

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

ENSAMBLE, PUESTA A PUNTO Y OPERACIÓN DE SECADOR MECÁNICO DE CAFÉ CON ACOPLE DE BOMBA DE CALOR

LUCIANI GIOVANI ANGEL

JUAN PABLO ALZATE GIL

INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

MSc. Bernardo Herrera Múnera

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

24 de julio de 2015

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

RESUMEN

Las dos técnicas principales de secado de café son el secado solar y el secado mecánico (Cadena Gómez, 1998), el primero implica mayores tiempos de secado, riesgos de contaminación y descomposición del grano. El segundo reduce los tiempos de secado por ende la descomposición del grano. La tecnificación del proceso de secado depende de la producción de cada productor, generalmente el secado solar se utiliza para producciones de menos de 500 arrobas de café seco al año (Cenicafé, 2014).

El secado mecánico más usado en Colombia es el de capa estática en el cual el aire es forzado a pasar por un intercambiador de calor, por la cámara de secado y por las capas de granos de café; dentro de este proceso de secado mecánico existen diversos parámetros que son importantes, como son la humedad, el flujo del aire y la temperatura de secado, la cual no debe ser superior a 50°C. Este sistema ha tenido un sinnúmero de modificaciones con el fin de aumentar su eficiencia y afectar en menor medida la calidad del grano

Una alternativa a los sistemas anteriores es el secado por deshumidificación con bomba de calor. Es por esto que a un secador de bandejas ubicado en el Laboratorio de Ciencias Térmicas del ITM, se le acopló una bomba de calor y una resistencia, que permite deshumidificar el aire y aumentar su temperatura, con el fin de mejorar las condiciones de secado, la eficiencia del proceso y disminuir el impacto ambiental asociado a los combustibles fósiles utilizados convencionalmente en los secadores mecánicos de café.

Luego de realizar el ensamble del secador con la bomba de calor, se encontró que el condensador estaba entregando una temperatura de 50°C, la cual no era suficiente para alcanzar las condiciones necesarias del flujo de aire que circulaba hacia la cámara de secado el cual solo estaba llegando en 38°C a dicha cámara, con dicha temperatura se podría realizar el secado de café, pero tomaría mucho más tiempo y se corre el riesgo que el café presente problemas de calidad. Por tal motivo se implementa una resistencia eléctrica a la salida del condensador para elevar la temperatura, pero esto hace que se afecte la presión de alta en el circuito de refrigeración, elevándola a 300 psi lo cual no es permisible para la operación del compresor. Con base en este resultado se realizaron recomendaciones para mejorar la operación del equipo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Palabras clave: Secado de café, bomba de calor, secador mecánico, des humidificación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

RECONOCIMIENTOS

Reconocimiento a las personas que de una u otra forma fueron participes en el desarrollo de nuestro trabajo de grado. A nuestro asesor Bernardo Herrera por su esfuerzo, dedicación y ayuda, quien con sus conocimientos, su asesoría y dirección supo guiar el desarrollo de la presente investigación. A todo el grupo humano del Laboratorio de Ciencias Térmicas.

Agradecemos especialmente, a nuestras familias, esposas, padres y hermanos quienes nos han apoyado de una manera incondicional, durante el desarrollo de nuestra carrera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

ACRÓNIMOS

Los siguientes son los acrónimos utilizados en este trabajo:

T	Temperatura (°C).
P	Presión (psi).
w	Potencia en Watts
H.R	Humedad Relativa.
V	Voltaje.
A	Amperaje.
HP	caballos de Fuerza
CFM	Pie cubico por minuto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

1.	<i>INTRODUCCIÓN</i>	8
1.1	Generalidades	8
1.2	Objetivo General	10
1.3	Objetivos Específicos.....	10
2.	<i>MARCO TEÓRICO</i>	11
2.1	Historia Del Café.....	11
2.2	Proceso de beneficio del Café	13
2.3	DIFERENTES TIPOS DE TECNOLOGÍA DE SECADO.....	17
2.3.1	Secado Solar	17
2.3.2	Secado mecánico.....	18
2.4	Innovaciones de la tecnología de secado.....	22
2.4.1	Bomba de calor.....	22
2.4.2	Operación de una bomba de calor.....	22
2.4.3	Elementos que componen la bomba de calor:	23
3.	<i>METODOLOGÍA</i>	26
4	<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	31
5	<i>CONCLUSIONES</i>	42
6	<i>RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO</i>	43
	<i>REFERENCIAS</i>	44

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Defectos de la calidad del café a causa de un mal secado.	15
Tabla 2. Tipos de tecnologías de secado solar.	17
Tabla 3 Tipos de tecnologías de secado mecánico.	20
Tabla 4 Equipos utilizados en laboratorio	30
Tabla 5 Condiciones iniciales y finales de prueba en laboratorio	36
Tabla 6 Resultados obtenidos de laboratorio	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participación mundial de producción de café	12
Figura 2. Diagrama bomba de calor	25
Figura 5. Componentes de Bomba de calor	29
Figura 6 Comportamiento térmico del evaporador	32
Figura 7 Comportamiento térmico del aire luego de pasar por el evaporador	33
Figura 8 Comportamiento térmico del condensador	34
<i>Figura 9 Comportamiento térmico del evaporador</i>	35
Figura 10 Comportamientos térmicos	36
Figura 11 Comportamiento de la presión	37
Figura 12 Comportamiento de la humedad	38

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Una gran parte de la producción mundial de café es obtenida en zonas tropicales y subtropicales, en su mayoría países en vías de desarrollo o subdesarrolladas. En muchos casos la exportación de café constituye parte importante de los ingresos del país, y su producción un gran generador de empleo (Villegas, 2008). En Colombia cerca de 600.000 familias viven en Colombia del cultivo, industria y comercialización del café, donde el café colombiano tiene una merecida reputación en los mercados internacionales por ser un producto de alta calidad (bredi cafe, 2014).

El proceso de beneficio del café comprende una serie de operaciones como clasificación, lavado, despulpado, remoción de mucílago y secado. Donde una de las etapas de mayor relevancia es el secado y tiene como finalidad disminuir el contenido de humedad del café de 53% en base húmeda a un rango que oscile entre el 10% y 12% de humedad, apto para su comercialización (Villegas, 2008)

El secado permite conservar los granos en buenas condiciones: libres de gérmenes y con un grado de humedad adecuado, evitando un medio ideal para el desarrollo de microorganismos e insectos que dañan al producto, deterioran su aspecto, lo cual afecta significativamente su calidad. Luego del secado se obtiene un café pergamino seco que posteriormente es transportado a los puntos de compra de las cooperativas desde donde continúa con las siguientes fases del proceso de comercialización que componen la cadena de valor (Oliveros, 2007).

El secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y llevarla al ambiente. La rapidez de este proceso depende de diferentes factores como la velocidad del aire, su grado de sequedad y su temperatura, así como de las características del producto, su composición, su contenido de humedad y el tamaño del lecho de granos. La cantidad de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y puede absorber más humedad.

Existen dos técnicas principales de secado, el primero de ellos corresponde el método natural de exponer el grano de café directamente al sol, es un método económico y

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

ambientalmente amigable, para esté cumplir estándares mínimos de calidad del café de Colombia. Es el más usado por los pequeños productores en Colombia, quienes producen cerca del 70% de la cosecha nacional. (Café de Colombia, 2014). Los riesgos biológicos y los químicos están directamente relacionados con la permanencia de los granos de café con altos contenidos de humedad por largos periodos de tiempo. El hongo *Aspergillus ochraceus* que puede producir en el café húmedo la ochratoxina A (OTA), es una sustancia química tóxica y cancerígena que ya es regulada para varios alimentos (Quintero, 2008), además de la contaminación ocasionada por contacto con animales. La variación de las condiciones climáticas, mano de obra y el espacio requerido son aspectos limitantes a esta técnica.

Por tal motivo los caficultores han buscado otros métodos más eficientes para el secado del grano, como el secado mecánico. Dentro de los avances realizados se encuentran los silos, se denominan silos porque se hace una analogía entre estos equipos usados por los caficultores y los grandes silos que se usan para almacenar grano, (arroz, maíz, sorgo, trigo etc.) los cuales son utilizados en gran parte del mundo, ya que estos silos cuentan con mucha capacidad para almacenar los granos, de igual forma los silos para el secado de café permiten que se seque mayor cantidad de producto por cada operación.

En ellos se hace pasar una corriente de aire caliente, a una temperatura de 50°C, a través de una masa de granos de café con una altura máxima de 35 cm, el cual va retirando la humedad a su paso por entre los granos. (Oliveros, Ramirez, Sanz, & Peuela, 2006)

Para calentar el aire se pueden utilizar quemadores a base de ACPM, carbón, gas, eléctricos o con cisco de café. El aire debe calentarse en forma indirecta (los gases de la combustión deben salir al exterior del recinto) para evitar la contaminación del café húmedo, para ello se utilizan intercambiadores de calor, donde el aire entra por un lado y los gases producto de la combustión salen por otro. El aire caliente es impulsado por medio de ventiladores que pueden ser de tipo axial o centrífugo, quienes se encargan de forzar el aire para dar un secado uniforme al café que se encuentra dentro del silo.

Los parámetros que influyen en el secado estático de café son: el espesor de la capa de grano, el flujo de aire, la temperatura de secado y el contenido de humedad inicial del grano.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

1.2 Objetivo General

Ensamblar y operar un secador de café con acople de bomba de calor para deshumidificación del aire en el secado.

1.3 Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de deshumidificación, por bomba de calor para el secado de café.
- Evaluar la operación del dispositivo deshumidificador para verificar que permite alcanzar condiciones adecuadas de secado de café.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Historia Del Café

No existe plena certeza sobre las condiciones en que llegó el café a Colombia. Los indicios históricos señalan que los jesuitas trajeron semillas del grano a la Nueva Granada hacia 1730. Los primeros cultivos de café crecieron en la zona oriental del país. En 1835 tuvo lugar la primera producción comercial y los registros muestran que los primeros 2.560 sacos se exportaron desde la aduana de Cúcuta, en la frontera con Venezuela. De acuerdo con testimonios de la época se le atribuye a Francisco Romero. La exportación en Colombia surgió a partir de la segunda mitad del siglo XIX. El gran éxito que tuvo ayudo a que algunos colombianos vieran gran oportunidad a la exportación internacional de café. (Federación Nacional de cafeteros, 1995)

Debido al impacto económico que sufrieron los hacendados surgió un cambio desde 1875, comenzó a difundirse la producción de café en Santander, en algunas zonas de Antioquia y en la zona del denominado Viejo Caldas. En las primeras décadas del siglo XX ya se había basado en la economía campesina, la colonización de nuevas tierras en el centro y occidente del país, principalmente en los departamentos de Antioquia, Caldas, Valle y el Norte del Tolima. La expansión de esta nueva caficultura hizo que a principios del siglo XX el occidente Colombiano tomara la delantera en el desarrollo cafetero del país.

El cultivo de café era una opción favorable para los pequeños productores ya que les ofrecía grandes beneficios a los campesinos, una mejor opción ya que sus tierras estarían por más tiempo con cultivo sin tantos requerimientos técnicos y sin sacrificar los cultivos para su subsistencia.

