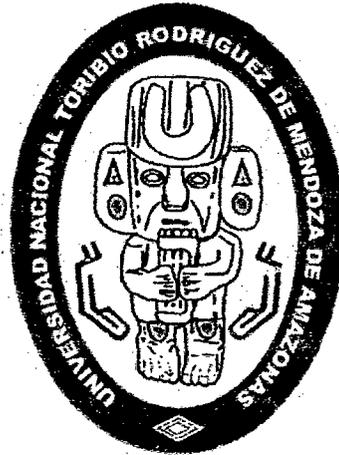


**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE  
AMAZONAS  
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL**



**TITULO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
SECADOR MIXTO CON FLUJO DE AIRE CALENTADO POR  
ENERGIA SOLAR PARA INCREMENTAR LA CALIDAD  
DEL GRANO DE CAFÉ (*Coffea arabica*)**

**TESIS**

**Para obtener el Título Profesional de  
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**AUTOR: Br. WALTER EMILSER GONZALES BRINGAS**

**ASESOR: Ms.C. MIGUEL ANGEL BARRENA GURBILLÓN**

**CHACHAPOYAS - AMAZONAS 2008**

## DEDICATORIA

*A la memoria de mi querida Madre Margot Bringas, mis abuelos Carmen, Teodoro y Alberto, mis tías Nelly, Sebastiana y Juana; de quienes aprendí los valores en la vida y que desde el altísimo guían siempre mis pasos.*

*A mi Abuela Telma, mi padre Walter y mis tíos Ilda y Juan por haberme brindado su apoyo en lo económico y moral durante mi formación profesional y por que me debo a ustedes, que hicieron que lograra realizar una de mis más grandes metas en la vida, culminar mis estudios universitarios.*

*A mis tíos Zully, Alberto, Zaida y Carlos y a cada uno de las personas que conforman la familia Bringas Aguilar.*

*A mis tíos Marleny, Mercedes, Marco, Jaime y Edith y a cada una de las personas que conforman la familia Gonzales Castro.*

**WALTER EMILSER.**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, un padre amoroso, gracias por sus múltiples bendiciones.

A mi familia por el apoyo que siempre me han brindado desinteresadamente para cumplir mis metas

A la familia Calderón Chávez en el distrito de Omia, por abrirme las puertas de su casa, brindarme su tiempo, su inmenso apoyo, sus experiencias, su confianza y su café!!! lo que me ha servido para concretar esta investigación.

Al Ing. **Ms.C. Miguel Ángel Barrena Gurbillón**, por su asesoría y valioso apoyo en la fase de estudios, elaboración de la propuesta de tesis y elaboración del informe de tesis.

Al Ing. **Rafael Espinoza Paredes** Director del Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería, quién me brindó el apoyo moral, técnico y logístico necesario para el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. **Sandro Aquino Yariñango**, jefe de control de calidad de CEPICAFE y a **Eber Tocto Bermeo**, encargado del control de calidad de la Cooperativa “La Prosperidad de Chirinos” por sus valiosas enseñanzas y su colaboración en el desarrollo de la presente investigación.

Al personal técnico, administrativo y trabajadores de la Ex-CECOOAC-NOR (Central de Cooperativas Agrarias Cafetaleras Nor Oriente Ltda.) por abrirme las puertas de su empresa, brindarme sus conocimientos, su apoyo e incentivar me para la realización de esta investigación.

A mis compañeros, Docentes y amigos(as) de la UNAT-A que alguna vez compartieron conmigo un salón de clase, quienes me apoyaron de alguna u otra forma. De manera muy especial a **Arly, Eider** y a los muchachos de la primera promoción de la UNAT-A.

Mil gracias a todos, que el Señor esté con ustedes y sus familias.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA  
DE AMAZONAS**

**Dr. Manuel Alejandro Borja Alcalde  
Presidente de la Comisión Organizadora**

**Dr. Víctor Hugo Chanduví Cornejo  
Vicepresidente Académico de la Comisión Organizadora**

**Dr. Federico Raúl Sánchez Merino  
Vicepresidente Administrativo de la Comisión Organizadora**

**Ms.C. Miguel Ángel Barrena Gurbillón  
Responsable de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial**

**Chachapoyas, Junio de 2008**

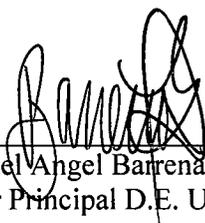
## VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS

El Docente de la UNAT-A que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR MIXTO CON FLUJO DE AIRE CALENTADO POR ENERGIA SOLAR PARA INCREMENTAR LA CALIDAD DEL GRANO DE CAFÉ (*Coffea arabica*)”** del egresado de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNAT-A.

Br. Walter Emilser Gonzales Bringas

El Docente de la UNAT-A que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión del Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones dadas por el Jurado Evaluador, para su posterior sustentación.

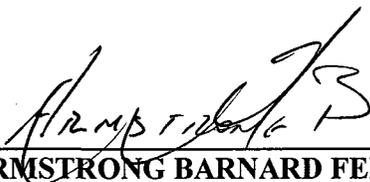
Chachapoyas, 09 de Junio de 2008



---

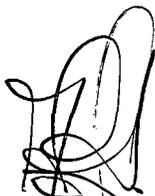
Ms.C. Miguel Angel Barrera Gurbillón  
Profesor Principal D.E. UNAT-A

**JURADO EVALUADOR**



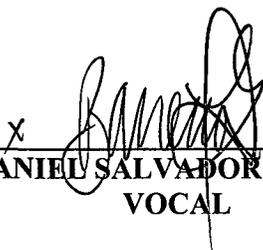
---

**Ms.C. ARMSTRONG BARNARD FERNANDEZ JERI  
PRESIDENTE**



---

**ING. ERICK ALDO AUQUÍNVIN SILVA  
SECRETARIO**



---

**ING. DANIEL SALVADOR RODRÍGUEZ  
VOCAL**

## TABLA DE CONTENIDOS

	<u>Pág.</u>
<b>DEDICATORIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	ii
<b>AUTORIDADES DE LA UNAT-A</b> .....	iii
<b>VºBº DEL ASESOR</b> .....	iv
<b>JURADO EVALUADOR</b> .....	v
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	vi
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	ix
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	x
<b>INDICE DE FOTOGRAMAS</b> .....	xii
<b>RESUMEN</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	9
2.1. Material biológico.....	9
2.2. Prototipo de secador solar.....	10
2.2.1. Descripción de las componentes del prototipo de secador solar.....	10
a) Colector solar de placa plana.....	10
b) Cámara de secado.....	12
c) Ventilador.....	13
d) Sistema de recirculación del aire.....	13
2.2.2. Cálculo, diseño y planificación del prototipo de secador solar.....	14
2.2.3. Evaluación del potencial de radiación solar.....	15
2.2.4. Demanda de secado de café a satisfacer.....	15

2.2.5. Determinación de humedad inicial del café y cantidad de agua a eliminar en el secado.....	16
2.3. Diseño, instalación y ensayo del prototipo de secador solar de café.....	17
2.3.1. Lugar de instalación.....	18
2.3.2. Periodo de operación durante el año.....	18
2.3.3. Circulación del aire.....	18
2.4. Valores representativos de los parámetros meteorológicos.....	18
2.5. Selección del prototipo de secador solar y su capacidad.....	18
2.6. Diseño del colector solar.....	19
2.7. Recomendaciones para el diseño de calentadores solares.....	30
2.8. Diseño de la cámara de secado.....	40
2.9. Diseño del ventilador.....	42
2.9.1 Criterios para la selección de los ventiladores.....	42
2.10. Control de calidad del café.....	44
2.10.1 Definición.....	44
2.10.2 Catación.....	44
2.10.3 Características físicas del grano de café.....	45
2.10.4 Características organolépticas más relevantes .....	45
2.10.5 Características relevantes en el acopio del café.....	45
2.11. Instalación del secador solar prototipo de 120 kg de capacidad.....	48
2.12. Ensayo en el secador solar prototipo de café.....	49
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
3.1. Determinación del contenido de humedad del café.....	50
3.2. Determinación del flujo másico de aire.....	51
3.3. Evaluación financiera del uso del secador solar prototipo de café.....	61

3.3.1. Cálculo de gastos del secador solar prototipo de café.....	61
3.3.2. Cálculo de la anualidad de gastos del secador solar prototipo.....	63
<b>IV. DISCUSIÓN.....</b>	<b>69</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>72</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>75</b>
Planos.....	82
<b>APÉNDICE.....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Composición química del grano de café (100 g). .....	4
Tabla 2: Propiedades de diversos materiales usados como cubiertas transparentes en las aplicaciones de energía solar.....	34
Tabla 3: Propiedades físicas de diversos materiales usados como cubiertas transparentes en las aplicaciones de energía solar.....	35
Tabla 4: Propiedades y costos de algunas cubiertas transparente.....	37
Tabla 5: Materiales para aislamiento y sus propiedades.....	39
Tabla 6: Absortividad de algunos materiales y recubrimientos.....	40
Tabla 7: Reflectancia y emitancia promedio de algunos materiales.....	40
Tabla 8: Determinación de la humedad inicial del café lavado.....	50
Tabla 9: Determinación del agua extraída en estufa.....	50
Tabla 10: Datos experimentales del ensayo del secado de café en secador solar prototipo. Medición, 1-13 del día 1, medición 14-31 del día 2, medición 32-45 del día 3.....	53
Tabla 11: Datos del ensayo del secado de café en el secador solar prototipo. Medición, 1-13 del día 1, medición 14-31 del día 2, medición del día 3.....	55
Tabla 12: Costo de construcción del secador solar prototipo de café.....	61
Tabla 13: Costos corrientes del secador solar prototipo de café por año.....	63
Tabla 14: Comparación de ingresos entre caficultores en base al tipo de secado que emplean.....	65
Tabla 15: Resultados de análisis físico y sensorial de la muestra de Café secado el secador solar prototipo de café.....	66
Tabla 16: Factor de recuperación.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1: Flujograma del beneficio húmedo del café.....	9
Figura 2: Diagrama del procedimiento a seguir para el cálculo, diseño y planificación del prototipo de secador solar.....	14
Figura 3: Colector solar.....	20
Figura 4: Tipos de calentadores solares para aire.....	21
Figura 5: Diagrama de flujo para el cálculo del área del colector solar.....	25
Figura 6: Emisividades de tres tipos de sección transversal de colectores solares.....	28
Figura 6: Diagrama para calcular el área de la bandeja de producto.....	41
Figura 7: Cámara de secado.....	42
Figura 8: Método para obtener una muestra de café homogénea.....	47
Figura 9: Determinación de humedad con el diagrama psicrométrico.....	51
Figura 10: Perfil de temperaturas del secador solar prototipo de café.....	54
Figura 11: Variación del peso con respecto al tiempo en el secador solar prototipo de café.....	55
Figura 12: Variación de la humedad con respecto al tiempo total del secado en el secador prototipo de café.....	57
Figura 13: Variación de la humedad con respecto al tiempo el día 1.....	58
Figura 14: Variación de la humedad con respecto al tiempo el día 2.....	58
Figura 15: Variación de la humedad con respecto al tiempo el día 3.....	58
Figura 16: Pérdida de humedad en la unidad de tiempo vs. humedad promedio.....	59
Figura 17: Pérdida de humedad en la unidad de tiempo vs. humedad promedio el día 1.....	60
Figura 18: Pérdida de humedad en la unidad de tiempo vs. humedad promedio el día 2.....	60

