad de secado del SSCF.



Gráfica 4. Fuente propia

Los resultados arrojados por la simulación de la distribución térmica del flujo de aire, muestran que el aire contenido en la unidad de secado, varía y disminuye gradualmente, ya que la energía calórica del flujo de aire se va transfiriendo a las paredes y a las rejillas de secado.

Se aprecia en la gráfica 4 que en las distancias de 86 cm, hay una caída de temperatura del aire que circula, ya que la rejilla conduce y disipa energía térmica y se opone al paso del flujo de aire, ocasionando uniformidad térmica en las rejilla

1 y en la temperatura del aire. También se aprecia que en la distancia 162 cm, en la segunda rejilla, sucede una caída de temperatura, por las mismas razones de conducir el calor y oponerse al paso del flujo de aire.

Se puede notar que la curva de la cara posterior, al final de su recorrido por el alto de la unidad de secado, presenta una subida de temperatura, esto se debe a que el flujo del aire que recorrió desde la base hasta el orificio de la chimenea, se concentra en esa parte superior y genera una lectura de temperatura un poco mayor de 2°C que las otras 3 curvas.

Cuando el flujo de aire es inyectado en la unidad de secado (323.15°C ò 50°C), inmediatamente pierde temperatura al entrar en contacto con las paredes y rejillas de la unidad, en la primera sección de la base de la unidad a la altura de 86, donde se encuentra la rejilla 1, ha perdido aproximadamente 28.6°C (294.5°K), de ahí en adelante hasta la segunda rejilla pierde aproximadamente 2°C a 3°C grados más, llegando el flujo de aire a la parte superior de la unidad de secado con una temperatura final de 20.4°C (293.6°K).

Al obtener las gráficas y datos de distribución térmica del flujo de aire dentro de la unidad de secado, la tabla 33-muestra las temperaturas mínimas, máximas y promedio de la simulación.

Tabla 33 Temperaturas características del flujo de aire del SSCF.

Temperaturas características	Valor (K)	Valor promediado (K)	Valor mínimo (K)	Valor máximo (K)
Mínima de las partículas	293.6	293.59	293.58	293.62
Promedio de las partículas	294.25	294.25	294.19	294.29
Máxima de las partículas	296.60	296.56	296.48	296.63

Con la ecuación de eficiencia térmica de transferencia y los valores de la tabla 33 de temperaturas obtenidas de la simulación sobre la temperatura en el flujo del aire, se hallan los valores de eficiencia térmica del flujo de aire, ver tabla 34.

$$\eta_t = \text{eficiencia térmica de transferencia} = \frac{t_{in} - t_{flujo}}{t_{in}} \quad (3)$$

Tabla 34 Eficiencia térmica del flujo de aire del SSCF.

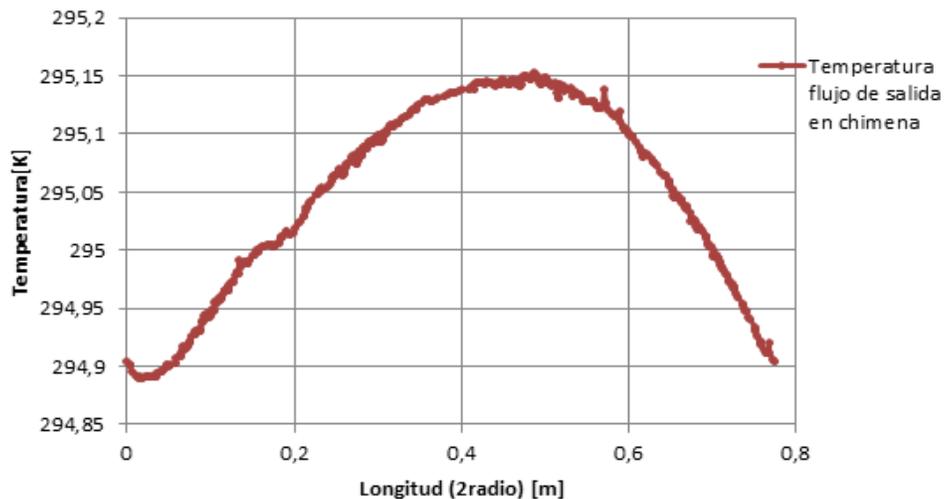
Temperatura	Valor promediado (K)	Eficiencia térmica de transferencia %
Mínima de las partículas	293.59	59.12%
Promedio de las partículas	294.25	57.8%
Máxima de las partículas	296.56	53.18%

Se observa que la eficiencia promedio de transferencia del flujo de aire dentro de la unidad de secado es de un 57.8%, el 28.9°C de temperatura en el flujo de aire son aprovechados por el sistema, por lo tanto un 42.2% de la energía térmica está siendo disipada (21.1°C) en las paredes y rejillas de la unidad, el grano de café no está en contacto con el calor suficiente y adecuado para el secado, además que el tiempo en el proceso se ralentizaría y provocando demoras en el proceso.

#### 4.2.2.4 Eficiencia global del SSCF

Al conocer la eficiencia térmica global del SSCF, se visualiza el comportamiento térmico general de la unidad de secado. Para hallar la eficiencia global SSCF, se pretende ver a la unidad de calor como un cajón o caja negra, con una temperatura de entrada inicial y una temperatura de salida en la chimenea, además se quiere hallar la energía o temperatura aprovechada dentro de la unidad de secado. Al observar la gráfica 5 de la temperatura de salida en chimenea, se obtienen los datos de temperatura que se encuentran entre 294.8°K (21.65°C) y 295.15°K (22°C), al promediar estos datos se sabe que la temperatura intermedia del flujo de salida del aire se encuentra alrededor de los 294.97°K (21.82°C).

Temperatura de salida del flujo de aire en la chimenea del SSCF.



Grafica 5. Fuente propia

La unidad de secado, ver figura 33, muestra los números en rojo que indican las variables de temperatura de entrada (1) a 50°C (323.15°K), la salida (3) de la chimenea de 21.82°C y la temperatura aprovechada por el silo (2), se sabe que la ecuación de la eficiencia térmica:

$$N_t = \text{Eficiencia termica global} = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in}} \quad (4)$$

$$\text{Eficiencia termica global} = 56.36\%$$

Caja negra eficiencia global silo  
capa fija.

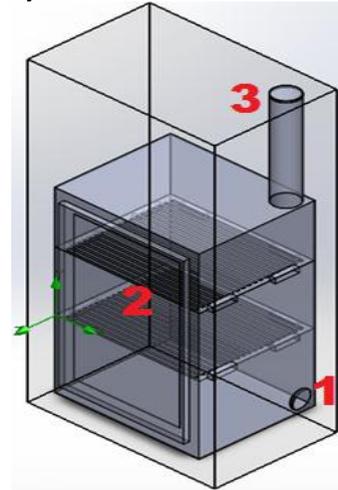


Figura 33. Fuente propia

Al saber que solo el 56.36% de la energía térmica es aprovechada por el SSCF, por lo tanto 28.18°C presentes en la unidad de secado, la pérdida o disipación de 21.82°C muestra que el SSCF no es el adecuado para realizar un proceso de secado de café, se necesita revisar su diseño y reconsiderar mejoras, en cuanto a distribución y eficiencia térmica.

#### 4.2.3 Diseño y medidas del silo secador tipo guardiola SSTG

En el diseño del silo tipo guardiola (SSTG) se usaron las medidas de un secador guardiola convencional, estos silos guardiola se utilizan mayormente en países como México, Guatemala y Costa Rica [38][38][38][38][38][38][44][14], se tomaron las medidas de estos silos utilizados en estos países para una capacidad aproximada de 80@ (907 kg), ver tabla 27, en la figuras 34.a) a 34.b) observan sus vistas: isométricas, frente, lateral derecha y superior. Este es un silo donde se deposita el café en un cilindro interno, el cual rota a una velocidad de 6 a 8 r.p.m, el cilindro externo e interno poseen puertas laterales para acceder y depositar el café a secar, en la parte derecha del silo hay una perforación de 12 centímetros de radio para permitir el ingreso del aire caliente (50°C ò 323.15°K ) y finalmente en la parte superior hay un cilindro de altura 125 centímetros y radio de 12.5 centímetros que forma una chimenea y permite el escape de aire caliente y humedad, ver tabla 35-para detallar las diferentes medidas SSTG modelado en Solid Works.

Medidas de la unidad de secado del SSTG. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) superior.