En la Figura 1 se presenta el crecimiento significativo que ha tenido Colombia frente al resto de países productores en la exportación del café. (Federación Nacional de cafeteros)

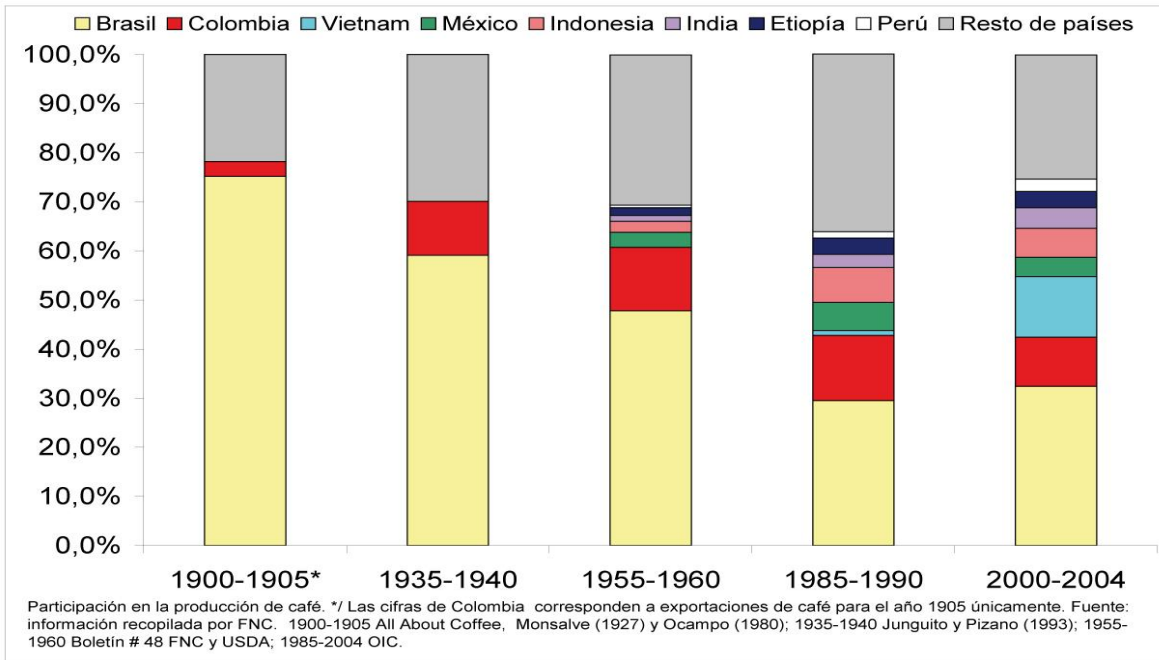


Figura 1. Participación mundial de producción de café

En 1930 Colombia se consolidó como el segundo productor de café en el mundo, la unión de campesinos y pequeños productores en torno a la Federación les ha permitido afrontar retos comunes de logística y comercialización que individualmente no hubiesen podido sortear. Con el tiempo, y a través de la investigación en Cenicafé, fundado en 1938, y del Servicio de Extensión agrícola, se desarrollaron sistemas de cultivo y de trazabilidad que permitieron diferenciar al producto y garantizar su calidad. (café de Colombia, 1995).

Según informes entregados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia en los últimos años Colombia ha ido perdiendo este lugar con países como Vietnam e Indonesia ascendiendo al cuarto lugar en cantidad de sacos de 60Kg exportados en 2012-2013. Colombia exportó 7.2 millones de sacos, frente a los 25.8 millones exportados por Brasil que es el primer exportador del mundo, los 18.8 millones de sacos exportados por Vietnam segundo exportador y los 8.7 millones de sacos exportados por Indonesia tercer exportador del mundo, aunque la cantidad de sacos exportados ha bajado y se ha perdido el segundo puesto en exportación Colombia sigue manteniendo la calidad y ese aroma especial de su café (Federación Nacional de cafeteros, 1995)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

2.2 Proceso de beneficio del Café

- **Recolección:**

En esta etapa se cosechan únicamente los granos que alcanzan el estado de madurez completa, normalmente de color rojo o amarillo, ya que los verdes dañan el sabor de la taza de un café. Todo este proceso se desarrolla de forma manual.
- **Despulpe:**

Consiste en retirar la pulpa de la cereza por medio de presión que ejerce la camisa de la despulpadora y debe iniciarse inmediatamente después de que se cosechan los frutos. El café maduro contiene mucílago, baba o “miel”, que permite el despulpado con solo presionar la cereza.
- **Remoción del mucilago:**

El mucílago es la baba que recubre el grano despulpado, el mucílago debe removerse por medio del proceso de fermentación natural o mecánicamente, Utilizando equipos que permitan retirar la miel y la pasilla que cubre los granos de café pergamino.
- **Fermentación natural:**

El proceso de fermentación se realiza en los tanques donde se recibe el grano despulpado. En la fermentación natural, El tiempo oscila entre 12 y 18 horas, dependiendo de la temperatura, en zonas frías el café requiere mayor tiempo de fermentación
- **Remoción mecánica:**

Es la forma de eliminar el mucílago del grano en forma continua, el proceso depende de la utilización de equipos des mucilagadores que trabajan en forma automática y no requieren que el operario (caficultor) esté pendiente de su operación solo de mantener la tova llena de café cereza, entregando el producto listo para el proceso de secamiento, y así evitar post-fermentaciones indeseables.
- **Lavado del café fermentado:**

La fermentación es un proceso en el cual la pulpa pegajosa se separa de la piel de las semillas o granos del café a través de la acción de las enzimas naturales durante el tiempo que los granos permanecen en tanques. Si se añade agua a los tanques,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

el proceso es llamado fermentación húmeda, si no se añade agua es llamado fermentación seca y se puede hacer de forma manual o mecánica.

- **Lavado manual:**

Es la operación de quitar la miel que queda adherida al pergamino, por medio de la inmersión y paso de una corriente de agua en un canal de correteo o clasificación utilizando paletas de madera las cuales opera el caficultor o la persona encargada de vigilar el proceso.

- **Lavado mecánico:**

Es el lavado del café mediante bombas de impulsor abierto, combinando una clasificación en canales rectos con una pendiente uniforme de 0.75%, se trata de dar al canal un flujo laminar constante que permita la clasificación del café recién lavado, se llama así porque las bombas nos ayudan a impulsar el café y por medio de este impulso se retira la miel de café pergamino ya que produce fricción entre los granos y las paredes de la bomba retirando la miel, entregando los granos limpios y listos para la clasificación.





- **Secado del café lavado:**

Es el método de acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla




Las prácticas inadecuadas durante el secado del café pueden causar múltiples defectos en la calidad establecidos por los estándares de calidad aplicados al Café de Colombia como lo son los que a continuación se muestran en la Tabla 1.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Tabla 1. Defectos de la calidad del café a causa de un mal secado. (Federación Colombiana de Cafeteros, 2010)

	DEFECTO DE CALIDAD	DESCRIPCIÓN	CAUSA	
1	Negro total o parcial	<ul style="list-style-type: none"> • Grano con coloración del pardo al negro • Encogido • Arrugado • Cara plana hundida • Hendidura muy abierta 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de agua durante el desarrollo del fruto • Fermentaciones prolongadas • Cerezas sobre maduras recogidas del suelo • Malos secados o re humedecimientos 	
2	Cardenillo	<ul style="list-style-type: none"> • Grano atacado por hongos, recubierto de polvillo amarillo o amarillo rojizo 	<ul style="list-style-type: none"> • Fermentaciones prolongadas • Interrupciones largas del proceso de secado • Almacenamiento húmedo del producto 	
3	Vinagre o parcialmente vinagre	<ul style="list-style-type: none"> • Grano con coloración del crema al carmelita oscuro • Hendidura libre de tegumentos • Película plateada puede tender a coloraciones pardo rojizas 	<ul style="list-style-type: none"> • Retrasos entre la recolección y el despulpado • Fermentaciones demasiado prolongadas • Uso de aguas sucias • Almacenamiento húmedo del café 	
4	Cristalizado	<ul style="list-style-type: none"> • Grano de color gris azulado; frágil y quebradizo 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas temperaturas en el secado (más de 50°C) 	

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

5	Decolorado veteados	<ul style="list-style-type: none"> Grano con vetas blancas 	<ul style="list-style-type: none"> Re humedecimiento después del proceso de secado 	
6	Decolorado sobre secado	<ul style="list-style-type: none"> Grano de color ámbar o ligeramente amarillento 	<ul style="list-style-type: none"> Demasiado tiempo o temperatura en el secado 	
7	Flojo	<ul style="list-style-type: none"> Grano de color gris oscuro y blando 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de secamiento 	

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.

El principal factor que influye en la calidad del café almacenado es la humedad. Cuando el grano es secado adecuadamente, se hace fácilmente conservarlo por lo que se evita una posible desarrollo de mohos, al mismo tiempo que se garantiza su buen gusto y aroma.

Los granos tienen su máximo contenido de materia seca al llegar a la maduración, por lo que es conveniente cosecharlos en ese momento para así obtener el máximo rendimiento de la producción. Sin embargo y por varias razones, el alto contenido de humedad de los granos limita su cosecha y hay que mantenerlos en el campo hasta que el contenido de humedad permita su cosecha o hasta que alcancen un contenido de humedad apropiado para su almacenamiento.

Se recomienda cosechar los granos húmedos tan pronto como sea posible y después secarlos, con los siguientes objetivos: obtención de un mayor porcentaje de materia seca, menores pérdidas debidas al ataque de depredadores, mayor porcentaje de vigor y germinación, menor contaminación e infestación de los productos en el campo (buena calidad para el almacenamiento) y otros más.

El exceso de secado cuesta dinero. Esto hace que sea tan grave como un secado insuficiente: no sólo 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. (centro de comercio internacional, 2014).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

2.3 DIFERENTES TIPOS DE TECNOLOGÍA DE SECADO

2.3.1 Secado Solar



Es el método que utiliza la energía solar como elemento principal para lograr retirar la humedad necesaria, y es la más utilizada por los pequeños caficultores, esta es una forma muy práctica por que no se incurre en gastos por la compra de equipos sofisticados y no hay consumo de energías eléctricas, presenta alta eficacia física ya que a pesar de que el secado tarda más tiempo que utilizando la tecnología, se logra un muy buen resultado y fácil manejo del proceso, este proceso cuenta con algunos problemas como: El producto tiende a contaminarse, ya sea por estar expuesto en patios o por plagas y su tiempo de secado está muy dependiente de las condiciones climáticas.

Alguno de las tecnologías de secado solar más utilizadas en Colombia para el pequeño y mediano caficultor se muestran en la Tabla 2 y se puede concluir que todos estos métodos ideados por los caficultores les han dado buenos resultados en la búsqueda de optimizar el secado del café, pero en los dos anteriores el túnel solar y el parabólico los caficultores están un poco más tranquilos con la probabilidad de que se presenten lluvias en cualquier momento que puedan mojar el café.

Tabla 2. Tipos de tecnologías de secado solar. (Oliveros, Ramirez, Sanz, & Peuela, 2006)

TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	TIEMPO DE SECADO EN DÍAS	
EL SECADO SOLAR EN PATIOS	Es aquél en que el grano se expone directamente a la radiación solar y al aire ambiente, removiéndose durante todo el proceso de secado hasta alcanzar una humedad final.	6 a 8	

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

1	TÚNEL SOLAR	Una estructura de guadua, con una cubierta plástica transparente, un piso de malla plástica y compuertas enrollables de plástico transparente.	5	
2	PARABÓLICO	Es una plancha de cemento cubierta con una estructura de guadua y plástico, que permite la circulación interna del aire	6	

2.3.2 Secado mecánico.

El secado mecánico de café, es un método más novedoso, ya que se logra utilizando diferentes tecnologías tales como: secadores de café por combustión interna, secadores por bomba de calor etc. Donde se hace circular el aire a través de una capa de granos de café para retirar su humedad, con estos equipos se hace el mismo proceso que se hacía manualmente por los caficultores con el sol, reduciendo así el tiempo de secado y optimizando la calidad de la producción, ya que existen condiciones en algunas regiones cafetaleras del país, donde la práctica del secamiento en patios no es posible, debido a la alta precipitación pluvial, a condiciones topográficas del terreno, etc. Esto, asociado a altas producciones en las fincas, justifica el uso de infraestructura e instalaciones mecánicas para que el proceso de secamiento se efectúe en una forma rápida y continua.