Figura 19: Pérdida de humedad en la unidad de tiempo vs. humedad promedio el día 3.....	60
Figura 20: Sección transversal de del colector solar .....	85
Figura 21: Disposición del secador solar prototipo de .....	91
Figura 22: Coeficiente de pérdida en accesorios de sistemas de ductos .....	99

## ÍNDICE DE FOTOGRAMAS

---

	<b>Pág.</b>
Fotograma 1: Análisis de humedad inicial y agua a evaporar en el laboratorio.....	76
Fotograma 2: Secuencia de la construcción de la cámara de secado.....	77
Fotograma 3: Secuencia de la construcción de la colector solar.....	78
Fotograma 4: Componentes auxiliares del prototipo secador solar.....	79
Fotograma 5: Detalles de la construcción del prototipo de secador solar terminado.....	80

## RESUMEN

El interés principal del presente trabajo de investigación fue diseñar, construir y operar un prototipo de secador solar para café pergamino, con el objetivo de evitar el deterioro del grano por un mal secado y conservar su calidad. Este equipo se diseñó teniendo en cuenta las condiciones climáticas, los requerimientos de los agricultores en el distrito de Omia (Amazonas), lugar que posee una intensa radiación solar durante la mayor parte del año, siendo además una zona que requiere de tecnología asequible para secar adecuadamente el café, con lo que se logrará mejorar los ingresos de los caficultores. Los materiales de construcción fueron listones de madera, manta de polietileno de baja densidad anti-UV, calaminas, malla y tekpor son de fácil adquisición en la zona.

El equipo se diseñó para una operación batch con una capacidad de 120 kg de café recién beneficiado, el café con una humedad aproximada del 50 % en base húmeda (bh) fue secado en 21 horas de sol o 3 días reduciéndose su humedad a 12 %(bh) aproximadamente, humedad comercial para el café, empleándose aire calentado en un colector solar a una temperatura promedio entre 36 y 52.5 °C dependiendo de las condiciones climáticas y una velocidad de aire de 2.5 m/s. El secador solar prototipo operó durante 8 h/día. El café secado en este equipo fue analizado en un laboratorio especializado, no presentando los defectos usualmente causados por un mal secado, tanto en lo físico como en lo sensorial como son: cristalizado, blanqueado, veteado, etc., además no se detecto sabores moho, tierra, restos animales, obteniéndose un café pergamino de buena calidad, que tendrá un mejor precio en el mercado destinado a la exportación. El costo del equipo es rápidamente recuperado puesto que se incrementa las utilidades por la calidad del grano seco obtenido y por la reducción de mermas en el proceso de secado.

## ABSTRACT

The interest of this investigation was working desing, built and operate a prototype solar dryer for parchment coffee in order to avoid the deterioration of grain by evil drying and preserving its quality. This equipment was desing taking into account the weather conditions and requirements of farmers in the district of Omia (Amazon), that place has an intense solar radiation during most of the year , is also an area that requires affordable technology to dry properly coffee with what was archieved improve the incomes of farmers. The building materials were wooden slats , polietilene blanket of low density anti-UV , calamina, mesh and teknopor that are easy adquisition in the area. The equipment was designed for an operation batch with a capacity of 120 kg of coffee recently benefited, with a humidity of about 50% based moist (bh) was drying during 21 hours of the sun or 3 days reduced their humidity to 12% (bh) about commercial moisture for coffee, using air heat in a solar collector to and average temperature between 36 an 52,5 °C depending on weather conditions and at a speed of air 2,5 m/s. The prototype solar dryer operated during 8h/day. The dried coffee in this team was analised at a laboratory specialist, presented no defects usually caused by a bad drying, both in physical as well as sensory as are cristallized, bleaching, marbling, etc., adition not detect flavours midew, dirt, animals remains, obtaining a coffee parchment quality , which will have a better market price for export. The cost of equipement is quitcky recovered as it increases profits for the quality of grain and dry obtained by reducing lossed in the drying process.

## I. INTRODUCCIÓN

El vocablo café deriva del árabe “kahwah” (cauá), llegando a nosotros a través del vocablo turco “kahweh” (cavé). Se trata de un arbusto siempre verde originario de Etiopía. Una versión dice que el cafeto o café fue descubierto casualmente por un pastor al ver que sus cabras, que habían comido el fruto de esta planta, se ponían nerviosas e intranquilas. Otra versión, en cambio, afirma que el café lo descubrieron unos monjes que lo utilizaban para proporcionarse insomnio en sus horas de oración nocturna.

El café, ha sido por mucho tiempo una de las bebidas mas importantes en el mundo, siendo rivalizado solo por el té, la cocoa y el mate. Se conocen unas 25 a 40 especies en Asia y África Tropical.

El grano de café tiene forma plano – convexa, constituido en su mayor parte por el endospermo de color blanco y muy pequeño. La semilla de café, de los cultivares mas usados en la producción comercial, tiene las siguientes dimensiones: 9 a 18 mm de largo, 6 a 10 mm de ancho y de 4 a 8 mm de grosor.

El fruto del café está compuesto por la pulpa, miel o mucílago, pergamino, película plateada y grano. Cada fruto posee dos semillas opuestas y su tamaño depende de la variedad. En el fruto se distingue el epicarpio constituido por una sola capa de células de paredes finas. El mesocarpio que es una sección parenquimatososa rica en azúcares, taninos y sustancias colorantes. El endocarpio o pergamino que es una cubierta de consistencia cariácea.

El café tiene la siguiente clasificación botánica:

**Nombre científico :** *Coffea arabica*

**Nombre común :** café

**Otros idiomas**

Coffee (Inglés)

Café (Francés)

Kaffee (Alemán)

Café (Italiano)

**Sistemática:**

**Reino:** Vegetal

**Clase:** Angiospermae

**Subclase:** Dicotyledoneae

**Orden:** Rubiales

**Familia:** Rubiaceae

**Género:** *Coffea*

**Especie:** *Arabica* L.

El género *Coffea* incluye unas 80 especies, no obstante únicamente se citan cuatro en cultivo comercial, con marcado énfasis en las dos primeras según el siguiente orden: *Coffea arábica*, *C. canephora*, *C. libérica* y *C. excelsa*. La especie *C. arábica* se cultiva en un 85% de los países caficultores, ya sea como una especie única o junto a las otras comercialmente importantes (Columbus y Pulgarín, 2002).

El cultivar *Typica* de café arábico, fue el primero en ser introducido al continente americano y actualmente ocupa buena extensión en el Perú, es originario de Etiopía. Este cultivar dado su alto grado de autofertilización y el proceso que hacen los caficultores de eliminación de aquellas plantas fuera de tipo, ha permitido lograr buena uniformidad de los cafetales. La planta alcanza hasta cuatro metros de altura, en crecimiento libre, el tallo por lo general consta de un solo eje vertical, aunque es frecuente observar la presencia de ejes verticales secundarios que surgen de los nudos; las ramas laterales son abundantes. Los frutos a la madurez adquieren el color rojo vinoso y se desprenden de la planta con facilidad. Algunos mutantes del cultivar presentan frutos que a la madurez adquieren el color amarillo. Entre las características favorables de esta variedad se encuentran su tamaño relativamente grande de grano y superior calidad de bebida, rusticidad de planta en condiciones adversas de baja fertilidad y sequía de los suelos; así mismo la mayor resistencia de sus ramas durante la operación de cosecha (Columbus y Pulgarín, 2002).

El cultivar *Bourbon* de café arábico es originario de la isla de Bourbon, tiene como característica el color verde de las nuevas hojas que emergen de los ápices de los tallos y ramas laterales, también se caracteriza por su regularidad en generar nuevos crecimientos vegetativos de los que resultan cosechas relativamente sostenidas aunque con tamaño de grano pequeño en comparación con el café *Typica*. A su vez presenta una precocidad mas marcada en relación a *Typica*. Los frutos a la madurez en un caso adquieren el color rojo vinoso y en otro el color amarillo (Columbus y Pulgarín, 2002).

El cultivar *Caturra* es un mutante del Bourbón propagado en Brasil, presenta entrenudos cortos lo que resulta en porte bajo de la planta, tronco grueso, ramas laterales abundantes, con numerosas ramificaciones secundarias, lo que le da a la planta un aspecto vigoroso y compacto (Columbus y Pulgarín, 2002).

El cultivar *Catimor* se origina del cruzamiento de *Caturra* rojo con el híbrido *Timor*, se caracteriza por un porte bajo de planta, tronco de grosor intermedio, un considerable número de ramas laterales, formando una copa medianamente vigorosa y compacta. Además de su relativa alta productividad muestra un comportamiento favorable con respecto a la enfermedad de la roya, por lo menos al hongo *Hemileia vastatrix* (Columbus y Pulgarín, 2002).