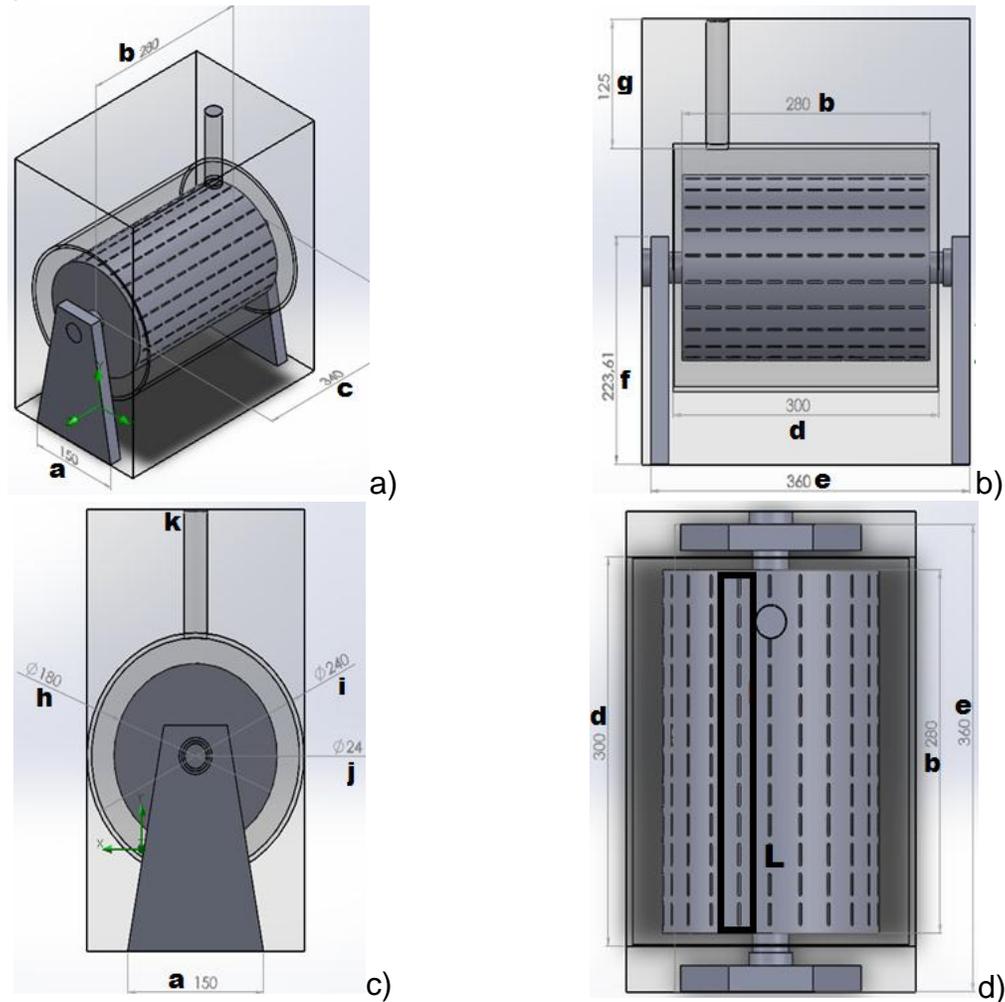


Figura 34. Fuente propia

Tabla 35 Medidas usadas en la simulación del SSTG.

	Nombre	Cm
a	Longitud de la base de soporte	150
b	Longitud del cilindro interno	280
c	Longitud máxima con soportes de la unidad	340
d	Longitud máxima del silo secador	360
e	Longitud máxima del cilindro externo	300
f	Altura máxima de los soportes	223
g	Altura de la chimenea	125
h	Radio del cilindro interno	90
i	Radio del cilindro externo	120
j	Radio de la tubería de entrada de aire	12
k	Radio de la chimenea	12.5
l	longitud de las perforaciones a lo largo	10

l <sup>2</sup>	Numero de perforaciones a lo largo	12
----------------	------------------------------------	----

#### 4.2.3.1 Distribución de temperatura en el contorno de la unidad de secado del SSTG

La estructura del SSTG muestra dos cilindros, uno de ellos el interno que contiene el café y que está directamente expuesto al aire inyectado (50°C), el segundo cilindro es el externo que funciona como una chaqueta que contiene la temperatura y evita que esta se disipe rápidamente, en el estudio realizado de la temperatura, interesa solo el cilindro interno el cual está en contacto directo con el lote de café. Para analizar el comportamiento de la temperatura en el contorno del cilindro interno de la unidad de secado del SSTG se simula la unidad de calor en funcionamiento, con las condiciones iniciales de las variables (temperatura, rotación; flujo y masa de aire) y propiedades físicas de los materiales. Se presentan en las figuras 35.a) a 35.f) los resultados e imágenes de la simulación. Las vistas del cilindro interno de la unidad de secado enumeradas así, 1 vista frontal, 2 vista lateral derecha, 3 vista posterior y 4 vista lateral izquierda.

Distribución de temperaturas de la unidad de secado del SSTG. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) isométrica 2, f) izquierda.

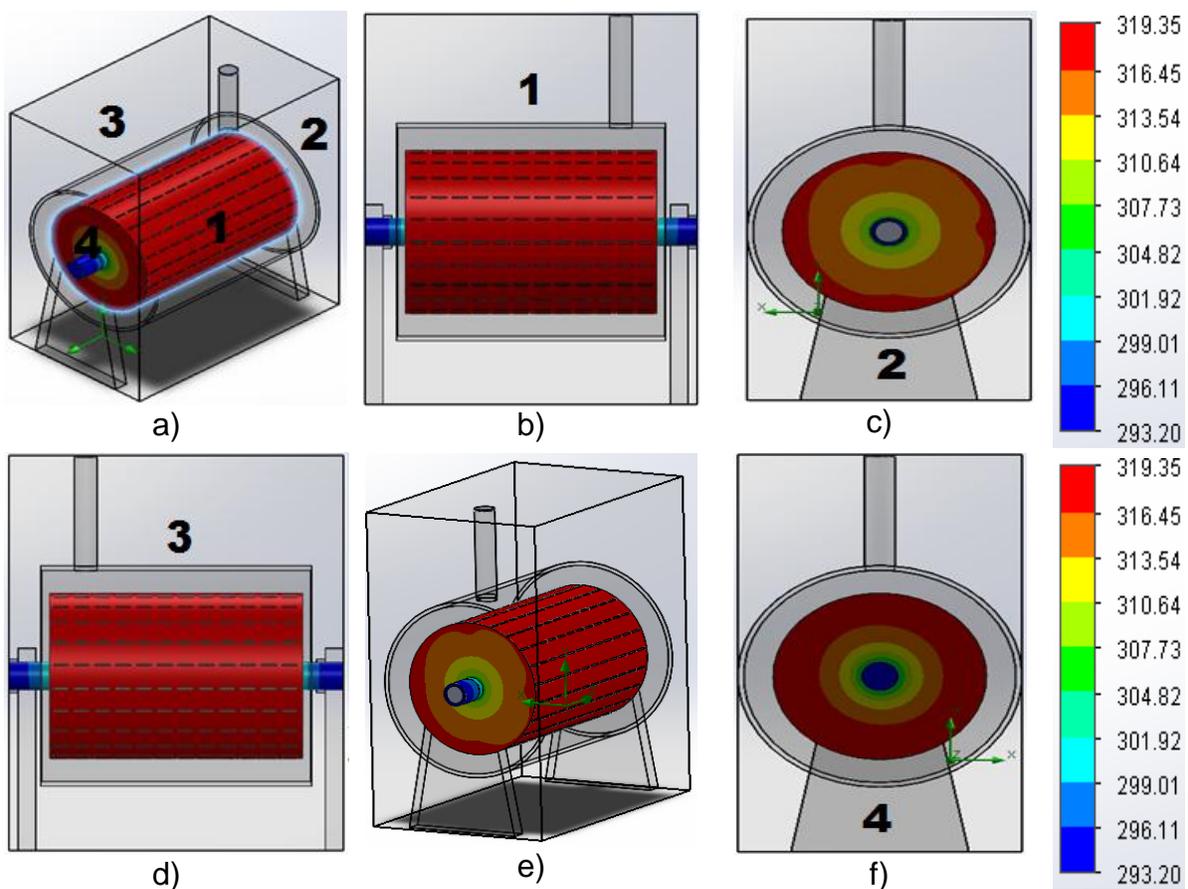
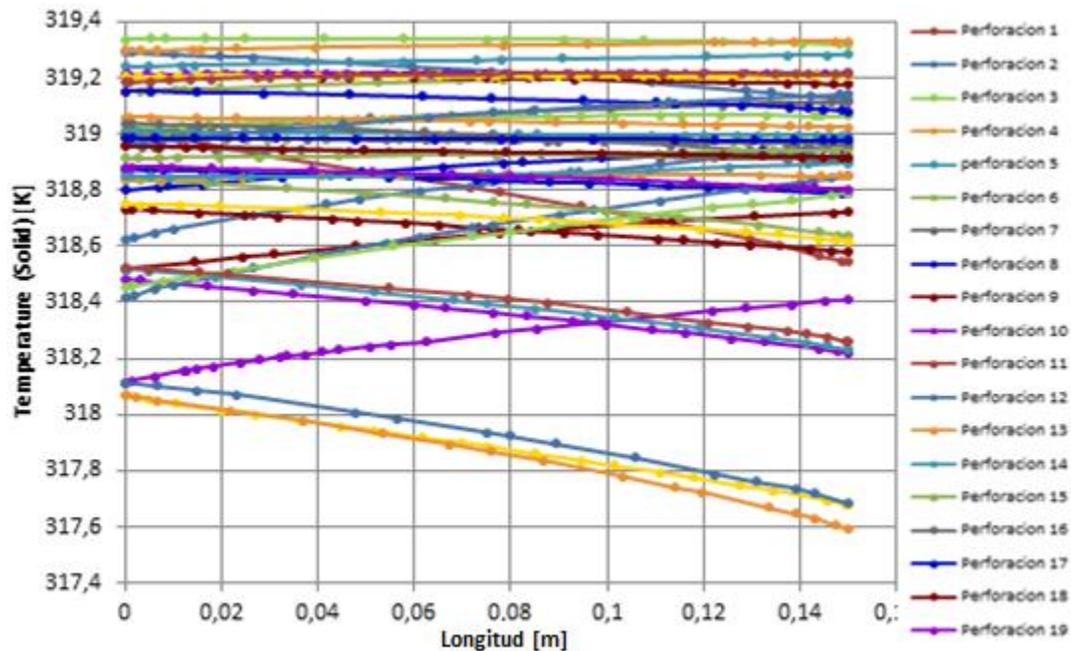


Figura 35. Fuente propia

Con el fin de analizar el comportamiento de la temperatura en el cilindro interno del SSTG, se toman las perforaciones a lo largo del contorno del cilindro, en total se escogieron 4 líneas paralelas cada una con 12 perforaciones, como se muestra en la gráfica 6 la temperatura del contorno del SSTG.

Temperatura del contorno de las perforaciones en el cilindro interno del SSTG.



Gráfica 6. Fuente propia

Los resultados de la simulación de la unidad de calor (cilindro interno) del SSTG, muestran que todo su contorno tiene una temperatura uniforme entre 319.35°K (46.2°C) y 317.7°K (44.55°C), proporciona al lote de café una superficie de contacto uniforme, ver 35.a) a 35.f).