Es de anotar que en el secado mecánico del café generalmente se usan cámaras en las cuales se introduce aire caliente a máximo 50°C, impulsado por un ventilador, el cual

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

atraviesa la masa de café, el aire puede calentarse con estufas y quemadores, entre otros, (asociación nacional del café Guatemala, 1995).

En la mayoría de las ocasiones se emplea la biomasa disponible en la finca como: El cisco del café, tusas de maíz y leña de café (resultante del zoqueo), ACPM, carbón mineral y energía eléctrica. No se usa aceite quemado como combustible ya que este genera mucha contaminación al arrojar demasiado CO₂ al ambiente. (Federación Nacional de cafeteros, 1995)



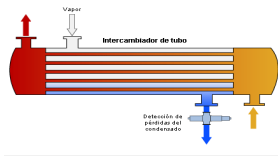
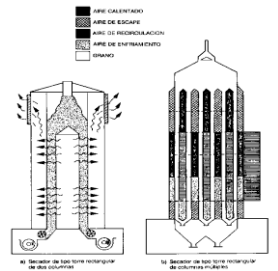
En estos equipos se tiene en cuenta las diferentes formas de transferencia de calor que son utilizadas en el proceso, y son tenidas en cuenta para la fabricación de los equipos, con el fin de darles la máxima eficiencia posible. Estas son:

- **Conducción:** Es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, por la interacción en un intervalo pequeño de moléculas o electrones. Como cuando el calor avanza por el mango de una cuchara, en nuestro equipo la bomba de calor, se encarga de que el refrigerante sea comprimido a alta temperatura y este a su vez, hace el intercambio de calor con aire ambiente, el cual circula en los intercambiadores de calor (condensador y evaporador).
- **Radiación:** Es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas. La radiación incidente de un cuerpo puede ser absorbida, reflejada y transmitida como por ejemplo, el calor transmitido por el sol.
- **Convección:** Es la transferencia de calor por la combinación de mecanismos de mezcla de fluidos y conducción, como cuando una casa es calentada por el aire que pasa a través de un calentador.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

En la Tabla 3 se muestra algunas tecnologías convencionales de secado mecánico utilizados por los medianos y mayores productores de café en Colombia.

Tabla 3 Tipos de tecnologías de secado mecánico. (Oliveros, Sanz Uribe, Ramirez Gomez, & Peñuela, 2009) (Cenicafé, 2014) (Abdala Rodriguez, Fonseca Fonseca, Pantoja Enriquez, & Gen Torres, 2003)

	DESCRIPCIÓN	
INTERCAMBIA DOR DE CALOR - AIRE AIRE	Este tipo de equipo funciona invirtiendo la dirección del flujo de aire. En la figura se puede ver que tiene acopladas las bandejas para el secado de café.	
HORNO TIPO CAMPANA	El aire ambiente ingresa por la parte inferior, donde es calentado por convección antes de ingresar al secador. El combustible es inyectado a la cámara de combustión, donde se generan los gases calientes, que al entrar en contacto con las partes metálicas del cilindro interno elevan la temperatura del aire. Este entra por la parte superior del horno, en el espacio anular entre el cilindro externo o interno. Las superficies metálicas del espacio recorrido por el aire constituyen las áreas de transferencia de calor.	
HORNO DE TUBOS CONCÉNTRICOS	El aire que entra es calentado al pasar por el interior de este sistema de tubos concéntricos y se usa además otra entrada de aire que está en contacto con la parte exterior de los tubos	
HORNO DE DOBLE PASO	Este horno de forma cuadrada está diseñado para quemar convencionalmente leña. Es un diseño optimizado de un intercambiador simple de doble paso. El aire ambiente atraviesa perpendicularmente la tubería, transmitiéndose el calor por convección, llegando finalmente al área de secado.	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

HORNOS DE FUEGO DIRECTO	Este tipo de horno no cuenta con un intercambiador de calor. Es decir que el calor generado es enviado directamente por el ventilador a la masa de café. Si no se tiene una combustión adecuada pueden llegar los gases al producto, deteriorando su calidad	
INTERCAMBIADOR DE CALOR, ALIMENTADO CON CISCO DE CAFÉ	Consta de 92 tubos de acero a través de los cuales fluyen los gases de combustión en dirección vertical ascendente, mientras que el aire de secado lo hace a través de los espacios libres entre los tubos, en dirección contraria.	
SECADOR ESTÁTICO SIN CÁMARA DE PRESECADO	Consta de una unidad de calentamiento del aire de secado, un ventilador y dos cámaras en las cuales se deposita el grano.	
SILO-SECADOR "CENICAFÉ"	Consta de una unidad de calentamiento del aire de secado, un ventilador y dos cámaras en las cuales se deposita el grano.	
SECADORES SOLARES MULTIPROPÓSITO Y DE TAMBOR ROTATIVO	El tambor colocado en el interior de la cámara de secado está formado por un doble cilindro metálico de chapa de acero perforada, y es el encargado de captar la radiación solar incidente que atraviesa la doble cubierta de vidrio. En el espacio anular entre los dos cilindros se coloca el producto por secar.	 <p> 1. Tambor interior 2. Tambor exterior 3. Aire de la cámara 4. Placaleta de horneado 5. Doble cubierta de vidrio 6. Motorreductor de baja potencia 7. Ventilador de recirculación 8. Puerta aislada 9. Pista para la transmisión por fricción 9. Carro con sus rielos para extraer el tambor </p>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

2.4 Innovaciones de la tecnología de secado

2.4.1 Bomba de calor.

Una bomba de calor es una máquina térmica que transfiere energía realizando un intercambio de calor entre un ambiente frío a otro ambiente más caliente.

Recibe este nombre por analogía con las bombas de agua, que sirven para subir el agua desde un nivel bajo a otro más alto. Para lograrlo es necesario un aporte de trabajo, pues de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, el calor se dirige de manera espontánea de una fuente caliente a otra fría, hasta que sus temperaturas se igualen, y no al revés (Gutierrez, 2009).

2.4.2 Operación de una bomba de calor.

El calor fluye de forma natural desde las altas temperaturas a las bajas temperaturas. Sin embargo, la bomba de calor es capaz de hacerlo en dirección contraria, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña.

Una bomba de calor trabaja en forma semejante al equipo de refrigeración, por compresión de gases refrigerantes, en el que en vez de obtener el calor de un ambiente cerrado para disiparlo en el exterior, se obtiene calor del exterior, o de cualquier otra fuente exterior, calentando un fluido frío en un evaporador, para enfriarlo en un condensador, cediendo calor para calentar los espacios interiores. Técnicamente las máquinas para uno u otro uso son las mismas, variando solamente los campos de temperatura que trabajan.

Aun así, se suele llamar preferentemente bomba de calor a la destinada a calefacción de espacios y máquina frigorífica a la que proporciona refrigeración o enfría lugares, recintos o cámaras frigoríficas. Y la razón es la analogía con la bomba de agua; se supone que una máquina frigorífica, aunque "bombea calor" hacia el exterior, lo que "se nota" es que enfría el cuarto o recinto donde se encuentra y hacia el cual está dirigido su flujo de aire, mientras que la máquina destinada a calefacción efectivamente lleva calor allí donde hace falta o donde se requiere para llevar a cabo un proceso o una determinada aplicación, obteniéndolo de un lugar que está a un nivel térmico más bajo haciendo el proceso inverso al anterior.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Para transportar calor desde la fuente de calor al sumidero de calor, se requiere aportar un trabajo. Teóricamente, el calor total aportado por la bomba de calor es el extraído de la fuente de calor más el trabajo externo aportado.

El principio de funcionamiento de las Bombas de Calor proviene del establecimiento por Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin. Un gas que evoluciona en ciclos, es comprimido y luego expandido y del que se obtiene frío y calor (Rey, 2005).

La mayor parte de las Bombas de Calor existentes, trabajan con el ciclo de compresión de un fluido condensable. (Hernandez, 1993).

2.4.3 Elementos que componen la bomba de calor:

Compresor

Es el elemento mecánico más complicado y delicado de la instalación, siendo objeto de inspecciones y verificaciones sistemáticas. Además, el compresor es el único elemento de la máquina que necesita para su funcionamiento consumir energía mecánica.

Este dispositivo permite elevar la presión del vapor refrigerante desde una presión de entrada a una presión de salida más alta.

El compresor puede ser accionado por un motor eléctrico o por un motor térmico.

- Bombas de calor eléctricas: En este tipo de bombas el compresor es accionado por un motor eléctrico.

- Bomba de calor con motor térmico: El compresor es accionado mediante un motor de combustión, alimentado con gas o con un combustible líquido. Las más extendidas son las bombas de calor con motor de gas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Válvula de expansión

Es el elemento que separa el lado de alta presión del de baja presión. Su finalidad es doble: regular el flujo de refrigerante hacia el evaporador y reducir la presión del líquido refrigerante de forma isoentálpica.

Condensador

Es un intercambiador de calor en el que el refrigerante que proviene del compresor en estado de vapor sobrecalentado, a temperatura elevada, cede calor a un medio que puede ser aire o agua. Este enfriamiento produce la condensación del fluido frigorífico. La transferencia de calor se favorece mediante el uso de tubos aleteados, o ventiladores si la refrigeración se realiza por aire. El condensador disipa la energía que recoge el evaporador, y además la componente térmica del trabajo del compresor.

Evaporador

El refrigerante a baja temperatura y presión pasa por el evaporador, que al igual que el condensador es un intercambiador de calor, y absorbe el calor del recinto donde está situado. El refrigerante líquido que entra al evaporador se transforma en gas al absorber el calor del recinto (Rey, 2005).

Tanto en evaporador como en el condensador la transferencia energética se realiza principalmente en forma de calor latente.

En la Figura 2 se muestra un diagrama general de los elementos que conforman una bomba de calor.