Tabla 1: Composición química del grano de café (100 g).

Componente	Peso (g)	Otros componentes	Peso (mg)
Agua	20.0	Calcio	150.0
Proteínas	15.0	Fósforo	200.0
Grasas	10.0	Hierro	5.00
Carbohidratos	7.0	Tiamina	0.07
Fibra	22.0	Riboflavina	0.10
Cenizas	27.0	Niacina	15.00
		Calorías	38.00

El secado en el proceso del café es un momento crítico; de él depende enormemente la calidad y la venta de este producto. A pesar que el café ha sido cultivado desde hace décadas, las tecnologías para su secado son limitadas. Podemos encontrar en nuestra región mas de una forma de secar el café que van desde el secador de madera, haciendo humo y colocando el café encima de tablas; en el piso sobre un petate, un costal o una lona; sobre tablas; en los altillos de las casas, en horno con leña. Pero sin embargo, la común entre los pequeños productores es el secado en patio de cemento directamente en contacto con el piso y sobre mantas de polietileno expuestas al sol, a la intemperie métodos que sin duda alguna provocan daños en la calidad del café. (Álvarez y cols., 1978).

El secado al aire libre, donde los productos se exponen directamente al sol colocándolos sobre el suelo, es uno de los usos más antiguos y es aun el proceso mas utilizado en los países iberoamericanos. Este procedimiento es de muy bajo costo pero produce fuertes mermas ocasionadas por los cambios meteorológicos, el ataque de insectos y animales. Por otro lado, la calidad del producto se ve disminuida, especialmente los que tienen que ver con los aspectos bromatológicos, produciéndose contaminación con restos de animales, polvo y hongos (Berrueta y cols., 2003).

En las regiones industrializadas, el bajo costo de los combustibles y el incremento de los salarios permitió desde hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial en gran escala basados en el uso de combustibles.

En los últimos años, la escasez, y mayores precios de los combustibles, ha despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de la energía solar, tratando de desarrollar técnicas que permitan solucionar los problemas mencionados en relación con el secado al aire libre.

Iberoamérica no ha escapado a esta evolución y a partir de la década del setenta se han llevado a cabo trabajos de investigación y desarrollo en muchos países, generalmente en relación con universidades y centros de investigación. Aunque no se ha logrado una aplicación masiva del secador solar, se han desarrollado en diversos lugares una amplia gama de secadores solares cuyo uso en la región tiene características promisorias. Estos sistemas no requieren alta tecnología para su uso y se puede adaptar a distintos niveles de desarrollo de la región. La tecnología es utilizada en forma descentralizada, la fuente de energía es renovable, y no tiene efectos nocivos sobre el medio ambiente, son todos argumentos que apuntan en la buena dirección para lograr un desarrollo rural armónico (Corvalan y cols., 1992).

El propósito de esta tesis fue diseñar y construir un prototipo de secador de café que utilice la energía solar como medio de calefacción, con el fin de presentar una alternativa a los agudos problemas energéticos con los que nos enfrentamos hoy en día a nivel mundial. Aunque si bien es cierto el Perú, aun no se experimenta la escasez energética en grado superlativo, es importante buscar nuevas fuentes de energía para las labores básicas e importantes.

El secado por radiación solar es el método mas sencillo y económico para la eliminación, por evaporación, del agua contenida en el material a secar sin ningún gasto de combustible. El secado solar se lleva acabo en una zona de terreno favorablemente expuesta a las radiaciones solares, provista de cobertura que en caso de lluvias proteja al material, y también de la humedad nocturna. A este tipo de secadores se les da la forma de invernadero, lo que presenta una ventaja de una protección continua y segura del producto (Paredes y Ponce, 2002).

El uso de secadores solares para el secado de café pergamino responde a una tendencia en el desarrollo de tecnologías que permitan proteger al grano de las condiciones climatológicas adversas, obtener un grano seco de calidad y lograr el secado en días con radiación solar difusa. La experiencia y estimados preliminares indican que el secado tiene una importancia decisiva en la obtención de un grano comercializable de alta calidad. Al secar el grano adecuadamente, se hace fácil conservarlo, al mismo tiempo que se garantiza su buen gusto y aroma.

El secado, además de ser una de las operaciones más costosas del proceso de beneficio del café, enfrenta en la práctica productiva de las empresas cafetaleras otra serie de diferentes problemas que gravitan sobre la calidad del grano y el costo de producción. Entre estas dificultades son frecuentes:

- Las afectaciones al grano que pueden surgir en el secado en plazoletas, por lluvias o excesivo rocío nocturno. Para evitar estos problemas se requiere un

trabajo manual adicional de recogida y protección del grano, que implica un aumento del uso de mano de obra.

- La posible contaminación del café en los secadores "Guardiola", falta de homogeneidad en el secado y otras.

Por añadidura, el secado convencional en este último tipo de instalaciones es fuente de emanaciones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en las regiones próximas a las empresas de beneficio. Estos mismos problemas han sido reportados en la literatura técnica para otros países, y justifican todo un movimiento dirigido a la búsqueda de nuevas alternativas de secado para el café, entre las cuales cobran particular fuerza e interés las opciones solares. Así, por ejemplo, países como México, recomiendan que al menos, en una primera etapa el secado se efectúe en instalaciones solares, ya que de esta forma se conservan mejor las propiedades del café; mientras que otras experiencias realizadas en Brasil demuestran que el secado del café en instalaciones donde se hace circular aire calentado por baterías de colectores solares reducen el costo de secado en más de un 6% con respecto al secado convencional, y reportan un período de recuperación de la inversión menor de cuatro años (Fonseca, 1998).

Los dos elementos básicos de un secador solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire, y la cámara de secado donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar.

## II- MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Material biológico

Se empleó semillas de café maduro de los cultivares *Typica* y *Caturra* cosechado en el distrito de Omia, en forma de cereza, las cuales fueron sometidas a un proceso de beneficio húmedo: cosechadas, despulpadas, fermentadas y lavadas; de este proceso se obtiene un café lavado con una humedad aproximada del 50-60%, los cuales se emplearán para los ensayos respectivos. Las muestras fueron obtenidas de fincas de café ubicadas en el distrito de Omia, provincia de Rodríguez de Mendoza, Región Amazonas.

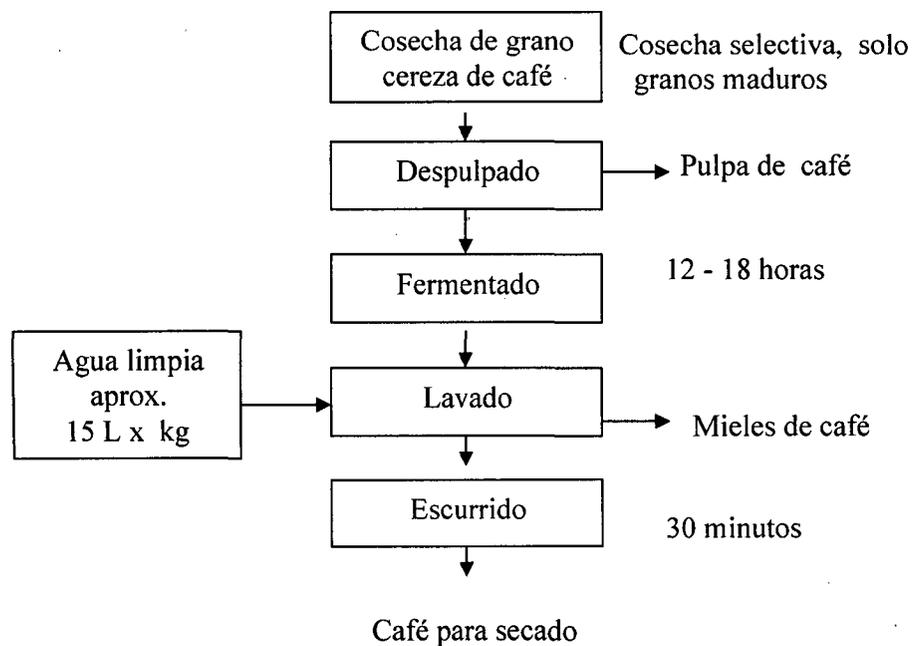


Figura 1: Flujograma del beneficio húmedo del café.

## **2.2. Prototipo de secador solar**

El prototipo de secador solar diseñado y construido en este trabajo de investigación consta de un colector constituido por una caja térmica que capta y almacena la radiación solar y la transforma en energía térmica para calentar el aire que circula en su interior, forzado por un ventilador centrífugo que succiona el aire caliente del colector solar y lo envía a la cámara de secado tipo invernadero en la que se encuentra el café, en una bandeja rectangular. Es una estructura de madera con recubrimiento de polietileno de baja densidad (PEBD) formulado con aditivo anti-UV (absorbente de radiación Ultra Violeta).

El prototipo de secador solar construido es de flujo de aire forzado, alcanza temperaturas superiores a los 50°C dependiendo del lugar y época del año, no genera altos gastos por consumo de energía, ya que solo requiere un gasto mínimo de energía eléctrica para el funcionamiento del ventilador, en comparación a secadores convencionales que utilizan gas, kerosene, petróleo, etc., que tienen un alto costo de operación. Los costos de su construcción, operación y mantenimiento son relativamente bajos (Ver punto 2.13).

### **2.2.1. Descripción de las componentes del prototipo de secador solar**

#### **a) Colector solar de placa plana**

El colector solar plano es un equipo bastante desarrollado, siendo su construcción y operación bastante simple. Su propósito es el calentamiento de un fluido, habitualmente agua o aire. Esta constituido por una placa de acero galvanizado (calamina),

pintado con esmalte negro mate que hace que el conjunto se vuelva un cuerpo negro, que permite absorber toda la radiación y no emitirla; por lo tanto, todo el calor pasa a la otra cara de la placa hacia el ducto por donde circulará el aire de secado. Tiene una cubierta de PEBD formulado con aditivo anti-UV que permite pasar la radiación solar pero no la deja salir. Todo esto se encuentra en una estructura de madera y material aislante (teknopor), que tiene por finalidad aislarlo del ambiente para evitar la pérdida de calor del aire.