La disipación de la temperatura en el cilindro interno es de 3.8°C, quiere decir que el 92.4% del calor del aire inyectado es transferido al contorno del cilindro.

Se observa que las bases del cilindro presentan disipación de temperatura, esto se debe a que los soportes están unidos al cilindro externo y luego unido a las bases, lo que ocasiona más superficie de contacto y en consecuencia mayor disipación de calor, ver 35.a) a 35.f).

Al obtener los datos de las perforaciones existentes en el contorno de cilindro, se observa que la temperatura esta entre 319.35°K a 317.6°K, solo hay una variación de 1.75°K, un comportamiento de la temperatura muy bueno para secar café si se requiere uniformidad en el lote, ver grafica 6.

Tabla 36 Temperaturas características del cilindro interno del SSTG.

Temperaturas características	Valor (K)	Valor promediado (K)	Valor mínimo (K)	Valor máximo (K)
Mínima del contorno	316.5	316.45	316.24	316.63
Promedio del contorno	318.7	318.62	318.58	318.73
Máxima del contorno	319.35	319.31	319.35	319.35

Con los valores de la tabla 36 de temperaturas características obtenidas de la simulación se hallan los valores de factor de disipación (eficiencia térmica) de la unidad de secado, ver tabla 37, a continuación se muestra la ecuación utilizada:

$$\eta_t = \text{eficiencia térmica contorno cilindro} = \frac{t_{in} - t_{contorno}}{t_{in}} \quad (5)$$

Tabla 37 Eficiencia térmica en el cilindro interno del SSTG.

Temperatura	Valor promediado (K)	Factor de disipación %
Mínima de del contorno	316.45	13.4%
Promedio del contorno	318.62	9.06%
Máxima de del contorno	319.31	7.68%

Al observar el factor de disipación térmica en la tabla 37, se concluye que la temperatura promedio del contorno del cilindro interno es de un 90.9% de la temperatura inyectada a la unidad de secado, ósea 45.53°C (318.62°K) y hay una pérdida aproximada de 4.53°C.

#### 4.2.3.2 Trayectoria y temperatura de flujo de aire presente en la unidad de secado SSTG

Un flujo de masa de aire [4] a un temperatura de 50°C, proporcionan las condiciones adecuadas para un proceso de secado aceptable, pero las condiciones de uniformidad, humedad y calidad del café también dependen del diseño de silo secador que se esté utilizando y la manera en cómo se siguen las acciones o fases en el proceso. Para comprobar la distribución térmica del flujo de aire y analizar las temperaturas presentes en la unidad de secado en el silo tipo guardiola, se simula en la herramienta Solid Works, las condiciones de temperatura, flujo y masa de aire presentes durante el secado de café, ver figuras 36.a) a 36.f).

Vistas de la distribución térmica del flujo de aire del SSTG. a) isométrica 1, b) frontal, c) derecha, d) posterior, e) izquierda, f) isométrica 2.

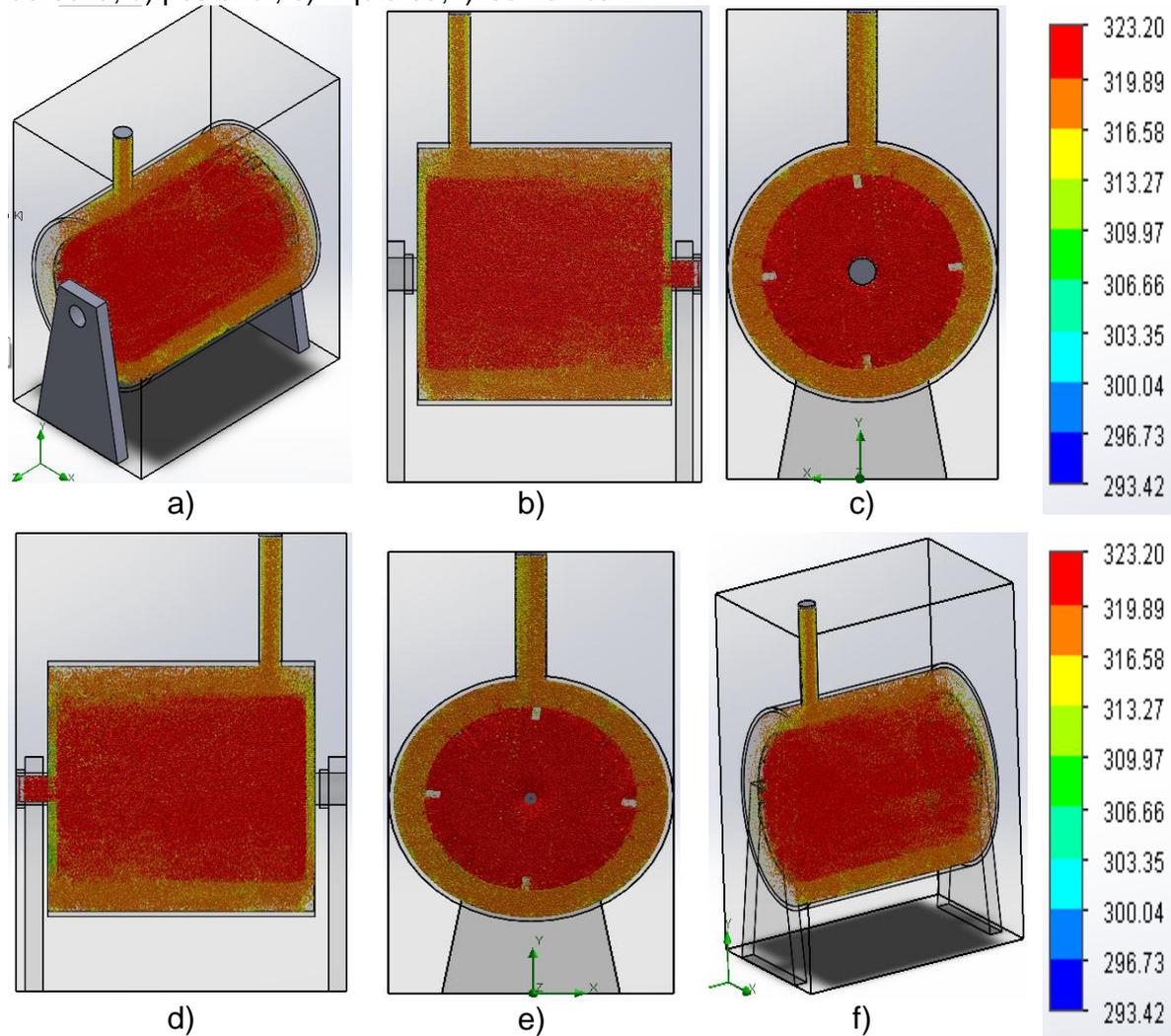


Figura 36. Fuente propia

En las figuras 36.a) a 36.f), se aprecia la distribución térmica del flujo de aire y su temperatura durante el proceso de secado y disipación de calor al contacto con el contorno del cilindro interno y movimiento durante el proceso de secado, las imágenes permiten observar un gradiente de temperaturas entre los dos cilindros, es notable que el cilindro interno posee uniformidad de temperatura, contiene y aprovecha el aire caliente que es inyectado en la unidad de secado, al ser filtrado el aire por las perforaciones del cilindro interno pasa al cilindro externo el cual funciona como chaqueta térmica para disminuir la pérdida de temperatura dentro del cilindro interno.

El flujo de aire presente para el cilindro interno alcanza una temperatura entre los  $323.20^{\circ}\text{K}$  ( $50^{\circ}\text{C}$ ) y  $319.89^{\circ}\text{K}$  ( $46.74^{\circ}\text{C}$ ), temperatura del aire apropiada para secar

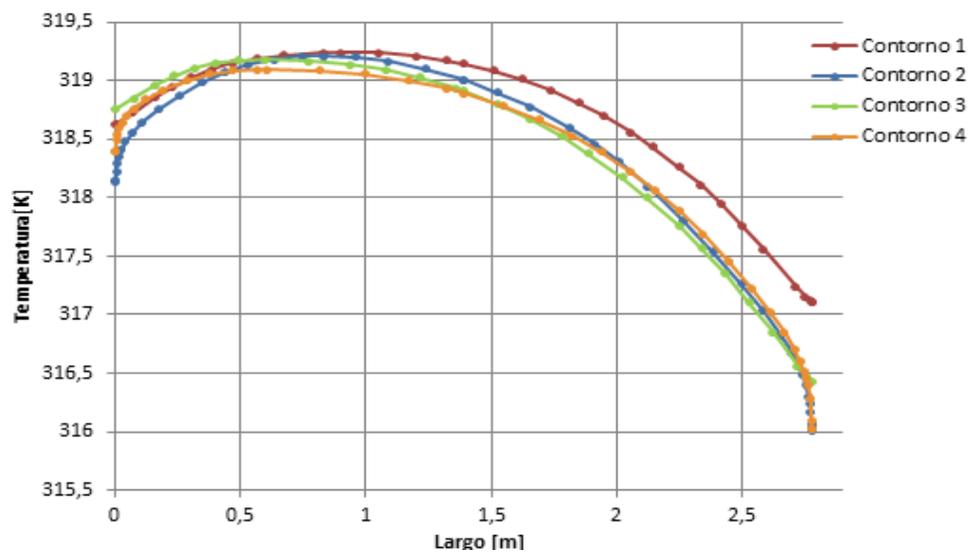
café, además el flujo de aire y temperatura es uniforme en toda el área del cilindro interno permitiendo así un proceso de secado apropiado.