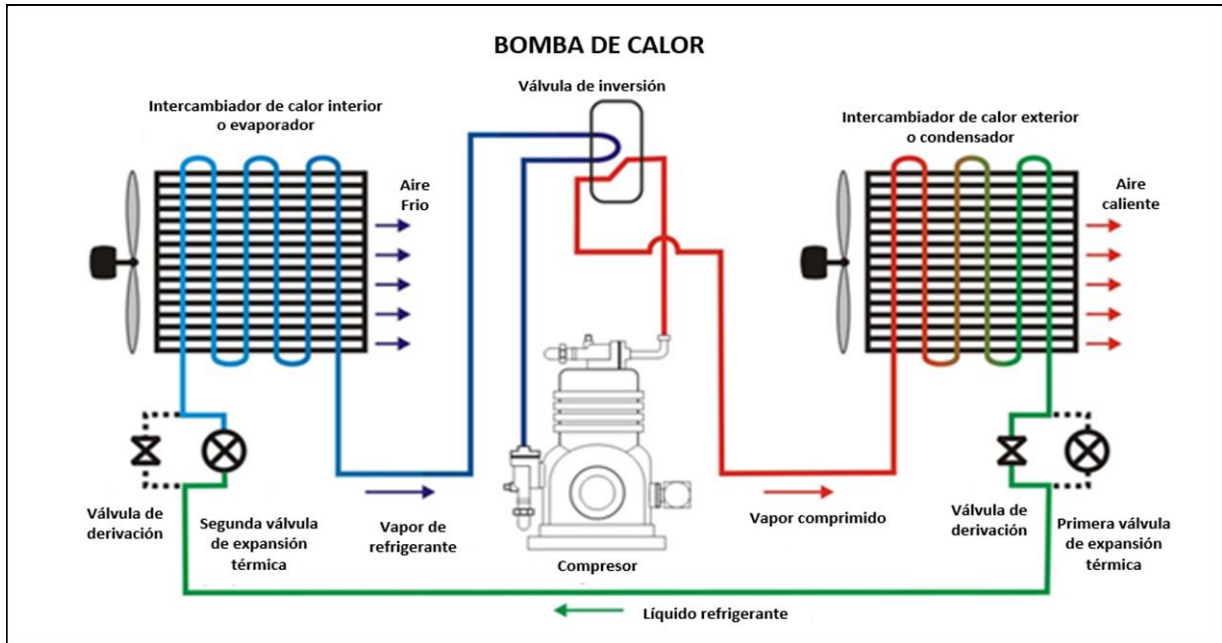


Figura 2. Diagrama bomba de calor Adaptado (AirScape, 2015).

El compresor es el elemento principal en la operación de la bomba de calor, luego está la válvula de expansión o tubos capilares los cuales deben estar: Bien calibrada en el caso de la válvula de expansión y bien seleccionados para el caso de los capilares, de acuerdo a la capacidad del compresor, del evaporador etc.

Luego los intercambiadores de calor y los ventiladores que hacen circular el aire a través de los intercambiadores de calor.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

3. METODOLOGÍA

El trabajo se realizó en el laboratorio de Ciencias Térmicas de la Institución Universitaria ITM.

Montaje de la bomba de calor

En el secador mecánico de café, con la utilización de una bomba de calor se tuvo en cuenta el flujo de aire que debía ser calentado por medio del condensador de la bomba de calor y que luego este flujo de aire pasaría a la cámara de secado donde se encuentran las celdas de café y allí el flujo de aire ganaría humedad que luego sería retirada por medio del evaporador de la bomba de calor, el cual enfriará el flujo de aire para que la humedad contenida en ella se condense y pueda ser retirada por medio de un drenaje. Para la realización de este ensamble se tuvo en cuenta los siguientes pasos:

- Se hizo un listado de materiales que se encontraban en el laboratorio de ciencias térmicas
 - ✓ Compresor 1 HP
 - ✓ Ventilador centrifugo de 700 cfm
 - ✓ Condensador
 - ✓ Evaporador
 - ✓ Cabina de secado café
 - ✓ Gabinete para montaje de los intercambiadores
 - ✓ Tubería de ¼ cobre
 - ✓ Ducto de circulación de aire
- Se realizó el ensamble de los componentes, tales como el ventilador (blower), chasis de ensamble, sensores de peso, temperatura y humedad, celdas acumuladoras de café, ducto para recirculación de aire etc.
- Se colocó la bomba de calor sobre una base de 10 pulgadas (25,4 cm) de acero al carbón. La cual se encuentra sujeta al chasis del equipo, se instaló a nivel, con las puertas de acceso para no tener problemas con el drenaje de la bomba de calor. Se dejó un espacio libre de 3 pulgadas (7,62 cm) en la parte inferior del serpentín, de la bomba de calor para un drenaje adecuado de la escarcha o agua de condensación. En la Figura 3 se muestra el montaje realizado.

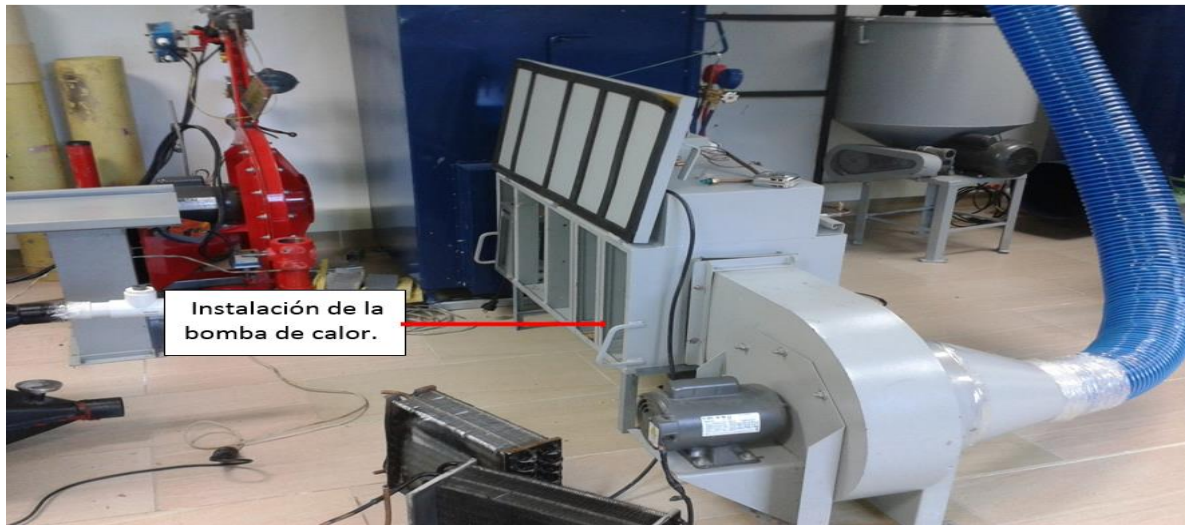


Figura 3 Instalación Bomba de calor

- Se procedió a la reparación y chequeo de los intercambiadores de calor ubicándolos en el gabinete, haciendo sus respectivas perforaciones y conexiones

En la Figura 4 se muestran los elementos encargados de realizar el intercambio de calor dentro del proceso, el evaporador encargado de enfriar el aire para así poder retirar la humedad por condensación y luego el condensador que calentará el aire que luego pasará a la cámara de secado, logrando así el secado del café.

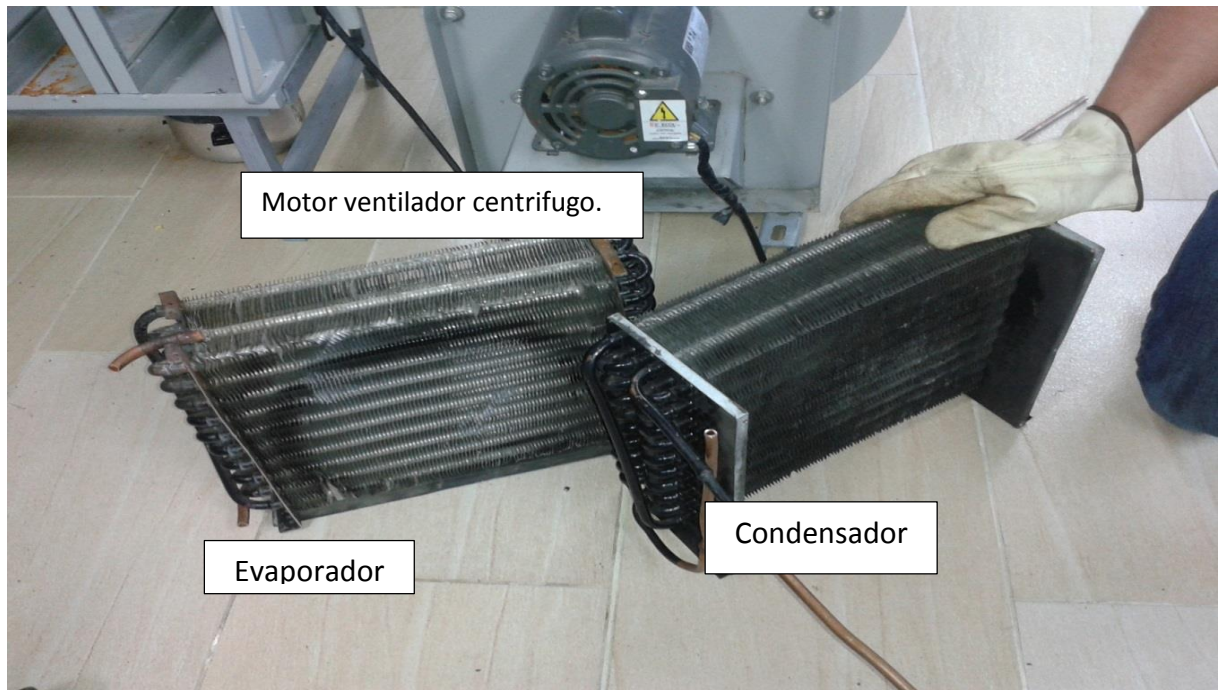


Figura 4 Elementos encargados de realizar el intercambio de calor.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

- Se presurizó el sistema para detectar fugas con agua jabonosa, encontrando varias, lo que nos hizo volver a despresurizar el circuito para corregirlas con soldadura y acetileno como elemento carburante, ya corregidas se presurizó nuevamente y al verificar la ausencia de fugas se procedió a hacer vacío por 3 horas continuas con una bomba de vacío de 15 hp y un manómetro de 5 vías para medir las presiones de alta y baja en el circuito de refrigeración, para retirar la posible humedad que pudo encontrarse dentro de los tubos de cobre ya que estaban en contacto con el aire ambiente, el cual contenía humedad.
- Se procedió a hacer la conexión eléctrica del compresor y ventilador en el tablero de control, que se encuentra en la parte superior del equipo.
- Se rompió el vacío, se inyectó 1 lb de gas refrigerante R-22 y se hizo la carga del sistema con el equipo encendido, es decir con la bomba en operación para que pueda haber circulación del refrigerante y así poder alcanzar la presión de operación, quedando con una presión por baja de 40psi y por alta de 280psi medidos con un manómetro de 5 vías.
- Se aisló la línea de gas de vapor de la bomba de calor con aislamiento de 1/2 pulgada (1,27 cm) de espesor alrededor del tubo de cobre desde el extremo de la tubería para no permitir residuos en el tubo.

En la Figura 5 se observa el ensamble de la bomba de calor en la estructura que consiste en un compresor scroll de 1 HP, un condensador de 12000BTU, un evaporador, un filtro secador y un elemento expansivo (capilar de 1/8") el cual cumple la función de elevar la presión, en el circuito de refrigeración, para evitar que se generen escarchas o congelamiento en el evaporador.