El colector solar de diseño convencional para el calentamiento del aire esta constituido básicamente por los siguientes elementos:

**Cuerpo o marco:** la estructura del colector tiene la forma de una letra U achatada, esta conformada por 3 módulos de madera de 1,6 m de largo x 0,94 m de ancho y 0,19 m de alto, todo construido con madera de 2 cm de espesor. La madera ayuda a minimizar pérdidas de calor al medio exterior.

**Cubierta transparente:** se utilizó para el prototipo una manta de PEBD formulado con aditivo anti-UV para dar resistencia y estabilidad contra la oxidación provocada por los rayos UV de la radiación solar. El objetivo de estas cubiertas es la de reducir las pérdidas de calor por radiación y convección. Esta cubierta también puede ser de vidrio. Las propiedades que se buscan en las cubiertas transparentes son:

- Resistencia a la degradación debido al calor, luz y las condiciones ambientales; alta transmitancia de radiación solar y baja transmitancia de radiación infrarroja.

**Superficie absorbente**, la superficie absorbente del colector plano del prototipo de secador que se ha construido es de plancha de acero galvanizado tipo calamina, pintada con esmalte negro mate con el objetivo de absorber mejor la radiación solar y reflejar únicamente cantidades despreciables.

**Aislamiento**, El colector solar está protegido en su parte posterior y lateral por medio de un aislamiento térmico (teknopor) para evitar las pérdidas de calor térmico hacia el exterior.

#### **b) Cámara de secado**

La cámara de secado es una estructura de invernadero con techo en forma de arco, con paredes verticales, cuerpo rectangular de 2,20 m de largo x 2,15 m de ancho y 2,30 m de alto. Toda la estructura es de madera y esta cubierta con manta de PEBD formulado con aditivo UV que hace que la cámara sea un invernadero. Dentro de la cámara, a una altura de 70 cm del piso se encuentra una bandeja de madera con base de malla anchovetera de nylon en la que se pondrá el producto a secar, debajo de esta se encuentra una bandeja de madera a la que llegará el aire del difusor que luego pasará por el producto a secar

colocado sobre la bandeja e malla. En la parte delantera cuenta con una puerta de ingreso de 70 cm de ancho por donde se ingresará el producto a secar.

**c) Ventilador**

Para el prototipo de secador se eligió un ventilador centrífugo que tiene un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral; el aire, que entra a través del ojo del rotor paralelo a la flecha del ventilador, es succionado del colector solar y enviado por medio de un difusor hacia la bandeja de base cerrada que lo dirigirá hacia la capa de producto a secar.

**d) Sistema de recirculación del aire**

El sistema de recirculación del prototipo de secador solar de café esta compuesto por tuberías de PVC liviano de 4" de diámetro que tienen la función de conducir el aire extraído de la cámara de secado, que tiene una temperatura relativamente mayor y una humedad relativa mas baja respecto al ambiente circundante y lo conduce hacia la entrada del colector solar, esto mediante los 8,5 m de tubería instalada y la succión que realiza el ventilador centrífugo.

### 2.2.2. Cálculo, diseño y planificación del prototipo de secador solar

Se seguirá el diagrama de bloques mostrado en la Figura 2

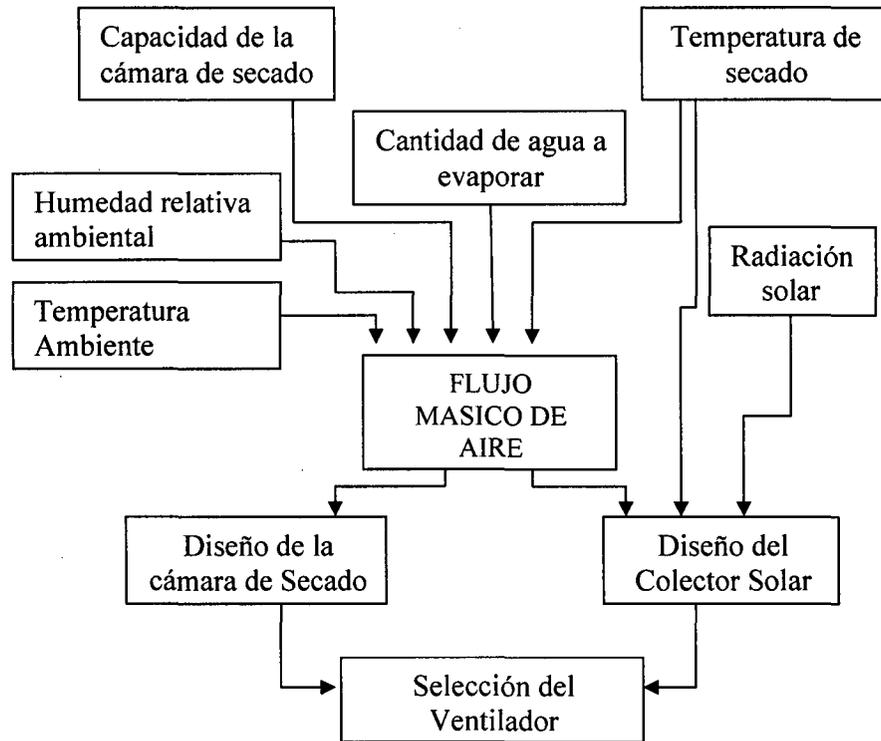


Figura 2: Diagrama del procedimiento a seguir para el cálculo, diseño y planificación del prototipo de secador solar.

#### a) Determinación de las condiciones de operación

- Modo de circulación del aire, natural o forzada
- Periodo de operación durante el año
- Lugar de operación.

#### b) Fijar valores representativos de parámetros meteorológicos

- Radiación solar
- Humedad relativa
- Temperatura ambiente.

**c) Determinar el tipo de secador, parámetros técnicos, termodinámicos y de flujo de aire**

En esta etapa, y en base a principios teóricos de secado, se efectúan cálculos de selección del secador, búsqueda de propiedades y/o constantes representativas, etc., necesarias para concretar la idea solución planteada. Como resultado del cálculo y diseño se obtienen las dimensiones, materiales y capacidad del sistema de secado. Posteriormente se realizarán las tareas de análisis técnico económico y la optimización correspondiente.

**2.2.3. Evaluación del potencial de radiación solar**

Uno de los objetivos de este trabajo es el ahorro de combustible. El petróleo diesel usualmente empleado en los centros de acopio y plantas de proceso de café es costoso y su combustión incrementa la contaminación ambiental, por lo que se desea hacer la calefacción del aire de secado mediante la aplicación de energía solar. Se ha recurrido a la información del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), para la radiación solar en la provincia de Rodríguez de Mendoza la que es  $5,5 \text{ kw.h/m}^2$ , valor que será empleado en el diseño.

**2.2.4. Demanda de secado de café a satisfacer**

El prototipo de secador solar a ser diseñado, esta orientado para que sea usado por los productores de café. En el Distrito de Omía el 90% de los productores poseen entre 1 y 4 hectáreas de café en producción, siendo 3 hectáreas cultivadas el promedio. Se considera un

rendimiento promedio del terreno en esta zona del país de 15 quintales (qq) por hectárea por campaña (2000 a 3000 kg/ha).

Un factor importante para determinar la capacidad del secador, es la cantidad de café cosechado en un día de gran cosecha con un promedio de 8 peones en una jornada de trabajo en las 3 hectáreas se cosecha en promedio entre 170 y 300 kg de café cerezo; esto significa que luego de despulpar, fermentar y lavar tenemos entre 70 y 120 kg de café pergamino con una humedad de 55% en base húmeda (bh), que luego de un oreo de 30 minutos baja a una humedad de 50% bh y está listo para ser secado. El prototipo de secador solar entonces estará diseñado para tener una capacidad máxima de 120 kg de café pergamino húmedo listo para secar.

Por otro lado, no sólo se pensó en disminuir las pérdidas post-cosecha del productor de café, sino que además se planeó el diseño de un prototipo de secador solar con el que sea posible obtener un grano de calidad, objetivo base en esta investigación. En cuanto al tiempo de secado, éste estará definido en base a los resultados del estudio experimental de secado en el equipo real construido.

#### **2.2.5. Determinación de humedad inicial del café y cantidad de agua a eliminar en el secado**

La prueba experimental tiene como objetivos:

1. Determinar la humedad inicial de los granos de café después de haber sido lavados y oreados durante 30 minutos.
2. Determinar la cantidad de agua a eliminar del café oreado (50% bh) hasta una humedad comercial de 10,5 a 12,5% bh.

El equipo de laboratorio empleado para determinar la humedad del grano de café lavado y oreado fue el detector de humedad AE ADAM modelo AMB-50 (ver Anexo) y una balanza digital. Para esto se utilizó una muestra de café despulpado y fermentado 15 horas, se lavó y escurrió alrededor de 30 minutos; de esta muestra se pesó 1,5 g para llevarlos al detector de humedad.

Con una estufa se secó el café hasta llegar a una humedad de 11,6%, con la finalidad de determinar la reducción de peso del café, parámetro referencial para la operación de secado con el secador prototipo en el campo. Para esto se utilizó dos muestras de 50 g de café despulpado y fermentado 15 horas, lavado y oreado; que fueron colocadas en placas Petri, una como muestra control para determinar el peso perdido y la otra para retirar muestras de 1,5 g cada 5 horas para determinar su humedad.

### **2.3. Diseño, instalación y ensayo del prototipo de secador solar de café**

En este punto se efectuarán los cálculos y diseños del equipo, para lo cual se seguirán los pasos:

**2.3.1. Lugar de instalación:** el prototipo de secador solar será instalado en el distrito de Omia, cercano a donde se cultiva café, orientado en la dirección de salida y ocaso del sol para aprovechar al máximo las horas de radiación solar.