El flujo de aire presente para el cilindro externo alcanza temperaturas entre menores a  $319.89^{\circ}\text{K}$  ( $46,74^{\circ}\text{C}$ ) hasta  $309.97^{\circ}\text{K}$  ( $36.82^{\circ}\text{C}$ ), temperatura no recomendable para el secado de café, pero este cilindro no tiene ningún contacto con el lote de café a secar, cumple la función de contener la temperatura y evitar la pérdida de temperatura con el medio ambiente.

Para tener una mejor visualización de las temperaturas del aire en la unidad de secado, se grafican las temperaturas de las partículas de aire, ver grafica 7., para adquirir esta información, Solid Works divide el contorno del cilindro en 4 secciones (formando una cruz para dividir el cilindro), y promedia la temperatura de las partículas de aire que se encuentran en el volumen de cada sección.

En las figuras 36.a) a 36.f) se observa que la distribución térmica del flujo de aire dentro del cilindro interno es uniforme y que en todo su volumen la temperatura del aire se mantiene constante, observando que hay una variación mínima de temperatura dentro de la unidad de calor, concluyendo así que el aire que llega al cilindro interno está en contacto directo con el grano, proporcionando uniformidad térmica para secar el lote de café.

Temperatura del flujo de aire dentro del cilindro del SSTG



Grafica 7. Fuente porpia

Los resultados arrojados por la simulación de la distribución térmica del flujo de aire, muestran que el aire contenido en la unidad de secado, varía  $3.2^{\circ}\text{K}$ , ya que la energía calórica del flujo de aire entra en contacto directo con el lote de café y el contorno del cilindro interno, aprovechando al máximo la temperatura inyectada de  $323.15^{\circ}\text{K}$  ( $50^{\circ}\text{C}$ ).

Se observa que las curvas del flujo de aire van perdiendo temperatura, esto se debe a la transferencia de calor de las láminas de aluminio del cilindro interno, y al movimiento rotatorio que la unidad de secado está sometida durante el proceso, además el giro permite que la humedad evacue más rápido y que la temperatura del aire tenga un contacto directo y uniforme con el grano de café, ver grafica 7.

Al obtener las gráficas y datos de distribución térmica del flujo de aire dentro de la unidad de calor, la tabla 38 muestra las temperaturas mínimas, máximas y promedio de la simulación.

Tabla 38 Temperaturas características del flujo de aire SSTG.

Temperaturas características	Valor (K)	Valor promediado (K)	Valor mínimo (K)	Valor máximo (K)
Mínima de las partículas	316.42	316.41	316.39	316.42
Promedio de las partículas	319.55	319.53	319.49	319.55
Máxima de las partículas	323.20	323.20	323.20	323.20

Con la ecuación de eficiencia térmica de transferencia y los valores de la tabla 38 de temperaturas obtenidas de la simulación sobre la temperatura en el flujo del aire, se hallan los valores de eficiencia térmica del flujo de aire, ver tabla 39.

$$\eta_t = \text{eficiencia térmica de transferencia} = \frac{t_{in} - t_{flujo}}{t_{in}} \quad (6)$$

Tabla 39 Eficiencia térmica del flujo de aire del SSTG.

Temperatura	Valor promediado (K)	Eficiencia térmica de transferencia %
Mínima de las partículas	316.41	13.48%
Promedio de las partículas	319.53	7.24%
Máxima de las partículas	323.20	0%

Se observa que la eficiencia promedio de transferencia del flujo de aire dentro de la unidad de secado es de un 7.24%, un 46.38°C de temperatura en el flujo de aire son aprovechados por el sistema, por lo tanto un 7.24% de la energía térmica está siendo disipada (3.62°C) en el contorno del cilindro interno del SSTG, el lote de café está en contacto con el calor suficiente y adecuado para el secado, se podría corregir y aumentar la temperatura de entrada para que el grano este en contacto con aire cercano a 50°C, si se corrigen estas fallas se mejoraría la calidad y el tiempo en el secado.

#### 4.2.3.3 Eficiencia global del SSTG

Al conocer la eficiencia térmica global del SSTG, se visualiza el comportamiento térmico general de la unidad de secado (cilindro interno). Para hallar la eficiencia global de la unidad, se ve como un cajón o caja negra, con una temperatura de entrada inicial y una temperatura de salida en la chimenea, además se quiere hallar la energía o temperatura aprovechada dentro de la unidad de calor. Al observar la gráfica 8 de la temperatura de salida en chimenea del cilindro externo, se obtienen los datos de temperatura que se encuentran entre 294.7°K (21.55°C) y 294.54°K (21.39°C), al promediar estos datos se sabe que la temperatura intermedia del flujo de salida del aire se encuentra alrededor de los 294.62°K (21.47°C).

La unidad de calor, ver figura 37, muestra tres números en rojo que indican las variables de temperatura de entrada (1) a 50°C (232.15°K), la salida (3) de la chimenea de 21.47°C y la temperatura aprovechada por el silo (2), se sabe que la ecuación de la eficiencia térmica:

$$N_t = \text{Eficiencia termica global} = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in}} \quad (7) \quad \text{Caja negra eficiencia global del SSTG.}$$

$$\text{Eficiencia termica global} = 57.06\%$$

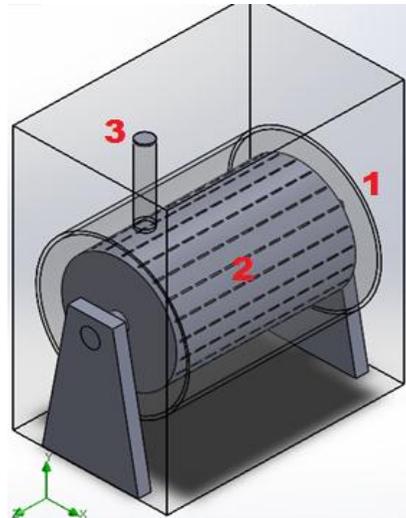
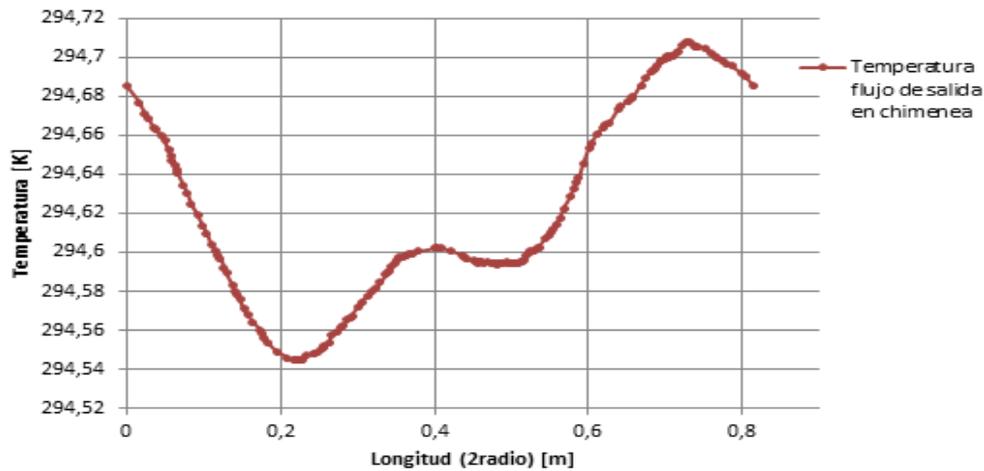


Figura 37. Fuente propia

Temperatura de salida del flujo de aire en la chimenea del SSTG.



Grafica 8. Fuente propia

La eficiencia térmica aprovechada por el SSTG es de 57.06% en su unidad de secado (cilindro interno), por lo tanto un 28.53°C presentes en la unidad de calor, la pérdida o disipación de 21.47°C muestra que el SSTG, aprovecha la temperatura inyectada para realizar el proceso de secar café, la ventaja del SSTG en su unidad de secado es que el aire entra en contacto directo con el lote de café y luego hacia la pared del cilindro interno, lo cual mejora considerablemente la distribución térmica de la unidad.

### 4.3 Comparación de indicadores térmicos del SSCF vs SSTG

Los resultados de las simulaciones desarrolladas en Solid Works, ayuda a visualizar la termodinámica y flujo de aire presentes en cada silo secador de café, inferir y comprender el proceso de secado del lote de café en cada uno de los silos, permite mejorar los diseños de silos existentes y procedimientos relacionados con el secado.

El comportamiento de la temperatura en cada uno de los silos, es diferente con resultados que ponen en ventaja al silo guardiola como el mejor equipo para secar café, ver tabla 40.

Tabla 40 Indicadores térmicos del SSCF y SSTG.

Nombre silo	Factor de disipación (área de contacto)	Factor de disipación térmica de transferencia flujo de aire	Factor de disipación térmica del silo	Eficiencia térmica global
SSCF	56.1%	57.8%	2.84%	56.36%
SSTG	9.06%	7.24%	7.6%	57.06%

La eficiencia térmica de la unidad de secado, permite visualizar la temperatura presente en el área de contacto de la lámina de aluminio con el grano de café, si el factor de disipación es pequeño indica que la eficiencia térmica es mayor, como se ve en la tabla 40, el factor de disipación del SSTG es de un 9.06% lo que indica que su eficiencia térmica es mucho mayor que el SSCF, el cual posee un factor de disipación alto de 56.1% y por lo tanto una eficiencia térmica baja. Si el grano de café está sometido a una temperatura uniforme y constante, la calidad del grano resultante será más alta.

El flujo de aire a una temperatura adecuada genera en el café una eliminación rápida de la humedad presente en el grano, además de disminuir el tiempo del proceso en el secado, como se observa en la tabla 40, el factor de disipación térmica de transferencia del flujo de aire en el SSTG es de 7.24% lo que indica que la eficiencia de transferencia del flujo de aire es alta y mejor en un 50.56% que el SSCF.