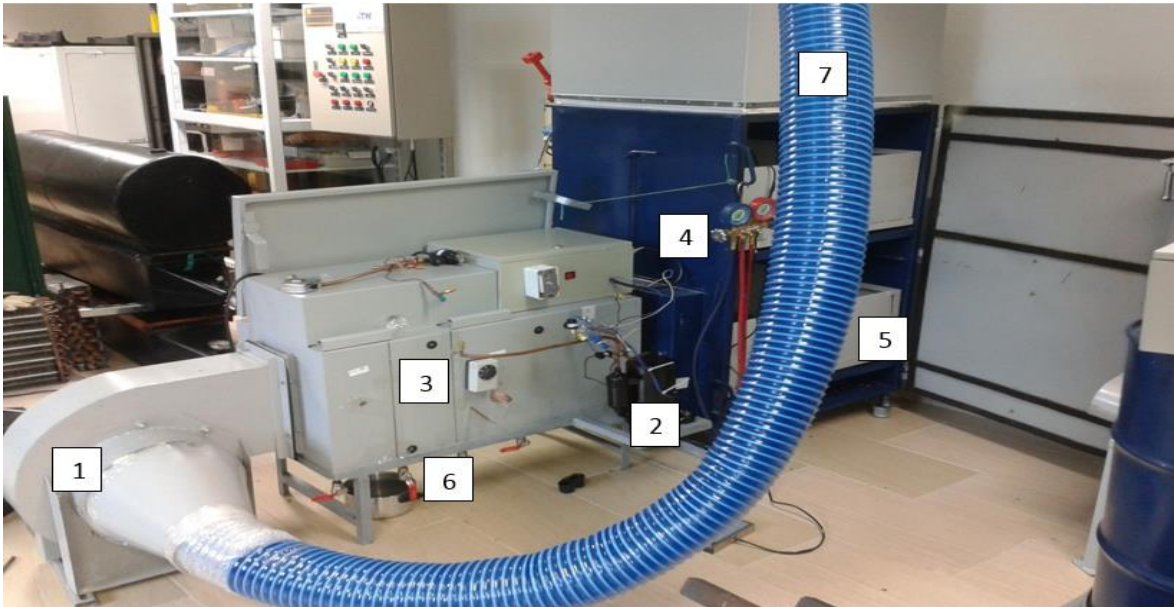


Figura 3. Componentes de Bomba de calor

Componentes del equipo:

- 1- Ventilador centrífugo de $\frac{1}{2}$ hp, capacidad 700 cfm.
- 2- Compresor de 1 HP.
- 3- Intercambiador de calor y retiro de humedad.
- 4- Gabinete de almacenamiento del café.
- 5- Celdas acumuladoras del café.
- 6- Drenaje del condensado retirado al café.
- 7- Ducto recirculación de aire.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Evaluación de operación de la bomba de calor en el laboratorio

- Con el fin de simular la carga de café mojado, como prueba preliminar de funcionamiento del equipo para la puesta a punto, se procede a evaluar el equipo con una carga de fibra humedecida.
- Inicialmente la fibra se pesó antes de humedecerla y después de humedecida para tener las condiciones iniciales del proceso, luego se llevó a la cámara de secado para iniciar con la prueba.
- En la Tabla 4 se muestran los equipos usados para el registro de las variables, donde se utilizó el termo higrómetro a la salida del condensador y en el ducto de retorno del aire al ventilador para observar la humedad que ganó con el paso del aire por la cámara de secado de café. El analizador de redes se utilizó para monitorear el voltaje, corriente y potencia del compresor, el manómetro de cinco vías fue instalado en el lado de baja y de alta en el compresor para monitorear las presiones de trabajo. Las mediciones se tomaron durante intervalos de tiempo cada 10 minutos.

Tabla 4 Equipos utilizados en laboratorio

Equipo	Variable Medida
Termo higrómetro	temperatura y la humedad relativa
Analizador de Redes	Voltaje, Corriente y Potencia del compresor
Cronómetro	Tiempo
Manómetro de cinco vías	presión de alta y de baja del compresor

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La gran cantidad de secadores mecánicos de café, que operan con diversas fuentes de energía como los combustibles fósiles hace que se contamine el medio ambiente por la gran cantidad de emisiones de gas carbónico emitidas durante el proceso de secado. Esto afecta la capa de ozono, disminuyendo la protección que esta le brinda a los seres vivos contra los rayos ultra violeta emitidos por el sol.

La implementación de la bomba de calor para el secado de café ofrece una clara ventaja luego es más amigable con el medio ambiente ya que no emite CO₂ por que opera con energía eléctrica, la cual se genera en las centrales hidroeléctricas, esto hace que sea energía limpia sin emisiones de CO₂.

El secado del café, se debe hacer a temperaturas bajas y moderadas, para secar el café se utiliza la propiedad que tiene el aire para cargarse de humedad. La cantidad de humedad absorbida por el aire es mayor, cuando más alta sea la temperatura. Al impulsar aire seco y caliente, que robará humedad al café a secar. Luego este aire húmedo pasa por el evaporador de la bomba de calor, en el que se enfría y deshumidifica.

La selección del intercambiador establecido en este equipo, se hizo con base al intercambiador industrial que se utiliza comúnmente en las máquinas de secado, sus dimensiones, la dirección de los fluidos de trabajo y el material de los componentes que forman los tubos del intercambiador de calor, con el fin de determinar las características de cada uno de los fluidos de trabajo, su coeficiente global de transferencia de calor para superficies aleteadas en las paredes externas de los tubos donde fluyen los gases refrigerantes y su eficiencia de funcionamiento, cumplieron con las condiciones de caudal y de presión estática, producidas por el paso del aire a través de su calentamiento. Se tomaron las dimensiones de los componentes, externos e internos, de la bomba de calor.

Dichas dimensiones se midieron con cinta métrica, a su vez, se hicieron las observaciones de funcionamiento y construcción del equipo, donde se establecieron los tipos de material más utilizados, para la construcción de los tubos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

En la Figura 6 se muestra el comportamiento térmico del evaporador, después de acoplado el sistema al chasis del secador mecánico de café, y con el refrigerante R-22 circulando a través de sus tubos, los cuales están cubiertos de aletas fabricadas en aluminio para lograr un mejor intercambio de calor, al interior del secador mecánico de café, la parte que aparece de color naranja o rojizo, nos dice que la circulación del refrigerante en estos puntos aun no es uniforme, no alcanza todavía la temperatura requerida, es decir aún no se llena por completo todo el evaporador de refrigerante en estado gaseoso, se hace necesario ajustar carga de refrigerante para elevar más la presión del circuito, ya que la presión manométrica se encontraba en 40 PSI.

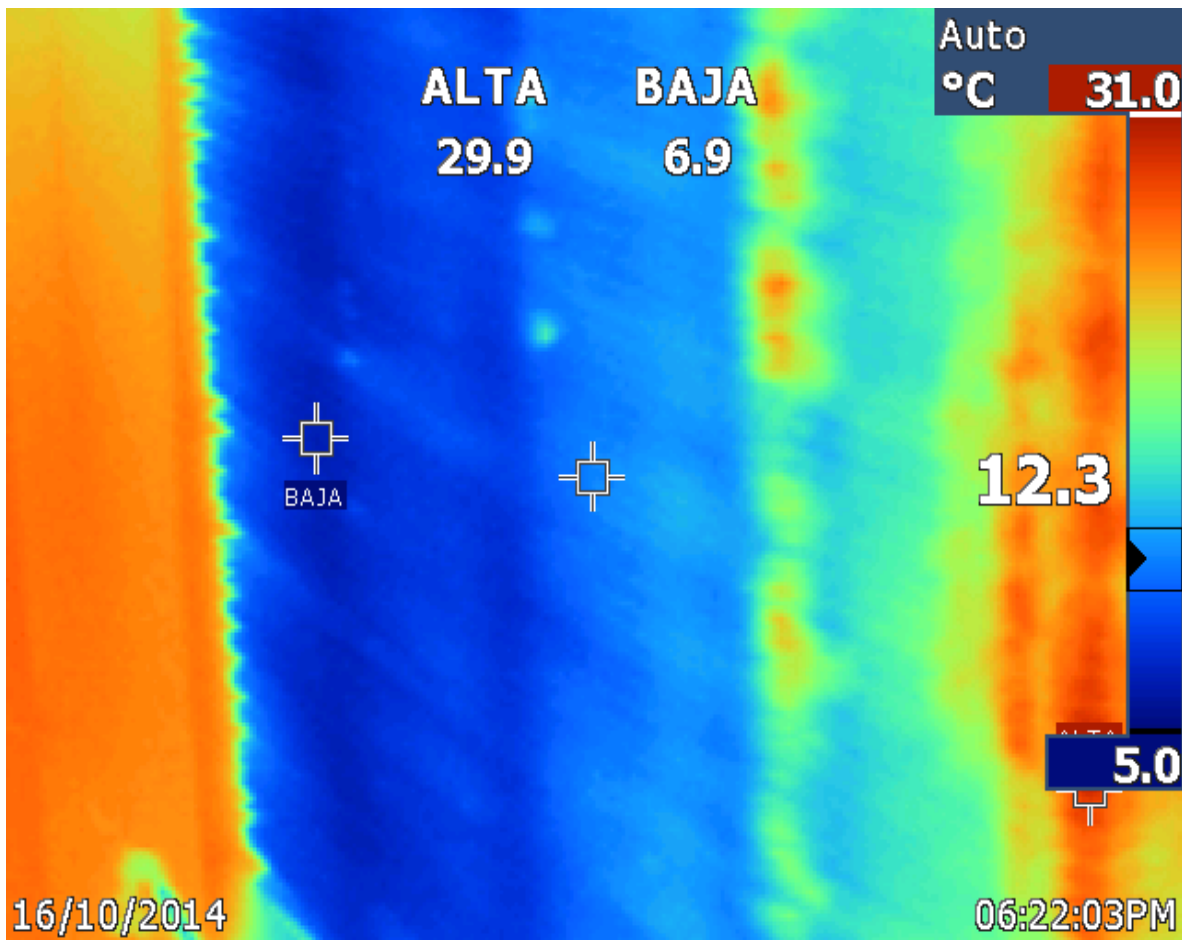


Figura 4 Comportamiento térmico del evaporador

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

En Figura 7 se muestra el comportamiento térmico al interior del equipo en operación, donde el aire frío entregado por el evaporador forma una nube de color azul, y el aire caliente entregado por el condensador forma otra nube de color rojo, la unión de estas dos nubes se conoce como choque térmico, mediante este fenómeno mejora la condensación, bajando la presión de operación en el circuito de refrigeración y disminuyendo el consumo de energía.