**2.3.2. Periodo de operación durante el año:** dado que el cultivo del café es casi todo el año en esta zona (marzo a diciembre), en este tiempo se operará el secador prototipo; aunque es posible utilizarlo también para secar otros granos que pudieran haber por la zona como maíz y frejol. El prototipo de secador solar operará entre las 8:00 am y las 4:30 pm en forma ininterrumpida.

**2.3.3. Circulación del aire:** un ventilador centrífugo realizará la circulación forzada del aire de secado.

#### **2.4. Valores representativos de los parámetros meteorológicos**

Los datos representativos del distrito de Omia fueron obtenidos de una base de datos del SENAMHI para el periodo marzo-diciembre.

Temperatura ambiental promedio	: 24,8 °C
Humedad relativa ambiental	: 87%
Radiación solar horaria promedio	: 5,5 Kw.h/m <sup>2</sup>

#### **2.5. Selección del prototipo de secador solar y su capacidad**

Se escogió un secador solar mixto debido a que la colección de radiación solar se realiza tanto en el colector solar, previo a la cámara de secado, como en la misma cámara de secado. Este equipo es una solución adecuada en

zonas rurales, sobre todo cuando el área de terreno disponible es insuficiente para el secado solar directo sobre mantas.

El secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire). Es fácil integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. El tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o puedan perder su calidad, por un secado irregular en las partes superiores de la cama de producto, por la alta humedad y falta de contacto con el aire seco proveniente de la parte inferior de la cama (este problema se presenta mayormente en los secadores solares de silo).

La capacidad estará dada por la cantidad de café pergamino húmedo que se puede obtener en un día de gran cosecha de 3 hectáreas de cafetal, esto es entre 60 a 120 kg por batch a secar, de donde se deduce una capacidad máxima del secador de 120 kg.

## **2.6. Diseño del colector solar**

Las Figuras 3 y 4 muestran algunos tipos de colectores o calentadores solares para aire. Los rayos solares atraviesan las cubiertas transparentes (1) y llegan a la superficie absorbente (2), la cual toma parte de la radiación solar, calentando la superficie. Consecuentemente el aire situado entre la cubierta

transparente y la superficie absorbente es calentado. La finalidad del aire estancado entre la cubierta transparente de plástico y la calamina, es de servir como aislamiento, de allí que su espesor no es menor a 25 mm. Adicionalmente, el aire que fluye debajo de la placa absorbente, también es calentado. Por último, la superficie inferior (3) tiene una propiedad reflectante, así la radiación emitida por la superficie absorbente es reflejada al aire circundante para ayudar al incremento de su temperatura. Debajo de la superficie reflectante se emplea aislamiento térmico.

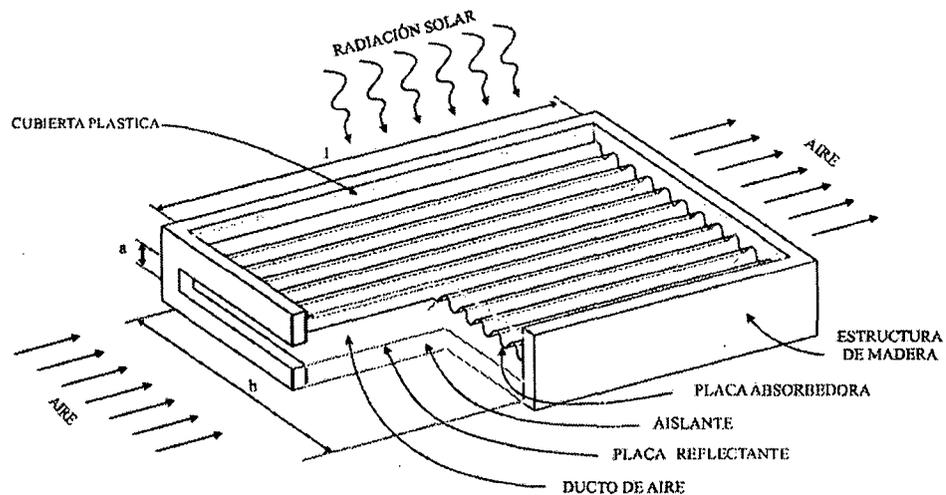


Figura 3: Colector solar.

En la Figura 4 se muestran esquemas de algunos tipos de calentadores solares para aire, es usual tratar con velocidades de 0,2 a 0,4 m/s (Parker, 1981), e incrementos de temperaturas del orden de 30°C .

El modelo tipo A es el seleccionado para el presente diseño, por ser de fácil construcción respecto a B, y ofrecer menor pérdida de calor hacia el medio ambiente respecto a D.

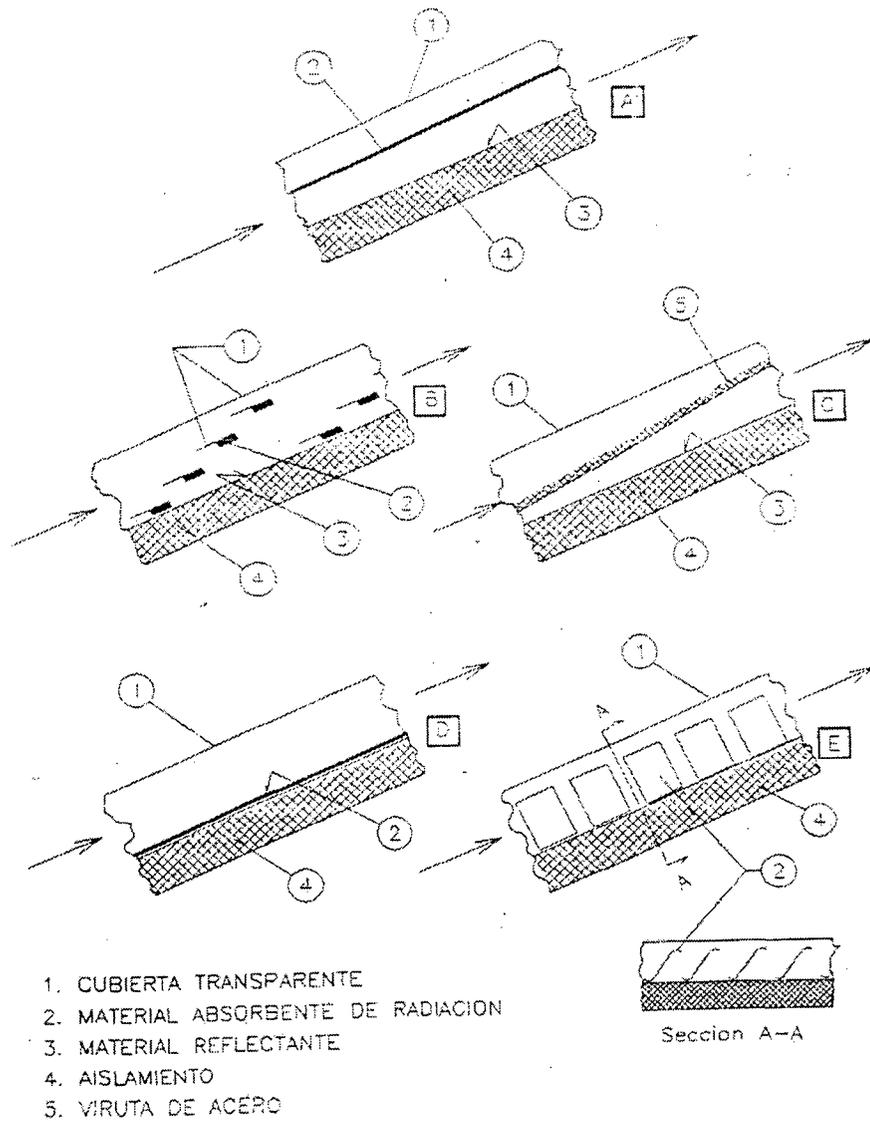


Figura 4: Tipos de calentadores solares para aire.

**Metodología del diseño:** se trata de hallar el área de colector solar necesaria, así como las dimensiones de su sección transversal para que:

- a) Se consiga la temperatura del aire deseada a la salida del colector solar,
- b) La caída de presión en el colector no sea mucha.

Para ello se ha seguido la teoría de cálculo desarrollado por investigadores como (Close, 1963). Para iniciar el cálculo, es necesario tener un conjunto de datos de entrada cuya nomenclatura se indica a continuación.