El factor de disipación de un silo secador de café, permite observar las pérdidas y el comportamiento de la temperatura durante el proceso de secado, para este caso el SSCF posee un factor de disipación térmica de 2.84% (1.42°C), para el SSTG el factor de disipación térmica es de 7.6% (3.8°C), la diferencia de temperatura entre las unidades de secado, se puede explicar por la rotación del cilindro interno del SSTG, esta rotación además de mezclar el café y proporcionar uniformidad en el contorno del cilindro interno, ayuda a evacuar más rápido el aire húmedo y a disipar el calor existente dentro de la unidad de secado.

La eficiencia térmica global de las unidades de secado es similar, el SSTG es mejor que el SSCF en un 1%, la razón principal por que la diferencia entre estos dos equipos es pequeña, es porque el diseño de la estructura de los silos es diferente y la forma en como cada uno aprovecha y distribuye la temperatura es distinta, el flujo de aire caliente en el silo tipo guardiola circula y está en contacto directo con el lote de café, mientras que el silo de capa fija obstaculiza el flujo y hay más áreas de contacto que disipan el calor. La eficiencia global máxima que se alcanza con los dos silos secadores de café es de un 66%, ya que se toma a la temperatura ambiente en 19°C (como el cero) y la máxima temperatura en 50°C (30°C más que la temperatura ambiente), por lo tanto una eficiencia térmica global de más del 50% es considerada buena para estos equipos de secado.

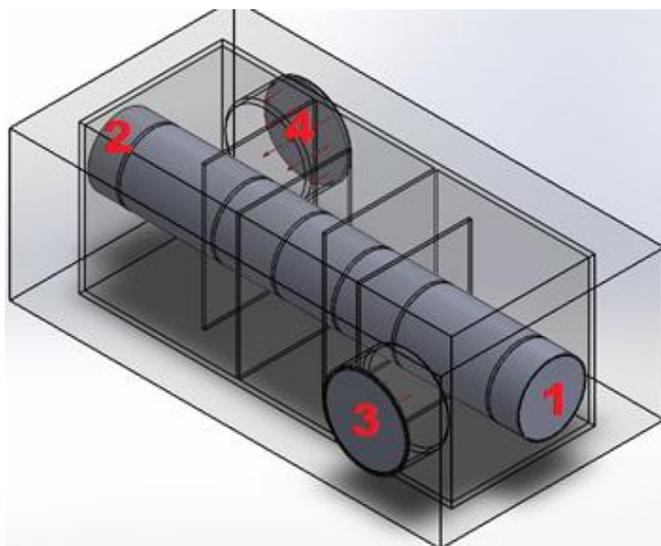
#### **4.4 Secador guardiola con unidad intercambiadora de calor**

Al incorporar una unidad intercambiadora de calor para un SSTG en el modelo físico, se pretende disminuir el consumo energético en la unidad calefactora y proporcionar una mejora al silo secador de café.

#### 4.4.1 Intercambiador

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos sin que haya contacto directo entre ellos (evitar mezclas), en este caso en particular se pretende calentar el aire de entrada de la unidad calefactora con el aire de salida de la chimenea de la unidad de secado, por medio de un “laberinto” construido en lámina de aluminio y en el centro de un tubo de cobre, el aire caliente de salida de la chimenea del silo recorre el laberinto y calienta el tubo de cobre alrededor, de esta manera sube unos grados el aire entrante de la unidad calefactora, ver figura 38, así aprovechar los gases de salida y mejorar el consumo energético del proceso de secado del café.

Intercambiador de calor en 3D.



NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	Entrada aire de chimenea
2	Salida aire hacia la atmosfera
3	Salida aire del laberinto hacia la unidad calefactora
4	Entrada del aire atmosférico hacia la unidad calefactora

Figura 38. Fuente propia

El intercambiador en modelado 3D sobre la herramienta Solid Works, consta de un laberinto con 5 secciones divididas por paredes, este sistema genera mayor contacto del aire a temperatura ambiente con la tubería interna que atraviesa el laberinto (1 a 2), la entrada del laberinto (4) recorre en zigzag el laberinto hasta llegar a la salida (3), y la entrada de la tubería (1) que atraviesa el laberinto es alimentado por el aire caliente que sale de la chimenea del silo secador de café hasta llegar a la salida (2), ver tabla 41. Las medidas establecidas para el intercambiador de calor están nombradas así; ver figuras 39.a) a 39.b).

Medidas del intercambiador de calor para el SSTG. a) isométrica intercambiador, b) isométrica tubo de cobre.

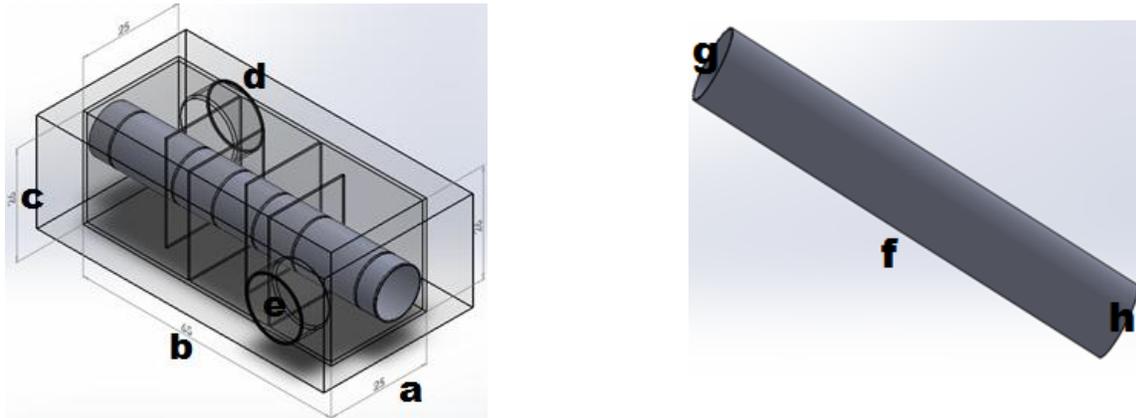


Figura 39. Fuente Propia

Tabla 41 Medidas usadas en la simulación del intercambiador de calor.

	Nombre	cm
a	Ancho del laberinto	25
b	Largo del laberinto	45
c	Alto del laberinto	26
d	Radio de la entrada al laberinto del aire	8
e	Radio de salida del laberinto del aire	8
f	Longitud del cilindro de cobre	75
g	Radio del tubo de cobre	8
h	Espesor del cilindro de cobre	0.3

El objetivo de implementar el intercambiador de calor en el proceso de secar café, es mejorar el consumo energético de la unidad calefactora e ingresar aire unos grados por encima de la temperatura ambiente ( $18^{\circ}\text{C}$ - $20^{\circ}\text{C}$ ). Para esto se simula el proceso de intercambio térmico en Simulation Flow de Solid Works.

#### 4.4.1.1 Distribución de temperatura en el intercambiador de calor

Las variables principales para la simulación del intercambiador de calor, es la temperatura de entrada al intercambiador (salida de la chimenea), y la salida del aire que el intercambiador está calentando, ver figura 38.

Los datos de temperatura de salida de la chimenea del silo secador capa fija y del silo tipo guardiola están entre los  $22^{\circ}\text{C}$  y los  $30^{\circ}\text{C}$ , para la simulación se toma el valor máximo de la temperatura de entrada ( $30^{\circ}\text{C}$ ) y la temperatura ambiente más común en la zona del sur occidente caucano durante los meses de cosecha (mayo y noviembre) [39] las temperaturas oscilan entre los  $18^{\circ}\text{C}$  a  $21^{\circ}\text{C}$ , se toma la temperatura de  $19^{\circ}\text{C}$  para la entrada de aire hacia la unidad calefactora y el flujo

de salida de la chimenea de  $0.583 \text{ m}^3/\text{s}$  establecidos por [4]. Al simular el intercambiador de calor se obtienen los siguientes resultados; ver figuras 40.a) a 40.f).

Vistas de distribución térmica de la temperatura del intercambiador de calor. a) isométrica tubo de cobre, b) isométrica laberinto, c) frontal, d) derecha, e) posterior, f) inferior.