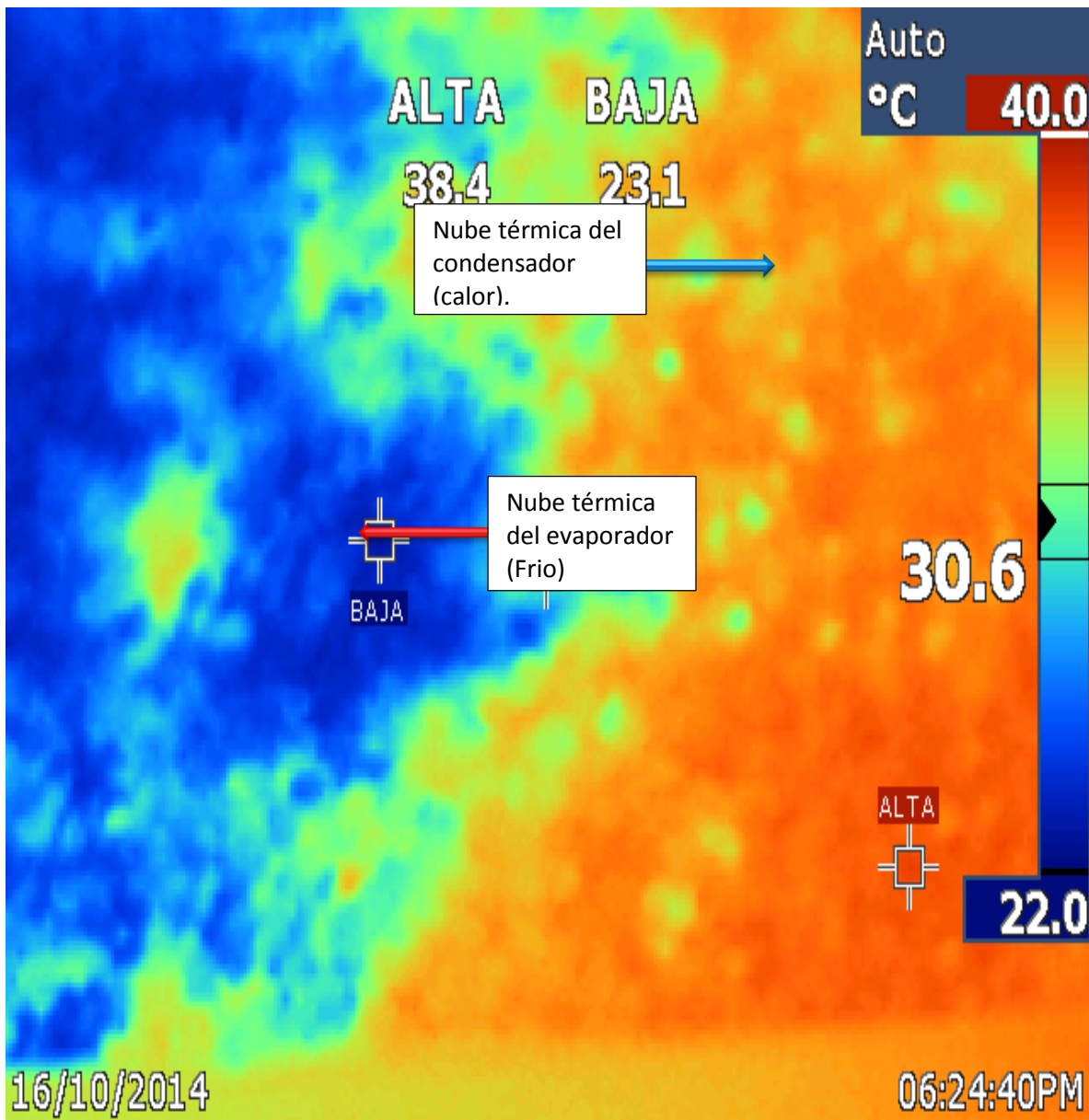


Figura 5 Comportamiento térmico del aire luego de pasar por el evaporador

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

En Figura 8 se observó el comportamiento térmico del condensador en operación, la parte roja se debe a la circulación del refrigerante en el condensador a alta presión, o como vapor sobrecalentado, que viene de la salida del compresor. En el condensador se hace el intercambio de calor, al mismo tiempo cambia de estado al gas refrigerante, el cual pasa de vapor sobrecalentado a líquido a alta presión, para continuar su recorrido hasta el elemento expansivo o capilar, el cual se encarga de bajarle presión y temperatura.

El condensador es el elemento intercambiador de calor que calienta el flujo de aire que se dirige hacia la cámara de secado donde se encuentran las celdas acumuladoras de café el cual requiere una temperatura máxima de 50°C.

En esta prueba se evidenció que la temperatura que alcanza el condensador fue de aproximadamente 50°C, lo cual no genere el suficiente gradiente de temperatura para entregar al flujo de aire que va hacia la cámara de secado.

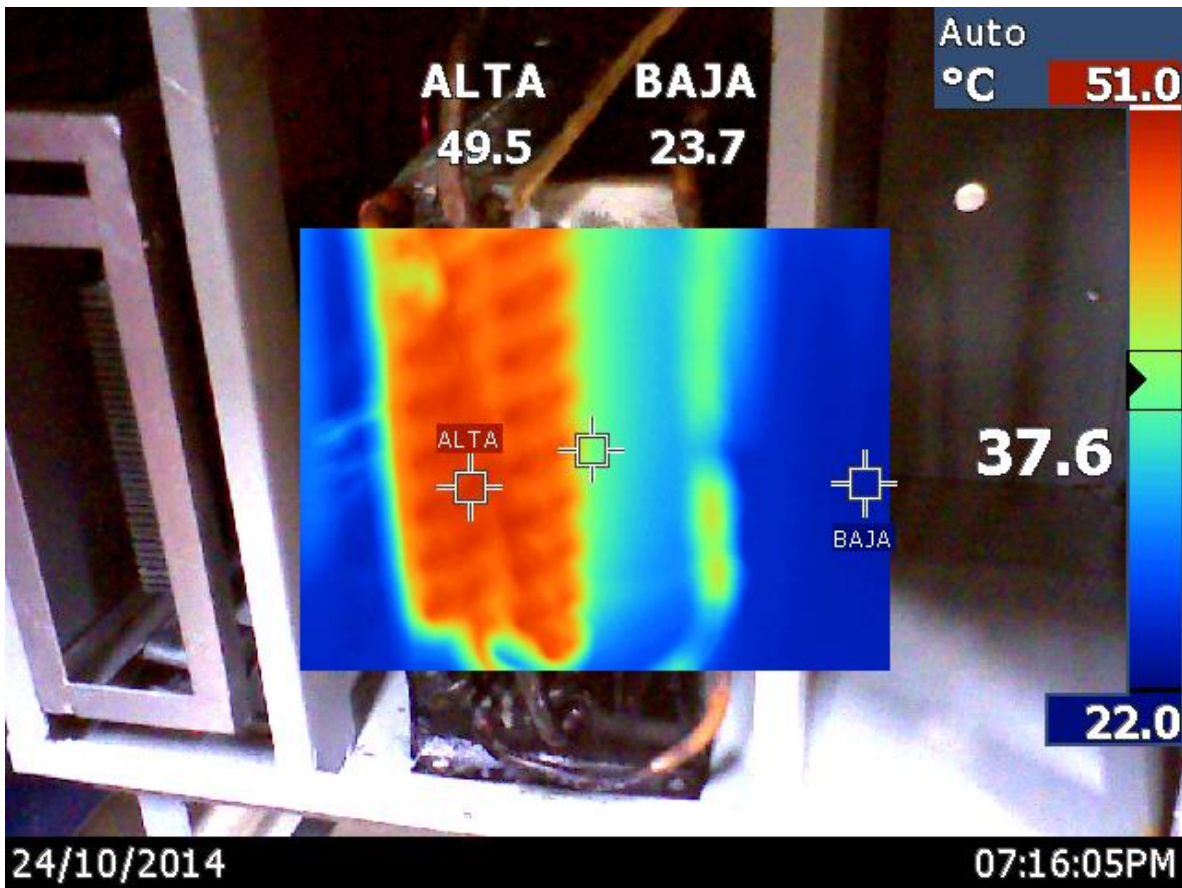


Figura 6 Comportamiento térmico del condensador

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

En la Figura 9 se observa la parte de color azul en el evaporador, donde está mucho más frío y es a causa de la expansión del gas refrigerante que ocurre este fenómeno, presentando un cubrimiento total, esto quiere decir que el evaporador está lleno de R-22 en estado gaseoso logrando retirar mucha más cantidad de calor latente y humedad del aire proveniente de las celdas de café.

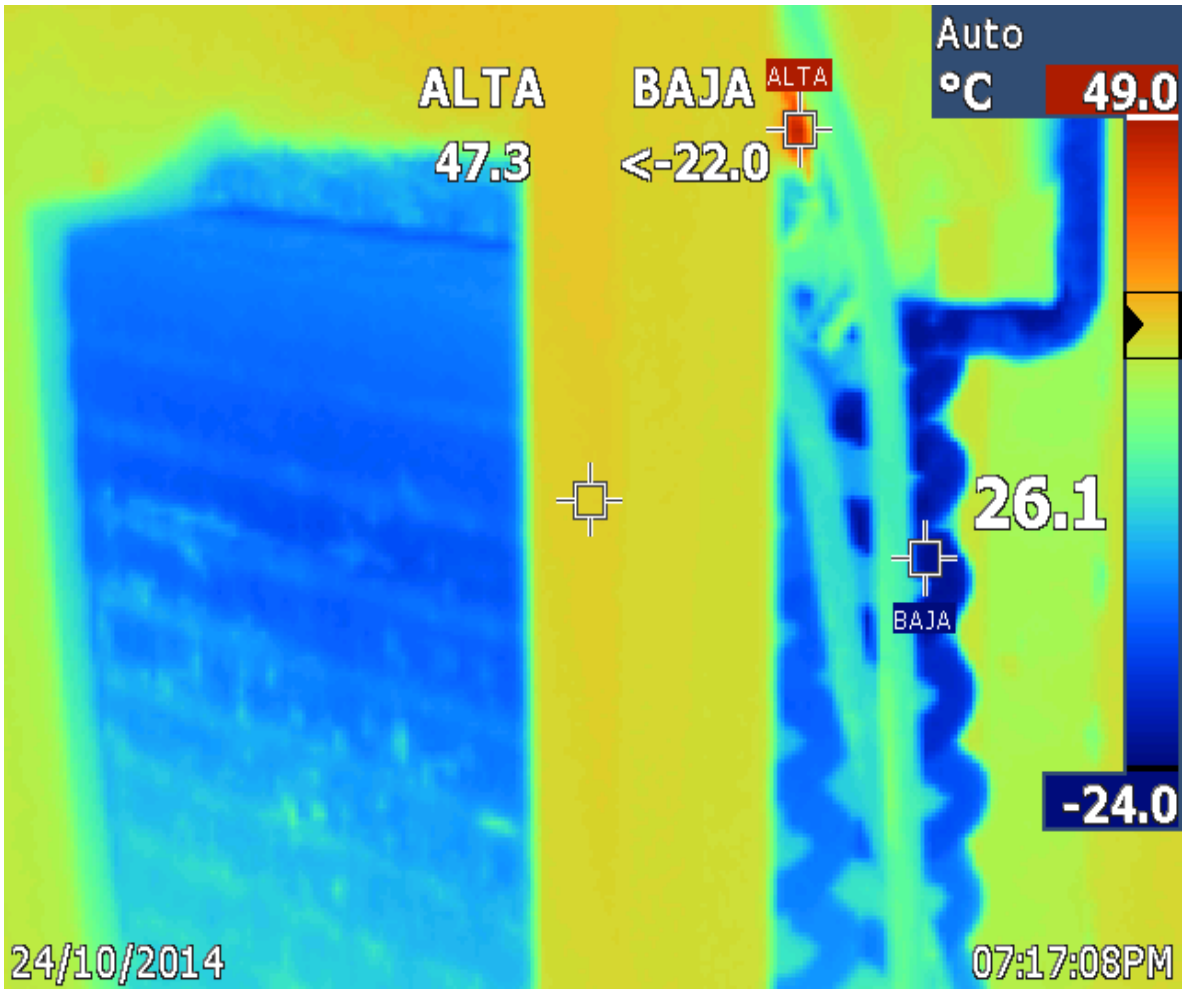


Figura 7 Comportamiento térmico del evaporador

En la tabla 5 se observan los datos con las variables que se tuvieron en cuenta para el inicio de la prueba en laboratorio y el resultado final del agua evaporada, la cual nos ayudará a calcular la eficiencia de la bomba de calor en el proceso de secado.

Tabla 5 Condiciones iniciales y finales de prueba en laboratorio

HR ambiente %	67,6
T_{amb} °C	20,8
Peso en balanza fibra húmeda en gr	379
Peso fibra seca en gr	90
agua evaporada en gr	289

En la Figura 10 se evidencia por medio de una gráfica, el comportamiento de la temperatura del flujo de aire de retorno, el flujo de aire a la salida del condensador y del compresor.