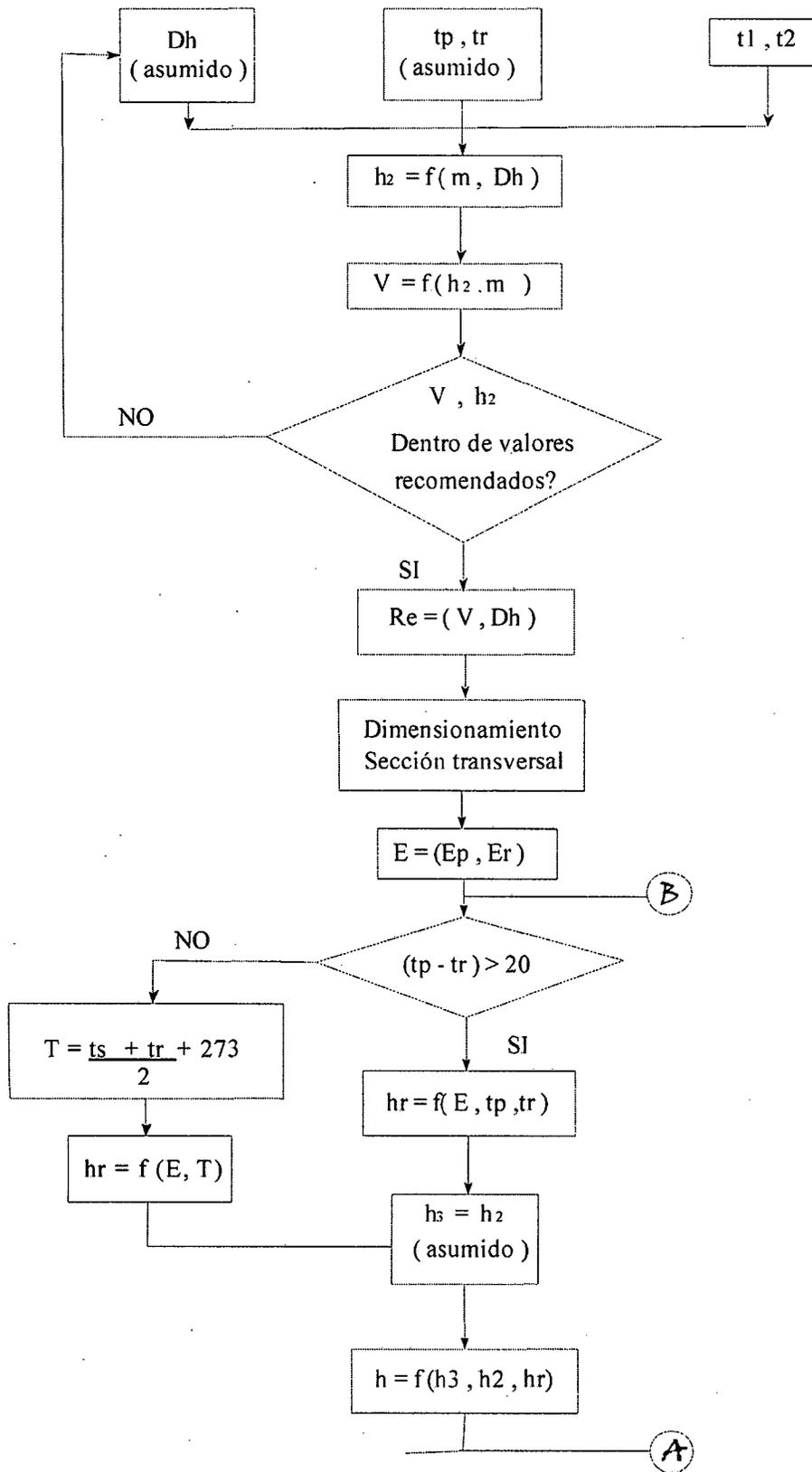
### Datos de Ingreso

- Temperatura ambiente, (°C)	$T_a$
- Radiación solar incidente normal al colector, ( $w/m^2$ )	$I$
- Velocidad del viento, (m/s)	$VVIE$
- Flujo másico de aire, (kg/s)	$m$
- Temperatura del aire al ingreso del colector, (°C)	$t_1$
- Temperatura del aire a la salida del colector, (°C)	$t_2$
- Densidad del aire a la temperatura promedio entre el aire de ingreso y de salida del colector, ( $kg/m^3$ )	$\rho$
- Calor específico del aire a la temperatura promedio entre el aire de ingreso y de salida del colector, (J/kg. K)	$C_p$
- Conductividad del aire a la temperatura promedio entre el aire de ingreso y de salida del colector, ( $W/m.^{\circ}C$ )	$k$
- Viscosidad cinemática del aire a la temperatura promedio entre el aire de ingreso y de salida del colector, ( $m^2/s$ )	$\nu$
- Absortancia de la cubierta transparente, (decimales)	$a$
- Emitancia de la cubierta transparente, (decimales)	$Ec$
- Transmitancia de la cubierta transparente, (decimales)	$\tau$
- Emitancia de la placa o superficie absorbente, (decimales)	$Ep$
- Emitancia de la placa o superficie de fondo (reflectiva), (decimales)	$Er$
- Espesor del Aislamiento, (m)	$e$
- Conductividad térmica del aislamiento, ( $W/m.^{\circ}C$ )	$K_i$

### **Parámetros Asumidos**

- Velocidad del aire dentro del colector solar, (m/s)	V
- Temperatura de la placa o superficie absorbente, (°C)	tp
- Temperatura de la placa o superficie de fondo (reflectiva), (°C)	tr
- Diámetro hidráulico de la sección transversal del colector, (m <sup>2</sup> )	Dh

El diagrama de flujo para el cálculo del área del calentador solar para aire es mostrado en la Figura 5.



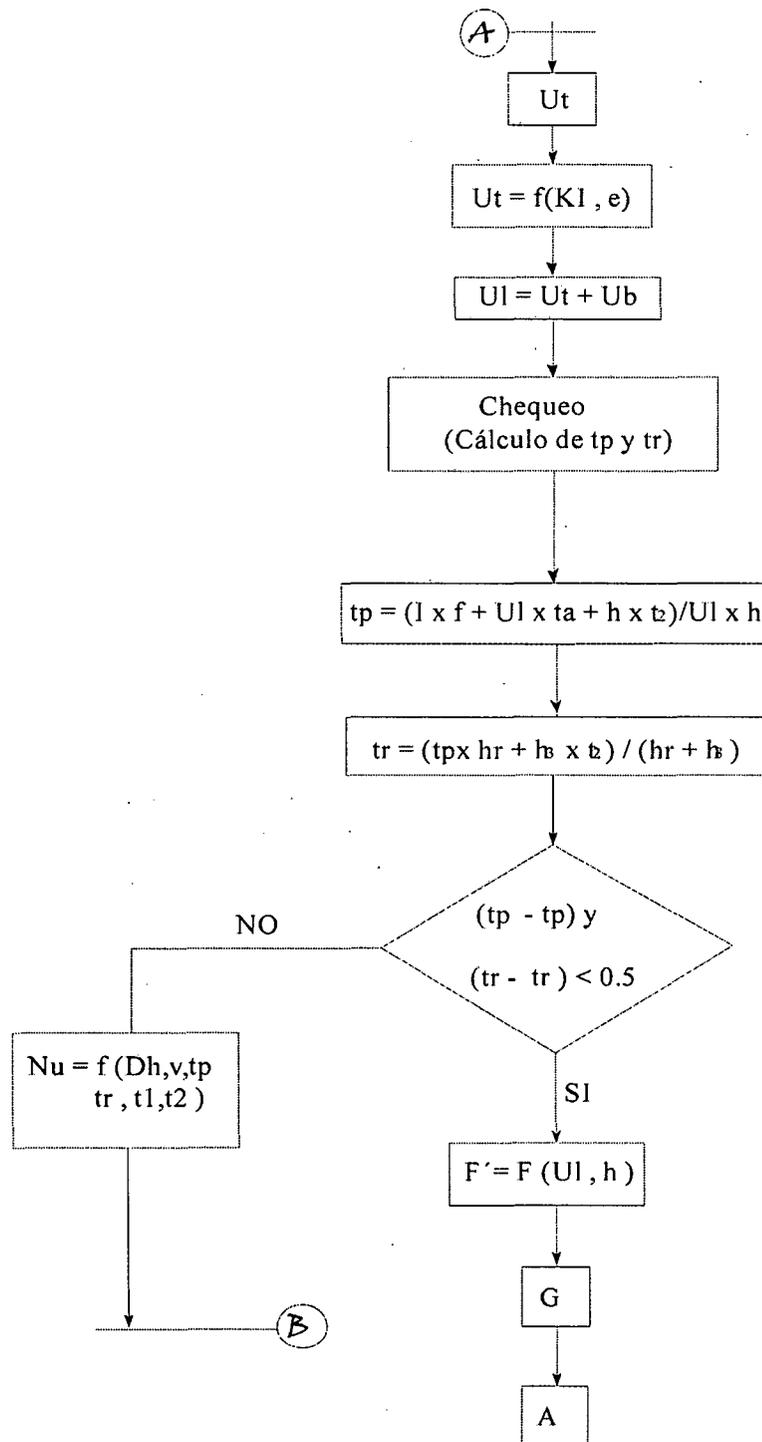


Figura 5: Diagrama de flujo para el cálculo del área del colector solar.

### **Cálculo del Número de Reynolds**

$$Re = \frac{Le \times V}{\nu}$$

La longitud equivalente (Le), según sea el caso, puede ser el diámetro hidráulico de la sección transversal del colector solar o la longitud del mismo.

### **Cálculo del Número de Nusselt**

**Caso1.-** Para dos placas planas con una de ellas caliente y por entre las cuales pasa aire con flujo turbulento.

$$Nu = 0,0158 \times Re^{0.8}$$

En este caso, la longitud equivalente es el diámetro hidráulico de la sección transversal del colector solar.

**Caso2.-** Para un ducto con flujo de gas interno turbulento (Mac Adams, 1985)

$$Nu = 0,0225 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

Dado que el rango de temperatura de la superficie absorbente varía entre 50 y 100°C, el factor,  $(\mu_w/\mu_b)^{0.14}$  se ha considerado con un valor igual a 1. El parámetro  $\mu_w$  es la viscosidad absoluta del aire a la temperatura media de la superficie absorbente, y  $\mu_b$  es la viscosidad absoluta del aire a la temperatura media del aire entre la entrada y la salida del colector solar.

El número de Reynolds (Re) y el número de Prandtl (Pr) se calcula a la temperatura  $t_f$ , donde:

$$t_f = 0,5 (t_b + t_p). \text{ La temperatura } t_b \text{ es igual a } 0,5 (t_2 + t_1)$$

**Caso3.-** Para una superficie plana caliente por un lado y sometido a un flujo turbulento .

$$Nu = 0,036 \times Re^{0.8} \times Pr^{1/3}$$

En este caso la longitud equivalente es la longitud del colector solar de aire.