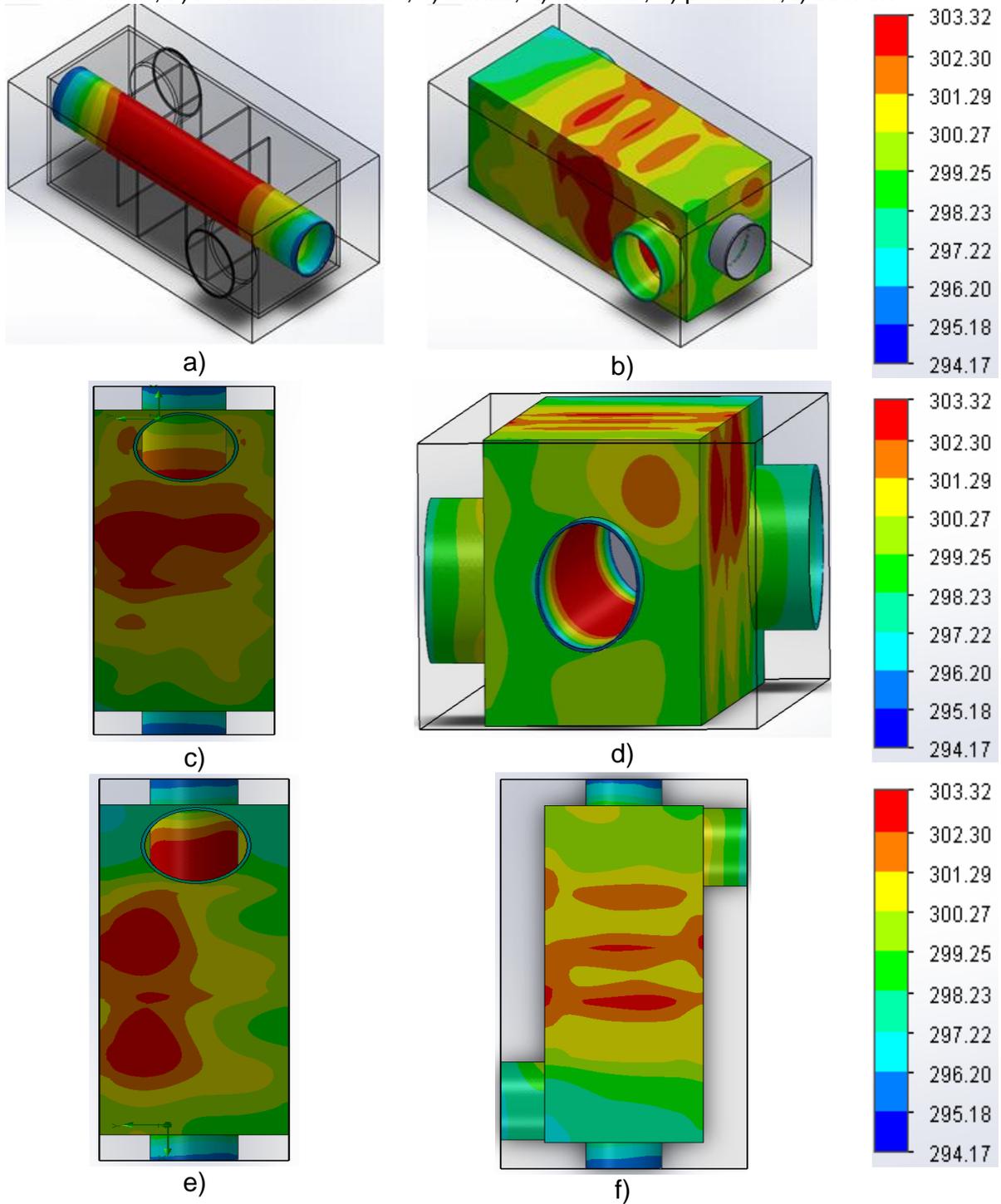
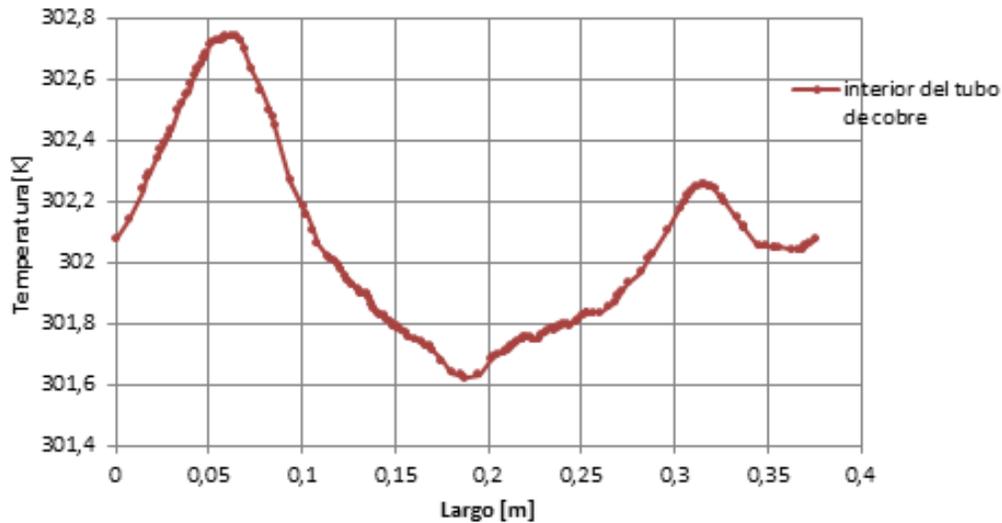


Figura 40. Fuente propia

Al simular el intercambiador de calor, se analiza el comportamiento de la temperatura presentes en el cilindro interior y el laberinto, se aprecia que la temperatura en el centro del cilindro de cobre está cerca a los 30°C (303°K), y el laberinto conduce esta temperatura calentando el aire que pasa por las divisiones.

Temperatura del intercambiador en el tubo de cobre.



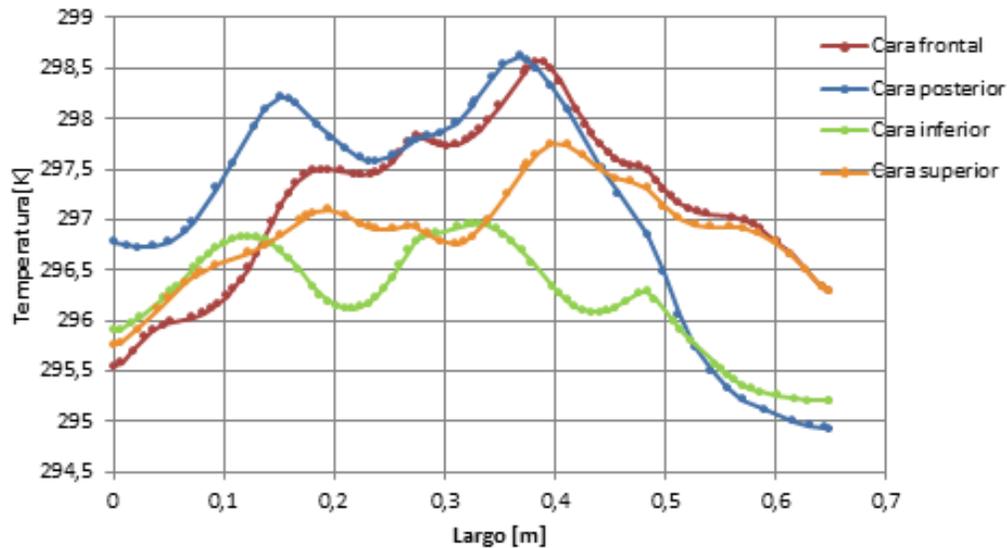
Gráfica 9. Fuente propia

Los resultados arrojados por la simulación del intercambiador de calor, muestran que la temperatura máxima que alcanza el cilindro interno de cobre, llega a un máximo de temperatura de 302.7°K (29.55°C), la disipación del cilindro de cobre es de medio grado (0.5°C), las propiedades del cobre permiten una transmisión de temperatura mejores que el aluminio, lo que ayuda a calentar el aire que está circulando por el cilindro, ver grafica 9.

El laberinto de aluminio, absorbe y conduce la temperatura en sus paredes, generando que el aire que circula a través de él, transfiera la temperatura hacia el cilindro de cobre, lo que ocasiona que el aire circundante en el cilindro obtenga una temperatura mayor con la que ingresa de 19°C (292.15), ver figuras 40.a) a 40.f), ver grafica 10.

La temperatura de las caras del laberinto se encuentran entre 298.5°K (25.35°C) a 295°K (22.35), las disipación y transferencia de la temperatura se centra en el tubo y paredes laterales que dividen al laberinto, ver grafica 10, ver figuras 40.a) a 40.b).

Temperaturas de las caras del intercambiador de calor.



Gráfica 10. Fuente propia

Las cuatro paredes internas del intercambiador de calor conducen y transfieren la temperatura hacia el cilindro interno de cobre, y ayuda a que la mayor parte de la temperatura que entra al intercambiador sea transferida al cilindro (aire de entrada a la unidad de calefacción), ver figuras 41.a) a 41.b).

Se observa que la temperatura está concentrada en la paredes del laberinto alcanzando su máxima temperatura ( $303^{\circ}\text{K}$ ) en el recorrido de 15 cm a 45 cm de su largo, ver figuras 41.a) a 41.b).

Distribución térmica del intercambiador en paredes internas. a) vista isométrica, b) vista superior.

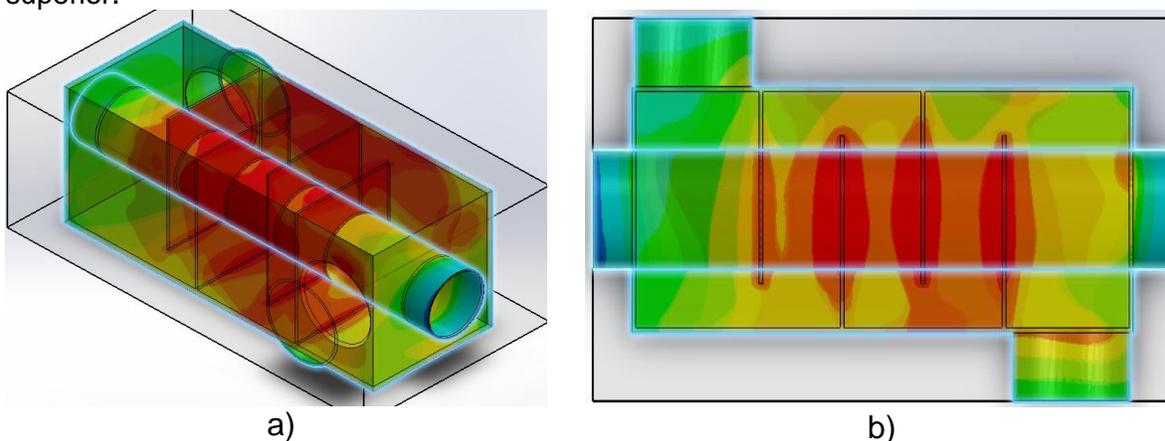


Figura 41. Fuente propia

El comportamiento de la temperatura dentro del intercambiador muestra que las láminas que dividen el laberinto, absorben más temperatura, ya que estas se

oponen al paso del aire caliente, generando una concentración de la temperatura en las láminas y transmitiéndolas hacia el tubo de cobre, ver tabla 42.

Tabla 42 Eficiencias térmicas del intercambiador de calor.