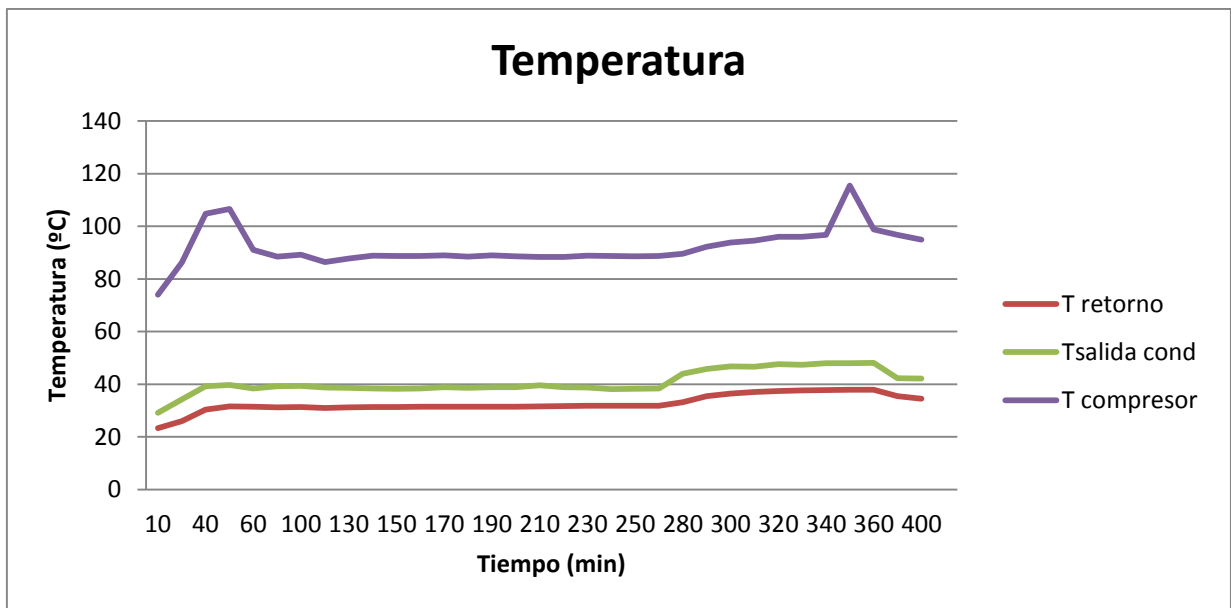


Figura 8 Comportamientos térmicos

En la Figura 10 se puede apreciar que tanto la temperatura de retorno como la de suministro están por debajo de la requerida de 50°C, por lo tanto podemos decir que nuestra prueba no fue exitosa ya que después de transcurridas cuatro horas y diez minutos la temperatura oscilaba entre 39°C y 40°C. Por debajo de la temperatura

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

requerida que es de 50°C. Sin embargo, una temperatura de 40 °C con baja humedad relativa puede ser usada en el secado de café, aunque se espera que el tiempo de secado aumente.

Por otro lado se puede ver también que la única temperatura que subió considerablemente fue la del compresor en operación, lo cual presenta un gran problema para el equipo ya que se corre el riesgo que el compresor deje de operar por protección automática o que sufra un daño irreparable que obligue a reemplazarlo.

En la Figura 11 se muestra el comportamiento de la presión en el circuito de refrigeración cuando el compresor esta en operación.

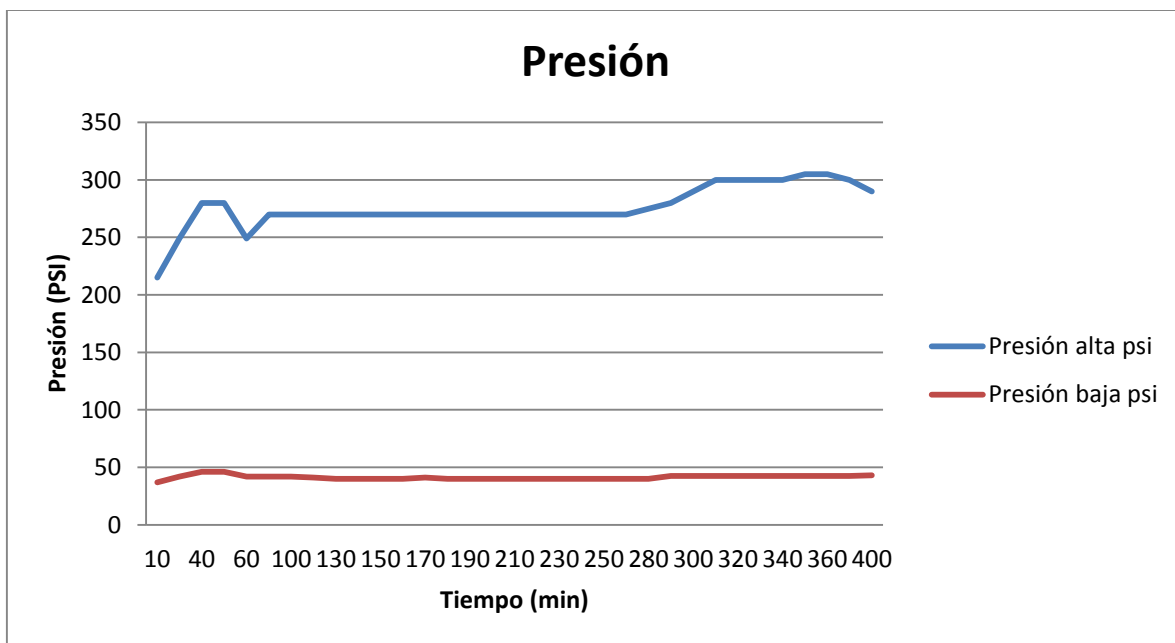


Figura 9 Comportamiento de la presión

Se observa en la Figura 11 que nuestro circuito de refrigeración presenta inconvenientes en su operación ya que las presiones de trabajo están por fuera del rango permitido es decir, se está superando la presión de operación del refrigerante, las cuales oscilan entre 65PSI para la presión de baja, y 250 PSI para la presión de alta.

Podemos decir que con las presiones actuales se corre el riesgo que el compresor sufra daños internos y que se presente congelamiento en las tuberías a su vez afectara el secado del café.

En conclusión no son las condiciones apropiadas para que el compresor tenga un largo tiempo de vida útil.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

En la Figura 12 se muestra el comportamiento de la humedad relativa de retorno y de suministro.

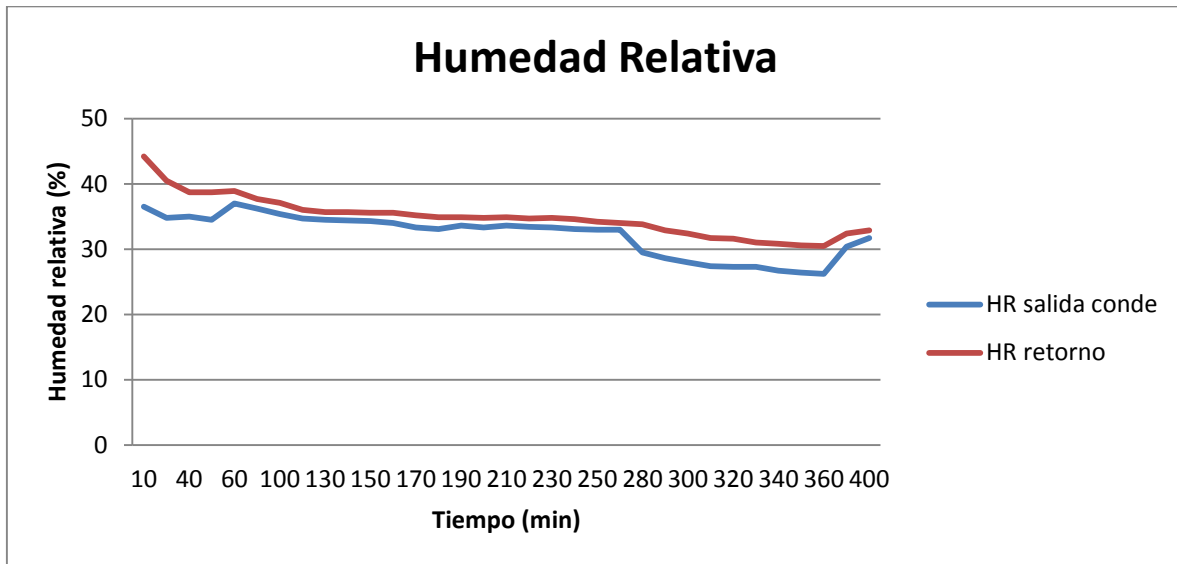


Figura 10 Comportamiento de la humedad

En la Figura 12 se observan aspectos positivos en el comportamiento de la humedad tales como:

- El aire que sale del condensador tuvo una reducción considerable ya que bajo de 45% a 32%.
- La humedad de retorno muestra un comportamiento normal ya que siempre debe ser más alta que la de salida.
- Ambas humedades mantuvieron una tendencia a bajar paulatinamente por la acción de la bomba de calor.

En general la humedad presentó un comportamiento acorde a lo esperado para reducir la humedad de la fibra objeto de nuestra prueba.

En la tabla 6 se observan los resultados obtenidos durante la prueba en el laboratorio en las diferentes etapas de simulación de la carga de café con fibra humedecida y en donde se estuvo monitoreando variables como la temperatura, presión, humedad relativa, voltaje, potencia y corriente.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Tabla 6 Resultados obtenidos de laboratorio

Tiempo min	HR retorno	T retorno (°C)	Tsalida cond (°C)	HR salida conde	Presión alta psi	Presión baja psi	T compresor °C	Voltaje compresor V	Corriente compresor A	Potencia kW
3	75,1	20,8	Se enciende el Compresor							
10	44,2	23,3	29,1	36,5	215	37	74	119,8	7,6	0,68
20	40,5	26	34,2	34,8	249	42	86,3	119	8,1	0,77
40	38,7	30,4	39,2	35	280	46	104,8	118	8,7	0,86
50	38,7	31,6	39,7	34,5	280	46	106,6	118,1	8,7	0,86
60	38,9	31,5	38,4	37	249	42	91	118	8,3	0,81
90	37,7	31,2	39,2	36,2	270	42	88,5	118,2	8,3	0,8
100	37,1	31,3	39,4	35,4	270	42	89,2	118,8	8,3	0,8
108			Se realiza renovacion de aire							
120	36	31	38,8	34,7	270	41	86,4	118,9	8,3	0,79
130	35,7	31,2	38,6	34,5	270	40	87,7	119	8,3	0,8
140	35,7	31,3	38,4	34,4	270	40	88,8	119	8,3	0,8
150	35,6	31,3	38,2	34,3	270	40	88,7	118,8	8,3	0,8
160	35,6	31,4	38,4	34	270	40	88,7	119,1	8,3	0,8
170	35,2	31,4	38,9	33,3	270	41	88,9	119,3	8,3	0,8
180	34,9	31,4	38,6	33,1	270	40	88,5	119,2	8,3	0,8
190	34,9	31,4	38,9	33,6	270	40	88,9	119,1	8,3	0,8
195			Se realiza renovacion de aire durante 15 segundos							
200	34,8	31,5	38,9	33,3	270	40	88,6	119,1	8,3	0,8
210	34,9	31,6	39,6	33,6	270	40	88,3	119	8,3	0,8
220	34,7	31,7	38,9	33,4	270	40	88,4	118,9	8,4	0,8
230	34,8	31,8	38,7	33,3	270	40	88,8	118,5	8,3	0,8
240	34,6	31,8	38,1	33,1	270	40	88,7	118,5	8,3	0,8
250	34,2	31,8	38,3	33	270	40	88,6	118,3	8,3	0,8
260	34	31,8	38,4	33	270	40	88,7	118,2	8,3	0,8
275			Se prenden las resistencias							
280	33,8	33,2	44	29,5	275	40	89,6	116,1	8,7	0,83
290	32,9	35,5	45,8	28,6	280	42,5	92,3	116,5	8,9	0,86
300	32,4	36,4	46,8	28	290	42,5	93,8	115,8	9	0,87
310	31,7	37	46,6	27,4	300	42,5	94,5	115,9	9,1	0,88
320	31,6	37,4	47,6	27,3	300	42,5	96	116,1	9,1	0,89
330	31	37,7	47,4	27,3	300	42,5	96	116,3	9,1	0,89
340	30,8	37,8	48	26,7	300	42,5	96,8	116,4	9,2	0,89
350	30,6	37,9	48	26,4	305	42,5	115,5	116,5	9,2	0,89
355			Se realiza renovacion de aire durante 20 segundos							
360	30,5	37,9	48,1	26,2	305	42,5	98,8	116,6	9,2	0,9
370			Se apaga el Compresor							
390	32,4	35,4	42,3	30,4	300	42,5	96,8	119,4	8,7	0,86
400	32,9	34,5	42,2	31,7	290	43	94,9	119,2	8,7	0,85

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Durante esta prueba se observó que la temperatura del flujo de aire de salida del condensador no alcanza los 50°C por lo cual se le instala una resistencia eléctrica a la salida del condensador, pero esto hace que se aumente la presión de alta y la temperatura en el compresor. Lo cual puede causar daños internos dentro del compresor, por lo cual solo es conveniente prenderla por intervalos de tiempos.