**Cálculo del coeficiente convectivo entre la placa absorbente y el aire circulante dentro del colector solar**

$$h_2 = Nu \times \frac{K}{Le}$$

Para el Caso1:

$$h_2 = 0,0158 \times Re^{0.8} \times K/Dh$$

Para el Caso2:

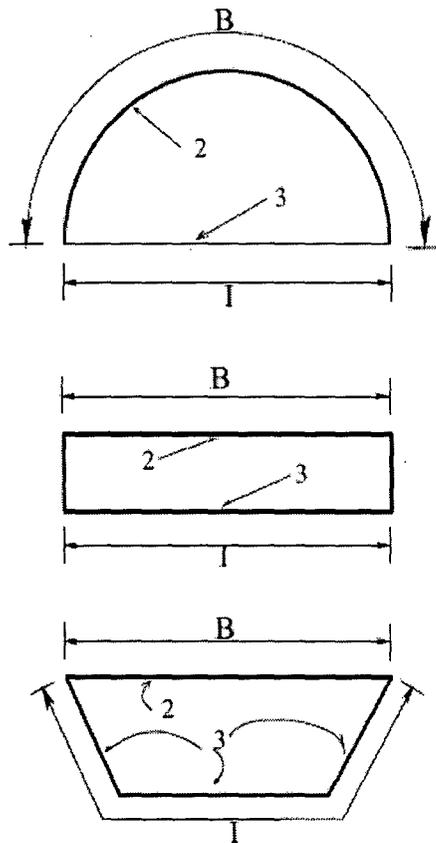
$$h_2 = 0,0025 \times Re^{0.8} \times Pr^{-0.67} \times Cp \times V \times \rho$$

Para el Caso3:

$$h_2 = 0,036 \times Re^{-0.20} \times Pr^{-0.67} \times Cp \times V \times \rho$$

Para efectos de cálculo se considera  $h_3$  igual a  $h_2$

**Cálculo del factor de emisividad (E).**- El factor de emisividad del colector solar depende de la emisividad de las superficies absorbente y reflectante y de la geometría de la sección transversal del calentador solar. Así, la Figura 6 muestra la sección transversal de tres tipos de calentador solar y sus respectivas emisividades.



SECCCIÓN TRANSVERSAL I

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_r} - \frac{1}{B}}$$

SECCCIÓN TRANSVERSAL II

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_r} - 1}$$

SECCCIÓN TRANSVERSAL III

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_r} \left( \frac{B}{I} \right) - \frac{B}{I}}$$

Figura 6 : Emisividades de tres tipos de sección transversal de colectores solares.

**Cálculo del coeficiente radiativo equivalente (hr).**- Para cualquiera de los tipos de calentadores solares mencionados en la Figura 6 se cumple que:

$$hr = \sigma \times [(tp + 237) + (tr + 237)] \times [(tp + 237)^2 \times (tr + 237)^2] \times 1/B \times E$$

Cuando la diferencia de temperaturas entre la superficie absorbente y la superficie reflectiva es menor a 20°C ( Duffie, 1967):

$$hr = 4 \times \sigma \times \check{T}^3 \times 1/B \times E$$

donde:  $\check{T} = (tp + tr) / 2 + 273$

y  $\sigma$  : constante de Boltzman =  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$

**Cálculo del coeficiente efectivo del transferencia de calor entre la superficie absorbente y el flujo de aire dentro del colector solar (h)**

$$h = h_2 + \frac{1}{\frac{1}{h_3} + \frac{1}{hr}}$$

**Cálculo del coeficiente de pérdida de calor del colector solar (UI)**

$$UI = Ut + Ub$$

**Cálculo del coeficiente de pérdida de calor desde la superficie absorbente hacia el aire del ambiente (Ut)**

$$Ut = \left[ \frac{N}{(344) \frac{TP}{N+fc} (TP-TA)^{0.31}} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \left[ \frac{\sigma (TP + TA) (TP^2 + TA^2)}{(EP + 0,0425 (1-EP) N)^{-1} + \frac{(2N + f - 1) - N}{EC}} \right]$$

Donde:

$$TP = tp + 273 \quad TA = ta + 273$$

$$h_w = 5,7 + 3,8 \times VVIE$$

N = Número de cubiertas transparentes

$$Fc = (1,0 - (0,04 \times h_w) + 5,0 \times 10^{-4} \times h_w^2) \times (1 + 0,058N)$$

**Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por conducción a través del aislamiento de la superficie reflectiva (Ub)**

$$Ub = \frac{K}{e} I$$

### **Cálculo del factor de eficiencia de la superficie absorbente (F')**

$$F' = 1/(1+UI/h)$$

### **Cálculo del flujo de aire por unidad de área del colector (G)**

$$G = \frac{F' \times UI}{C_p \times \ln \left[ 1 - \frac{t_2 - t_1}{I \times f / UI - (t_1 - t_a)} \right]}$$

## **2.7. Recomendaciones para el diseño de calentadores solares**

Cuando se trata de elegir la forma y dimensión de la sección transversal del calentador solar, debe tratarse de obtenerse un Reynolds alto (régimen turbulento) para el caso de flujo forzado. Generalmente se recomienda velocidades del aire del orden de 0,80 a 3,00 m/s (Parker, 1981).

La tarea más importante del diseño de calentadores solares para aire es encontrar la velocidad adecuada del aire, para una razonable caída de presión a través del colector y para una buena transferencia de calor desde la placa absorbente al aire de circulación (Parker, 1981).

Respecto a la altura de la sección transversal, esta no podrá ser tan grande que origine gradientes de temperatura altos entre la placa absorbente y el flujo de aire debajo de ésta. Tampoco podrá ser muy pequeña, pues ocasionaría grandes pérdidas de presión, determinando colectores solares de gran ancho, lo cual es poco práctico para su instalación. De ensayos efectuados en diversos tipos de calentadores solares de aire, se recomienda una altura de sección transversal del orden de 5 a 35 cm (Parker, 1981).

### **Coefficiente efectivo de transferencia de calor entre la superficie absorbente y el flujo de aire (h)**

El factor  $h$  tiene un efecto importante en la eficiencia del colector solar (Hollands, 1988). El valor de  $h$  esta a menudo alrededor de  $10 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , aunque reconoce que en los diseños usualmente  $h$  está entre  $17$  y  $23 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (Whillier, 1964).

Cuando se usan placas absorbentes de la energía solar, se recomienda el uso de plancha de acero galvanizado tipo calamina, instalado de tal forma que origine la mayor turbulencia en el aire circulante (Whillier, 1964). Otro modo de obtener un buen valor de  $h$  es usar como una placa absorbente una malla con plástico ennegrecido de tal forma que alrededor de la mitad de la radiación solar pase a través de la malla y sea absorbido en la superficie o placa inferior, por encima de la cual fluye aire. También se recomienda seleccionar el número de cubiertas en caso que la diferencia de temperatura entre el aire de ingreso al colector y el aire ambiente sea mayor a  $17^\circ\text{C}$  (Whillier, 1964).

### **Coefficiente de pérdida de calor (U)**

Generalmente se conoce su valor mediante las curvas de eficiencia del colector versus la relación entre el incremento de temperatura del aire y la radiación solar. En la medición del  $U$  se usó un banco de pruebas de laboratorio Puertas Dentro (INDOOR) en la cual se controla la temperatura del aire ambiente, velocidad del viento y la radiación solar. En ensayos realizados con agua, los valores de  $U$  medidos están bastante de acuerdo con

los teóricos. Para una velocidad del viento igual a cero,  $U_l$  varía entre 6,4 a 8,7  $w/m^2 \cdot ^\circ C$ . El colector ensayado contiene solo una cubierta transparente, y la temperatura medida en la placa absorbente varía entre 40 y 100 $^\circ C$ .

Un valor típico de  $U_l$  es 5  $w/m^2 \cdot ^\circ C$  (Hollands, 1988). Para un calentador solar de aire con vidrio simple,  $U_l$  es 6,8  $w/m^2 \cdot ^\circ C$  y para cubiertas dobles es 4,5  $w/m^2 \cdot ^\circ C$  (Whillier, 1964). Se ha reportado un valor usual de  $G_c$  de 12  $w/m^2 \cdot ^\circ C$ , y el del flujo másico de aire de 0,01  $Kg/s \cdot m^2$  ((Hollands, 1988).

### **Factor de Transmisividad – absorptividad (f)**

El vidrio simple tiene un  $f$  de 0,83 y el tedlar 0,82 (Willier, 1964). Estos valores deben ser multiplicados por 0,86 para considerar factores de pérdida por suciedad, forma y por el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la cubierta transparente, el cual varía con el tiempo. Para el caso del conjunto de cubierta de vidrio y placa absorbente ennegrecida y corrugada hay un método de cálculo de este factor:

$$f = 0,98 \times \beta \left[ 1,008 \times a \times \tau + \frac{(1 - \tau \times R)}{C \times a} \right]$$

$\beta$ : factor de forma de la placa absorbente.

Para superficies planas, su valor es 1.

$(1 - \tau \times R) / C \times a$  : Es el incremento efectivo en la transmitancia del vidrio debido al incremento alcanzado de su temperatura.

El factor numérico 0,98 ha sido tomado en cuenta o para explicar la diferencia entre los valores y “a” para radiaciones directa y difusa. El factor numérico

1,008 explica las reflexiones múltiples entre la placa absorbente y la cubierta de vidrio.

En este caso,  $\tau$  representa la transmitancia solar de la placa de vidrio para la radiación directa a incidencia normal. “a” es la absortancia solar de la placa absorbente ennegrecida para la radiación directa a incidencia normal. Para calcular “F” a ángulos de incidencia diferentes al normal, se aplican factores de corrección (Hotel, 1955).

### **Materiales para calentadores solares de aire**

**a) Cubierta transparente:** sus cualidades mas importantes son:

- Resistencia a la degradación del calor, luz solar y condiciones ambientales.
- Alta transmitancia a la radiación solar, y baja transmitancia a la radiación infrarroja.
- Bajo costo, fácil transporte y disponibilidad en el mercado local.

Los siguientes materiales son empleados como cubiertas transparentes (Tabla 2)

- Plásticos en láminas o planchas (1,0 – 3,2 mm de espesor).
- PMMA (Polimetacrilato de Metilo), conocido comercialmente como acrílico, Lucite o Plexiglas.
- PC (Policarbonato), conocido como Lexan.
- GRP (fibra de vidrio reforzado con poliéster).
- Plásticos en films (0,025 – 0,0125 mm de espesor).
- PVF (Polivinyl Fluoride), conocido como Tedlar.

- FEP (Propileno-Etileno Fluorinado), conocido como Teflón.
- PET (Poli-Terftalato de Etileno), conocido como Mylar.
- Polietileno tratado contra la radiación ultravioleta.
- PVC transparente.
- ETFE (Ethylene tetrafluor polymerisate), conocido como Hostafлот.