Parte	Temperatura paredes del intercambiador (K)	Parte	Temperatura laminas del laberinto (K)
Cara frontal	297.5	Lamina 1	301.1
Cara posterior	297.2	Lamina 2	300.6
Cara inferior	296.3	Lamina 3	299.5
Cara superior	297.1	Lamina 4	300.4

#### 4.4.1.2 Trayectoria y temperatura de flujo de aire presente en el intercambiador de calor

Al utilizar los gases de salida de la chimenea del silo secador de café y reutilizarlo en un intercambiador de calor, se obtendrá una mejora en la temperatura del aire de entrada de la unidad calefactora, obteniendo un ahorro de cisco. Las variables presentes en el equipo intercambiador serian; variable de entrada de la salida de la chimenea, salida del intercambiador de calor (exterior), entrada de aire a temperatura ambiente (exterior) y salida del aire después del intercambio térmico que va directo a la unidad calefactora. Al simular el proceso se obtuvieron flujos de aire que interactúan con el intercambiador térmico, hallando la temperatura del flujo de salida del intercambiador que interesa para el proceso de calefacción del aire, ver figuras 42.a) y 42.b).

Vistas de la distribución termica del flujo de aire en el intercambiador de calor. a) vista superior (lineas), b) vista superior (esferas)

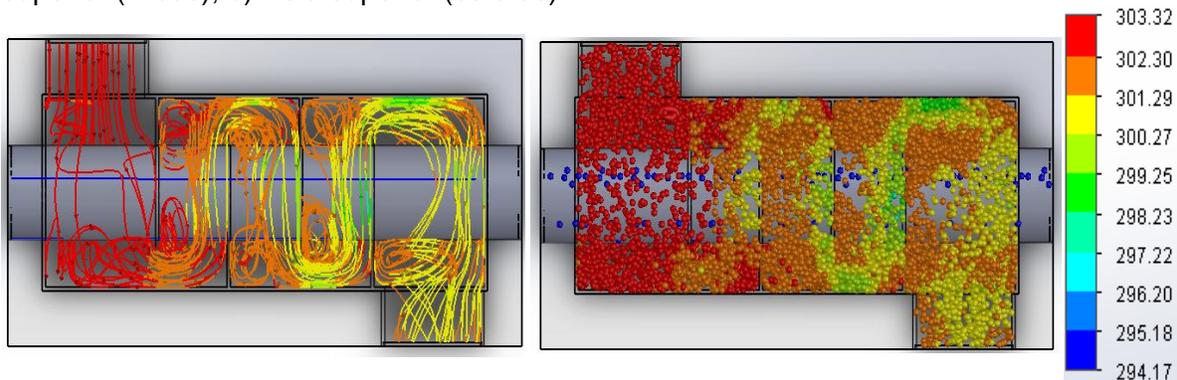


Figura 42. Fuente propia

Los resultados arrojados por la simulación de la distribución térmica del flujo de aire en el intercambiador de calor, muestran que el aire contenido en el laberinto, varía y disminuye gradualmente, ya que la energía calórica del flujo de aire se va transfiriendo a las paredes y al tubo de cobre.

Al realizar el intercambio térmico se observan las temperaturas de salida del flujo de aire que entrega la simulación, ver tabla 43.

Tabla 43 Valores de temperatura de la salida y entrada del flujo de aire.

Elemento	Entrada	Salida
Laberinto	303.15°K (30°C)	295.15 (22°C)
Tubo de cobre	292.15°K (19°C)	297.15 (24°C)

Se observa que la temperatura de entrada a la unidad calefactora de 19°C (medio ambiente), es calentada por el intercambiador a una temperatura de 24°C, lo que garantiza un ahorro energético en el consumo de combustible (cisco).

#### 4.4.1.3 Ahorro energético en el silo secador tipo guardiola con intercambiador de calor

El ahorro de combustible tiene como objeto reducir el consumo de energía, de esta manera optimizar el proceso de secar café y el empleo de la energía utilizando lo mismo o menos para producir más lotes de café seco. Dicho de otra manera, producir más con menos energía. Al calcular cuántos grados centígrados es calentado el aire que entra a la unidad calefactora, se muestra a continuación cuanto se ahorraría en cisco y energía calórica.

Para secar 3.22 kg de café se necesita 1 kg de cisco [14], se necesitarían 281.7 kg de cisco para secar 80@ de café en 24 horas. Ahora sabiendo que el flujo de aire necesario para secar 80@ de café es de 0.7 kg/s se tiene que:

$$\dot{Q} = C_p * m * \Delta T \quad (1)$$

$C_p$  = aire caliente constante

$m$  = masa de aire constante

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = W_{\text{combustión}} \quad (2)$$

$$\frac{m}{t} = 0.7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ constante} \quad (3)$$

$$\frac{C_p * m * \Delta T}{t} = W_{\text{combustión}} \quad (4)$$

Ahora los  $\Delta T$  del aire a temperatura ambiente y del aire precalentado de la unidad de calefacción:

**Aire medio ambiente:**

$$\Delta T1 = T_{fin} - T_{amb} = 50^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

$$\Delta T1 = 31^{\circ}\text{C}$$

Este  $\Delta T1$  es el cambio de temperatura que la unidad de calefacción genera si el aire de entrada no se sometiera al intercambiador de calor.

**Aire precalentado:**

$$\Delta T2 = T_{fin} - T_{exalaci\grave{o}n} = 50^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

$$\Delta T2 = 26^{\circ}\text{C}$$

Este  $\Delta T2$  es el cambio de temperatura que la unidad de calefacción debe generar si el aire de entrada se somete al intercambiador de calor, estará  $5^{\circ}\text{C}$  por debajo del  $\Delta T1$ .

Si para  $\Delta T1$  se necesitan 281.7 kg de cisco durante 24 horas para secar 907 kg de café, se sabe que para  $\Delta T2$  se necesitan:

$$X\text{kg} = \frac{281.7\text{kg} \cdot 26^{\circ}\text{C}}{31^{\circ}\text{C}} \quad (7)$$

$$X\text{kg} = 236.26 \text{ kg}$$

Se ahorrarían 45.4 kg de cisco en el proceso de secar el café, que equivale a un porcentaje de 16.1% menos al cisco total utilizado.

$$\Delta W = 45.4\text{kg} * 17.936 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8)$$

$$\Delta W = 814930.8 \text{ KJ}$$

Sabiendo que el poder calorífico del cisco es de 17.936 kJ/kg se tiene un ahorro energético de 814930.8 kJ.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del presente trabajo de grado demostró la versatilidad de la herramienta ISA S88.01 e ISA 95 en aspectos conceptuales administrativos y de ingeniería para su aplicación en las fincas cafeteras del sur occidente caucano productoras de café. En ese sentido los resultados de la presente investigación, demuestran la necesidad de mejorar los procesos de obtención de café seco, la necesidad urgente de promover actividades y procesos para mejorar la calidad del café y así mejorar el precio de venta a las comercializadoras, ya que el 46% de los caficultores entrevistados manifestaron que el café ya no era un producto rentable (primer semestre de 2016).

Hay una disposición de los caficultores a perfeccionar el producto con actividades y procesos que garantizan mejorar la calidad, transportando al café caucano a un mercado de exportación a nivel mundial. La situación económica de los caficultores por el precio bajo del café, los ha llevado a pensar en cambiar la actividad cafetera por cultivos o ganadería que generan más rentabilidad, el 74% de los caficultores entrevistados depende exclusivamente de los ingresos económicos que genera el café. La investigación exploratoria realizada en el sector cafetero de la región del sur occidente caucano sirve de base para futuros estudios de automatización, control e instrumentación para el proceso del café.

De las 15 fincas visitadas se seleccionaron 2 para levantar los modelos del estándar ISA-88 que permitieron identificar los detalles del proceso de secado de café y sus posibles fallas en el proceso, y darles solución mejorando el proceso y aumentando la calidad del café. Se desarrolló una propuesta de modelos mejorados de control de procedimiento y control de procesos, para ayudar al caficultor a seguir actividades, fases y procedimientos sobre el secado de café, de esta manera estandarizar un proceso de secado, mejorando la calidad del lote del café seco.

Se seleccionó la instrumentación adecuada en el silo secador tipo guardiola para mejorar el control de temperatura presente en la unidad de secado y adecuar un movimiento rotacional en el cilindro interno de 6 a 8 rpm durante el proceso de secado, garantizando uniformidad en el lote de café. Además se implementaron elementos de protección en los motores presentes en el silo tipo guardiola, así disminuir los riesgos de pérdidas económicas y paradas del proceso de secado del café. Se implementó el método Gravimet que realiza la medición de humedad del café en la unidad de secado del silo tipo guardiola por medio de la medición de la masa presente en el lote de café usando celdas de carga, que garantiza el valor deseado de humedad entre el 10 % y 12 %.

Se planteó la división del silo de café tipo guardiola en 3 unidades, unidad calefactora, unidad de secado y unidad de intercambio térmico, permitiendo así visualizar y agregar los lazos de control que el silo secador tipo guardiola mejorado deberá de tener. Facilitando proponer una lista de chequeo para el silo

tipo guardiola, ayudando al caficultor a realizar las actividades de mantenimiento y reparación si se presentan algunas fallas mínimas de los elementos eléctricos o mecánicos.