Eficiencia de bomba de calor para esta prueba:

Se calcula la eficiencia de la bomba de calor teniendo en cuenta que peso inicial equivale a el peso de la fibra humedecida antes de iniciar el proceso de secado, peso final equivale a el peso de la fibra después de terminar el proceso de secado, el tiempo es igual a el tiempo total que duro la prueba y potencia es igual a la suma de la potencia del compresor más la potencia del ventilador.

$$n = \frac{\left(\frac{(\text{peso inicial } kg - \text{peso final } kg) * 2500 \frac{kJ}{kg}}{\text{tiempo } s} \right)}{\text{potencia del sistema}}$$

$$\text{Potencia del sistema} = \text{potencia ventilador} + \text{potencia compresor}$$

$$\text{Potencia del sistema} = 746w + 373w$$

$$n = \frac{\left(\frac{(0.379kg - 0.09kg) * 2500 \frac{kJ}{kg}}{24000 s} \right)}{1.119kw}$$

$$n = 0.026$$

El valor de la eficiencia es un valor muy bajo, pero esto se debe a que la prueba no se realizó llenando la totalidad de la cámara de secado, lo que nos indica que no se hizo a plena carga, por tal razón no nos ofreció datos reales de extracción de humedad de la capacidad total de operación del secador mecánico. Ya que el objetivo de la prueba era verificar que el sistema si opere para hacer los respectivos ajustes.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Luego de todo el trabajo anterior se trasladó el equipo hacia una finca ubicada en el municipio de Sabaneta, con la cual la universidad tiene convenio, no se pudo realizar pruebas con café ya que el semestre de estudio se terminó y no se alcanzó a realizar las pruebas a plena carga. Para instalar el equipo en la finca se tuvo en cuenta desde el laboratorio su operación y el control de las variables para que el secador de café estuviera en buenas condiciones de operación, listo para operarse y para secar el café.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

5 CONCLUSIONES

- La eficiencia entregada por el equipo en la prueba de laboratorio no es buena ya que no se hizo a plena carga para identificar cual era la capacidad de extracción de humedad total y no se tuvo en cuenta en que momento la carga de fibra húmeda usada en las pruebas llegó al porcentaje de humedad requerido, solo se tuvo en cuenta para probar que el sistema si opere, para hacer ajustes.
- La temperatura entregada por la bomba de calor en el flujo de aire de salida del condensador fue de 39.7°C el cual nos permite un secado de café pero con tiempos de secado mayores.
- La instalación de la resistencia eléctrica a la salida del flujo de aire del condensador para aumentar la temperatura provoca que la presión de alta del compresor aumente, saliéndose de los rangos normales de operación del compresor. Esto podría corregirse, si en el momento de encender la resistencia para adicionar temperatura al sistema, también aumentamos las revoluciones del motor del blower, para generar mayor flujo de aire a través del condensador y así bajará la presión de condensación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

6 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Mejorar el sistema de ventilación, ya que se evidencia que el equipo no está realizando una buena evaporación y condensación del refrigerante, lo cual conlleva a que se eleve la temperatura y la presión en el compresor.
- Se debe optimizar las posiciones de los sensores de temperatura y peso porque se descalibran fácilmente, ya sea por vibración del equipo en operación o en el traslado hacia el lugar de trabajo.
- Se debe mejorar el sistema, cambiando el tipo de refrigerante, ya que este refrigerante está próximo a salir del mercado y será reemplazado por otros más ecológicos, se recomienda usar el R-407-C o el R-410A, ya que pertenecen a una familia de refrigerantes llamada HFC, estos presentan las siguientes bondades:
 - Los HFC, no contienen cloro, no es inflamable ni tóxico. No destruye la capa de ozono si accidentalmente se libera a la atmósfera.
 - La eficiencia frigorífica de los HFC, es igual o superior que la de los HCFC.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

REFERENCIAS

bedri café. (22 de 11 de 2014). Obtenido de http://www.bedri.es/Comer_y_beber/Cafe/El_cafe_en_el_mundo.htm.

Abdala Rodriguez, J. L., Fonseca Fonseca, S., Pantoja Enriquez, J., & Gen Torres, A. (2003). Secado de café pergamino en secadores solares multipropósito y de tambor rotativo. *Tecnología química Vol XXIII*, 68 - 79.

AirScape. (2015). *AirScape Engineer's Blog*. Recuperado el 15 de 7 de 2015, de <http://blog.airscapefans.com/archives/if-you-are-considering-a-heat-pump>

ANÓNIMO. (2006). *Uso de las Bombas de Calor de alta temperatura como alternativa para el uso racional de la energía*. Medellín: 28-45.

asociacion nacional del café Guatemala. (15 de ABRIL de 1995). ANACAFE. Obtenido de Asociacion Nacional del Café Guatemala: http://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=BeneficiadoHumedo_Secamiento#Secamiento_mecánico

bedri café. (2014). *la pagina debedri café*. Recuperado el 15 de 7 de 2015, de http://www.bedri.es/Comer_y_beber/Cafe/El_cafe_en_el_mundo.htm

Cadena Gómez, G. (1998). Ciencia y Tecnología Cafetera Colombiana. En F. T. Gabriel Cadena Gómez, *Ciencia y Tecnología Cafetera Colombiana*. (págs. 0-39). Bogotá.: Federacion Nacional de Cafetros.

Café de Colombia. (2014). Secado del café, otra de las claves para que el Café de Colombia sea de alta calidad. *detrás del café de colombia*, edicion No 5.

café de colombia. (2 de 07 de 1995). www.cafedecolombia.com. Obtenido de [www.cafedecolombia.com](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/una_bonita_historia/): http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/una_bonita_historia/

Cenicafé. (2014). *Beneficio del café II secado del café pergamino*. Recuperado el 04 de 11 de 2014, de http://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf

centro de comercio internacional. (25 de 11 de 2014). *la guía del café*. Obtenido de grado de humedad y secado: <http://www.laguiadelcafe.org/guia-del-cafe/calidad-del-cafe/Grado-de-humedad-y-secado/>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Clavijo, E. (27 de 11 de 2013). *La Republica*. Recuperado el 15 de 7 de 2015, de <http://www.larepublica.co/economia/en-2014-la-crisis-del-sector-cafetero-entrar%C3%A1-en-su-sexto-a%C3%B1o-y-su-soluci%C3%B3n-se-complica>

Colombia, C. d. (junio 2012). Secado del café, otra de las claves para que el Café de Colombia sea de alta calidad. *detrás del café de colombia* , edición No 5.

Colombia, F. N. (22 de 11 de 2014). *Producción de café de Colombia* . Obtenido de http://www.federaciondefaeteros.org/clientes/es/sala_de_prensa/detalle/produccion_d_e_cafe_de_colombia_crecio_28_por_ciento_en_primer_trimestre_de/

FAO. (2014). SECADO DE LOS GRANOS. *Manual de manejo poscosecha de granos anivel rural.*, 4-8.

FAO.ORG. (05 de 06 de 2000). *WWW.FAO.ORG*. Obtenido de WWW.FAO.ORG: <http://www.fao.org>

Federacion Colombiana de Cafeteros. (7 de julio de 2010). *defectos café verde*. Recuperado el 14 de 09 de 2014, de Cafe de Colombia.com: http://www.cafedecolombia.com/clientes/es/regulacion_nacional/exportadores/2831_calidades_de_exportacion/

Federación Nacional de cafeteros. (25 de 06 de 1995). *cafe de colombia .com*. Obtenido de cafedecolombia.com: <http://cafedecolombia.com>

Federacion Nacional de cafeteros de Colombia. (22 de 11 de 2014). *Producción de café de Colombia*. Obtenido de http://www.federaciondefaeteros.org/clientes/es/sala_de_prensa/detalle/produccion_d_e_cafe_de_colombia_crecio_28_por_ciento_en_primer_trimestre_de/

Gutierrez, J. F. (2009). *Hacia la Mejora del Secado Mecánico del Cafe en Colombia*. Medellín.

Hernandez, M. P. (1993). *La bomba de calor*. Madrid (España): McGraw-Hill.

Lopez Valencia, L., Oliveros, C., Cardenas Buitrago , C. M., & Moreno, E. L. (2010). Determinacion del contenido de humedad del cafe durante el secado en los silos. *cenicafe*, 110.

Martínez, A. C. (1993). Factores que influyen en la cafeticultura mundial. *Revista Vinculando.*, 10-113.

Oliveros. (2007). Separador hidráulico de tolva y tornillo sin fin. *Cenicafé*, Avance Técnico No.360.

Oliveros, C. E., Ramirez, C. A., Sanz, J. R., & Peuela, A. E. (2006). Secdor solar tunel para café pergamino. *cenicafé*, No 353 .

Oliveros, C. E., Sanz Uribe, J. R., Ramirez Gomez, C., & Peñuela, A. E. (2009). Aprovechamiento eficiente de la energia en el secado mecanico del café. *Avances técnicos Cenicafé*.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Otto, M. B. (1991). *El café y sus relaciones con la economía nacional*. Bogota.: Educar Cultural y Recreativa.

Quintero, G. I. (2008). Riesgo para la calidad y la inocuidad del café en el secado. *avances técnicos cenicafé*.

Rey, F. J. (2005). *Bombas de Calor y energías Renovables en Edificios*. Thomson.

Usaid. (29 de 08 de 2005). Recuperado el 15 de 07 de 2015, de http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnadg946.pdf

Villegas, L. Q. (2008). CAFES DE COLOMBIA. En Q. A. Liliana Villegas, *Cafes de Colombia* (págs. 6-68). Bogota: Villegas editores.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

FIRMA ESTUDIANTES Luciani Giovanni Angel Juan Pablo Alzate 611 CC 70327 552 C.C. 98.666.197.

FIRMA ASESOR Yennifer Bernardo Herrera Múnera C.C. 98.703.974

FECHA ENTREGA: 04-08-2013.

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

FIRMA ESTUDIANTES _____

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____