Se simuló el proceso de secado en dos silos secadores de café, silo capa fija y silo tipo guardiola usando la herramienta computacional Solid Works. Para ello las variables de flujo de aire y temperatura se fijaron en 50°C y 0.583 m<sup>3</sup>/s en la unidad de secado. Dentro de los resultados obtenidos se concluye que el factor de disipación del SSTG es mejor en un 47.04% que el SSCP. Se comprobó que el SSTG posee mejor distribución termodinámica que el silo secador de capa fija, disminuyendo el tiempo de secado, mejorando la calidad y aumentando la uniformidad de humedad en el lote de café, esta conclusión se obtuvo de tres indicadores resultantes de la simulación; el primero, el factor de disipación térmica de transferencia del flujo de aire en el SSTG, es de 7.24% lo que indica que la eficiencia de transferencia del flujo de aire es alta y mejor en un 50.56% que el SSCF, que está alrededor de 57.8%. El segundo indicador comprobó que el factor de disipación térmica en las paredes de las unidades de secado, el SSCP (2.84%) es mejor que el SSTG (7.6%), la diferencia de temperatura entre las unidades de secado, se puede explicar por la rotación del cilindro interno del SSTG, esta rotación además de mezclar el café y proporcionar uniformidad en el contorno del cilindro interno, ayuda a evacuar más rápido el aire húmedo y a disipar el calor existente dentro de la unidad de secado. El tercer indicador comprobó la eficiencia térmica de las dos unidades de secado que son similares (SSTG un 57.06% y SSCF un 56.06%), la razón principal por que la diferencia entre estos dos equipos es pequeña, es porque el diseño de la estructura de los silos es diferente y la manera en como cada unidad de secado aprovecha y distribuye la temperatura es distinta, el flujo de aire caliente en el silo tipo guardiola circula y está en contacto directo con el lote de café, mientras que el silo de capa fija obstaculiza el flujo y hay más áreas de contacto que disipan el calor.

Al implementar una unidad de intercambio térmico para aprovechar los gases de la chimenea de la unidad de secado, se comprobó un ahorro del 16.1% en el combustible utilizado (cisco).

Se recomienda realizar campañas educativas para el caficultor sobre como implementar los modelos estándar del secado de café (control de procesos y control de procedimiento) propuestos en el requerimiento RA2, mejorando y estandarizando así el proceso de secado, estableciendo una mejor calidad del lote de café. Además de hacer un llamado al comité nacional de cafeteros para educar al caficultor sobre el manejo e implementación de nuevos métodos para mejorar y aumentar la producción de café en la región del sur occidente caucano.

Al implementar el cambio del silo secador de capa fija al silo secador tipo guardiola se evita que el trabajador se exponga a un constante calor proveniente de la unidad de secado al realizar el mezclado manual, y mejorando la calidad de vida del empleado.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] R. García Cáceres and É. S. Olaya Escobar, “Caracterización De Las Cadenas De Valor Y Abastecimiento Del Sector Agroindustrial Del Café,” *Cuad. Adm.*, vol. 19, no. 31, pp. 197–217, 2006.
- [2] J. M. Gutiérrez Flórez, “Hacia la mejora del secado mecánico del café en Colombia,” no. 23, 2009.
- [3] A. Parra-Coronado, G. Roa-Mejía, and C. E. Oliveros-Tascón, “SECAFÉ Parte II: recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 12, no. 4, pp. 428–434, 2008.
- [4] C. A. Orozco and F. Bedoya, “Calculo del flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizado en silos para secado para del café,” *Scientia et Technica*, vol. 1, no. 35, pereira, pp. 207–212, Aug-2007.
- [5] K. Burmester and R. Eggers, “Heat and mass transfer during the coffee drying process,” *J. Food Eng.*, vol. 99, no. 4, pp. 430–436, 2010.
- [6] J. Lee-Laverde and C. Delgado-Agudelo, “Modelamiento Y Diseño De Un Secador Estatico De Café Pergamino (Silo De Café),” p. 250, 2013.
- [7] J. A. Montoya and E. Jimenez, “Determinacion de la curva de secado al aire libre, mediante modelacion matemática y experimental de la Guadua angustifolia Kunth,” *Sci. Tech.*, vol. XII, no. 30, pp. 415–419, 2006.
- [8] C. E. Oliveros, L. López, C. M. Buitrago, and E. L. Moreno, “Determinación del Contenido de Humedad del Café Durante el Secado en Silos,” *Cenicafé*, vol. 61, no. 2, pp. 108–118, 2010.
- [9] A. Parra-Coronado, G. Roa-Mejía, and C. E. Oliveros-Tascón, “SECAFÉ Parte I: modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 12, no. 4, pp. 415–427, 2008.
- [10] A. Crivoi and F. Duan, “Three-dimensional Monte Carlo model of the coffee-ring effect in evaporating colloidal droplets.,” 2014.
- [11] R. Brasileira, D. P. Agroindustriais, and C. Grande, “DRYING CHARACTERISTICS AND KINETICS OF COFFEE BERRY Paulo César Corrêa 1 , Osvaldo Resende 2 , Deise Menezes Ribeiro 3,” *Rev. Bras. Prod. Agroindustriais, Camp. Gd.*, vol. v.8, no. 1, pp. 1–10, 2006.
- [12] U. Azcapotzalco, “DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO DE UNA MÁQUINA SECADORA DE CAFÉ QUE EMPLEA ENERGÍA SOLAR,” 2011.
- [13] O. Buitrago, J. E. Ospina, and J. Alvarez, “Implementación del secado mecánico de café en carros secadores,” *Ing. e Investig.*, pp. 3–9, 1991.
- [14] D. A. Echeverry Ocampo, “Diseño Y Simulación De La Automatización De Un Secador Electromecánico De Café,” 2010.

- [15] E. Frontal, "Secado de café en lecho fluidizado," *Ing. e Investig.*, vol. 26, no. 1, pp. 25–29, 2006.
- [16] V. C. Jiménez C., "DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO DE CAFÉ," 2009.
- [17] J. D. Henao, A. Soto, M. A. G. R, and F. C. C, "Automatización de Secador de Café ( Tipo Silo ) de Automation of Coffee Dryer ( Type Silo ) of," 2010.
- [18] R. Ignacio, A. Bermudez, E. Alonso, and S. Cuadros, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SILO SECADOR DE GRANOS DE CAFÉ CON LA UTILIZACIÓN DE UN QUEMADOR DUAL DE COMBUSTIBLE (GAS ACPM)," 2005.
- [19] A. Putranto, X. D. Chen, Z. Xiao, and P. a. Webley, "Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA)," *J. Food Eng.*, vol. 105, no. 4, pp. 638–646, 2011.
- [20] M. Ospina Rodriguez, "CULTIVO DEL CAFE Nociones elementales al alcance de todos los labradores," *Colomb. Cafe.*, p. 228, 1880.
- [21] cafe de colombia s.a, "Secado del cafe, otra de las claves para que el cafe de Colombia sea de lata calidad," *Scientia et Technica*, 2012. [Online]. Available: [http://www.cafedecolombia.com/cci-fnc-es/index.php/comments/el\\_secado\\_del\\_cafe\\_otra\\_de\\_las\\_claves\\_para\\_que\\_el\\_cafe\\_de\\_colombia\\_adquiera/](http://www.cafedecolombia.com/cci-fnc-es/index.php/comments/el_secado_del_cafe_otra_de_las_claves_para_que_el_cafe_de_colombia_adquiera/). [Accessed: 01-Jun-2012].
- [22] C. E. Oliveros Tascon, J. R. Sanz Uribe, C. a. Ramírez Gomez, and A. Peñuela Martínez, "Secador solar de túnel para café pergamino," *Cenicafé*, vol. 353, pp. 1–8, 2006.
- [23] C. E. Oliveros Tascon, "Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café," *Programa de investigacion científica*, no. 14, Quindio, p. 2, 2009.
- [24] J. E. Ospina, F. Alvarez, and G. Roa, "Evaluacion de un secador intermitente de flujos concurrentes (IFC) para Café," *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 44, pp. 51–79, 1991.
- [25] C. E. Oliveros-Tascón and J. . Sanz-uribe, "Ingeniería y café en Colombia Engineering and Coffee in Colombia," pp. 99–114, 2011.
- [26] M. a. Sfredo, J. R. D. Finzer, and J. R. Limaverde, "Heat and mass transfer in coffee fruits drying," *J. Food Eng.*, vol. 70, no. 1, pp. 15–25, 2005.
- [27] D. D. E. I. Económicas, "Cuestionario Estadístico," 1994.
- [28] F. a Meier and C. a Meier, *Instrumentation and Control Systems Documentation*, Second. 2004.
- [29] U. E. C. Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC), Solubles Instantáneos (SICA), "Influencia de métodos de beneficio sobre la calidad organoléptica del café robusta," p. 28, 2010.
- [30] G. Puerta, "Influencia del proceso de beneficio en la calidad del cafe,"

*Cenicafe*, vol. 50, no. 1, pp. 78–88, 1999.

- [31] D. Sevilleja Aceituno and F. Soto Martos, “Eficiencia Energética En El Sector Industrial,” Carlos II de Madrid, 2011.
- [32] C. . Oliveros, A. . Peñuela, and J. M. Jurado, “Controle la humedad del café en el secado solar, utilizando el método Gravimet,” *Av. Técnicos* 387, vol. 433, p. 8, 2009.
- [33] “Eléctricas Bogotá,” 2016, 1982. [Online]. Available: <http://www.electricasbogota.com/>.
- [34] B. Soediono, “BENEFICIO DEL CAFE II: secado del cafe pergamino,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, p. 160, 1989.
- [35] E. C. Montoya-restrepo, “Estimación de la producción de café con base en los registros de floración,” vol. 59, no. 3, pp. 238–259, 2008.
- [36] S. Milena, M. López, F. : Gonzalo, H. Salazar, K. Hincapie, V. Diagramación, M. Del, R. Rodríguez, and L. Imprenta, “Factores, Procesos Y Controles En La Fermentación Del Café,” *Av. Técnicos Cenicafé*, vol. 1, p. 12, 2012.
- [37] C. a Orozco, J. a Montoya, and C. a Montilla, “Niveles de Contaminación Generados por Procesos de Secado de Café y Planteamiento de Soluciones,” *Sci. Tech.*, vol. 44, no. 44, pp. 373–378, 2010.
- [38] D. Esteban and A. Nieto, “CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD CAPACITIVO CON SALIDA ANÁLOGA E IMPLEMENTACIÓN EN EL DISEÑO DE UN CONTROL ON/OFF DE SECADO DE CAFÉ.” 2011.
- [39] ministerio de ambiente, “IDEAM,” *octubre 10*, 2016. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/tramites-servicios>.