Tabla 2: Propiedades de diversos materiales usados como cubiertas transparentes en las aplicaciones de energía solar.

Tipo de Material	Espesor (mm)	Peso Especifico (ASTM 0792)	Transmisión de Radiación Solar (%)	Resistencia al calor continuo max Temp. (°C)
Vidrio (water – write 0.01% iron.	3,2	2,46-2,49.	85 - 91	205
PMMA (Acrilico)	3.2	1,17 – 1,20	89	60-95
Policarbonato	3.2	1,20	82 - 89	120
Fibra de vidrio con poliéster reforzado	1,0		80-90	150-175
Tedlar Fluoruro de Polivinilo (PVF)	0,10	1,38 – 1,57	92-94	108
Teflón Polipropileno Etileno – Fluorinado(FEP)	0.05	2,12 – 2,17	97	109
Mylar Poli-tereftalato de etileo(PET)	0,025	1,38-1,40	85	205
Polietileno de baja densidad (PEBD) protección UV	0.025		88-90	104

Fuente : Blaga , A. Use of Plastics

Tabla 3 : Propiedades físicas de diversos materiales usados como cubiertas transparentes en las aplicaciones de energía solar.

Tipo de Material	Esfuerzo a la tensión (ASTM D638) MPA	Modulo de elasticidad (ASTM 638)	Coefficiente de expansión térmica (ASTM D638)
Vidrio (water –write 0.01% iron.	44,4	724.	0.85
PMMA (Acilico)	72.4	3,1	5,0 – 9,0
Policarbonato	65	2,1 – 2,4	6,6
Fibra de vidrio con poliéster reforzado	100 - 120	7,6	3,6-4,4
Tedlar Fluoruro de Polivinilo (PVF)	90	1,8	4,8
Teflón Polipropileno Etileno Fluorinado(FEP)	19-21	3,4	8,3-11
Mylar Poli-tereftalato de etileo(PET)	170	3,8	3,0
Poli-etileno de baja densidad (PEBD) protección UV	210		

Fuente : Blaga , A. Use of Plastics

**Vidrio:** Es un material caro, sin embargo es muy utilizado por su alta transmitancia y alta resistencia a la degradación por radiación solar. En el mercado local hallamos del tipo simple (2 mm), semidoble (3mm) y doble (4 mm).

**Acrílico:** Usado generalmente en edificios industriales e institucionales. Debido a su bajo punto de ablandamiento, no se recomienda para usos como cubiertas internas, en el caso de usarse se recomienda doble cubierta.

**Policarbonato en planchas:** Son mas resistentes a la temperatura que los acrílicos, pero tienen menor transmitancia y no son resistentes a la radiación ultravioleta.

**Fibra de vidrio con poliéster reforzado:** La transmisión solar depende de la formulación y del método de fabricación. Es particularmente conveniente en invernaderos y techos de edificios. Tiene alta transmisividad en todo el espectro solar y es opaca a la radiación de onda larga. Se deteriora cuando es expuesta al medio ambiente. Se han desarrollado planchas de fibra de vidrio altamente estables para resistir la degradación por los rayos ultravioletas. Comercialmente se vende como Sun-Lite y Filón.

**Tedlar:** Presenta una notable retención de la apariencia y de las propiedades físicas luego de una larga exposición a las condiciones ambientales. Además tiene una buena resistencia a la abrasión.

**Teflón:** Posee excelente resistencia a la temperatura, pero también posee un alto coeficiente de expansión.

**PVC transparente (Policloruro de vinilo):** De fácil adquisición en el mercado local. Se resquebraja luego de 6 meses de exposición al ambiente.

**Polietileno de baja densidad con aditivo anti UV:** El PEBD transparente térmico es un plástico que tiene la propiedad de dificultar mucho el paso de las radiaciones nocturnas (tiene una permeabilidad del 18% a las radiaciones de longitud de onda larga). Esto permite a los invernaderos cubiertos con este material que se anule casi en su totalidad la inversión térmica y que las

temperaturas mínimas absolutas sean de unos 2 ó 3 °C más elevadas a las registradas en cubiertas de PE normal.

Tabla 4 : Propiedades y costos de algunas cubiertas transparentes

Tipo de Material	Espesor (mm)	transmisividad Solar(%)	Costo aproximado (US \$/m <sup>2</sup> )
Vidrio	3,20	85-91	3,60
Glass -Low Iron	3,00	90,1.	5,45
Glass- Water White	3,00	91,6	8,07
Glass- Water White	5,00	91,3	11,09
Acrílico	1,60	89,0	13,00
Fibra de vidrio reforzado	1,00	80-89	5,47
Fibra de vidrio Reforzado (+)	0,64	86,0	5,70
Tedlar 400 SE	0,10	90,0	4,06
Teflón	0,10	90,0	4,50
Mylar Tipo A	0,025	85,0	0,18
Polietileno de baja densidad (PEBD) protección UV	0,25	88-90	1,35

Fuente : Blaga , A. Use of Plastics 1992.

De las Tablas 3 y 4 podría pensarse que el Mylar es el mas adecuado por su bajo costo y alta resistencia a la tensión, pero solo se conoce su transmitancia espectral (0,85), en el rango de la longitud de onda de 0,40 - 0,80 micrones, rango en el cual se encuentra distribuido el 50% de la radiación solar. Una

desventaja, como en los demás productos importados, es el monto del pedido mínimo, el cual es de 228 kg y un costo de US\$ 1440.

Otro material recomendable es el Tedlar, sin embargo el pedido mínimo de importación es de 91 kg equivalente a 650 m<sup>2</sup>. Una buena opción era el PVC transparente por ser de fácil disponibilidad en el mercado local, y su alta transmitancia. Sin embargo, un problema de este material, es su corto periodo de uso al ambiente, esto es 12 meses.

En nuestro caso se optó por el PEBD ya que en la actualidad se dispone de formulaciones, conocidas con el nombre de plástico “anti-UV”, que han extendido considerablemente su período de degradación, el que llega a los tres años, dependiendo mucho de las condiciones ambientales e instalación. Por otro lado se ha logrado disminuir su transmisión en la zona de infrarrojo con el agregado de ciertas sales, lo que mejora en mucho su efecto invernadero. La formulación de polietileno de baja densidad anti-UV con un costo mucho menor que el vidrio y una duración aceptable ha permitido el uso extensivo del polietileno en el agro, especialmente en invernaderos, desplazando al vidrio.

- b) Aislamiento:** El aislamiento debe cumplir los requisitos de bajo peso, baja conductividad y bajo costo. Entre los materiales usualmente empleados esta el Teknopor, lana de vidrio y poliuretano.

Tabla 5: Materiales para aislamiento y sus propiedades.

Tipo de Material	Especificaciones	Conductividad Térmica (w/m°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
Lana de vidrio (Nacional)	Rollo 1m x 5m x 1"	0,0267	32
Lana de vidrio (Importada)	Rollo 1,2m x 10m x 1"	0,0375	16 - 19
Poliuretano		0,015 - 0,010	
Tecknopor (Styrofoam SMETE)	Plancha de 1,20 x 2,40m x 1"	0,0363	27,9
Corcho regranulado	Partícula de 0,47cm	0,044	30

Fuente: Paredes y Ponce 1994

- c) **Superficie absorbente con recubrimiento.**- Cualidades requeridas en este material son: alta conductividad térmica (cobre, aluminio, fierro galvanizado) y alta absorptividad de la radiación solar, para lo cual se aplica una capa de pintura negra del tipo común o del tipo selectivo. En la pintura negra del tipo común, la emisividad del material absorbente es algo menor que la absorptancia. En cambio, en el caso del recubrimiento selectivo la emisividad es bastante menor que la absorptividad (relación 1: 9), con lo que se consigue una mayor eficiencia del colector solar.

El ex - ITINTEC, luego de diversos ensayos en las cuales se probaron diversas pinturas negras disponibles en el mercado local, concluyó que la pintura negro mate para pizarra era el de mejor absorptividad. La Tabla 6 resume algunos materiales absorbentes y recubrimiento, los cuales son de fácil adquisición.

Tabla 6: Absortividad de algunos materiales y recubrimientos.

Tipo de Material	Absortividad (%)	Emisividad (%)	Costo aproximado (US \$/m <sup>2</sup> )
Pintura esmalte negro	83	83	0,4
Pintura negro mate	97	97	0,5
Alquitrán	86	86	---
Pintura negro de Humo	95	95	0.8

Fuente: Paredes y Ponce 1994

(\*) A temperaturas características de los colectores solares de placa plana

Tabla 7: Reflectancia y emitancia promedio de algunos materiales.

Tipo de Superficie	Reflectancia (%)	Emitancia promedio (%)
Laminas de aluminio brillante	92 - 97	5
Plancha de aluminio	80 - 95	97
Papel recubierto	75 - 84	20
Acero galvanizado	70 - 80	25
Pintura de aluminio	30- 70	50

Fuente: Paredes y Ponce 1994

## 2.8. Diseño de la cámara de secado

El diseño de la cámara de secado comprende básicamente el dimensionamiento de la bandeja de producto, la forma y el sistema de carga y descarga del secador.

El dimensionamiento de la bandeja que contendrá el producto a secar se realizó mediante un rápido y simple análisis que se describe a continuación:

- Se tomó un recipiente cuadrado de 23 cm de largo x 21 cm de ancho y una altura de 12 cm, se agregó una cantidad de café listo para secar con una humedad de 49,5% bh y se lo niveló hasta una altura de 4 cm.
- Nivelado el producto en el recipiente, se procedió a retirar el producto, ponerlo en una balanza y tomar su peso que fue de 1,80 kg.
- Seguidamente se calculó el área del recipiente que contenía el producto, siendo esta 0,0483 m<sup>2</sup>.
- Una vez obtenido el área del recipiente y el peso del producto se relacionaron y por un cálculo sencillo de regla de tres simple se determinó el área que debía ocupar 120 kg de producto a secar, siendo esta de aproximadamente 3,2 m<sup>2</sup>, todos los cálculos fueron realizados para una altura de cama de 4 cm.

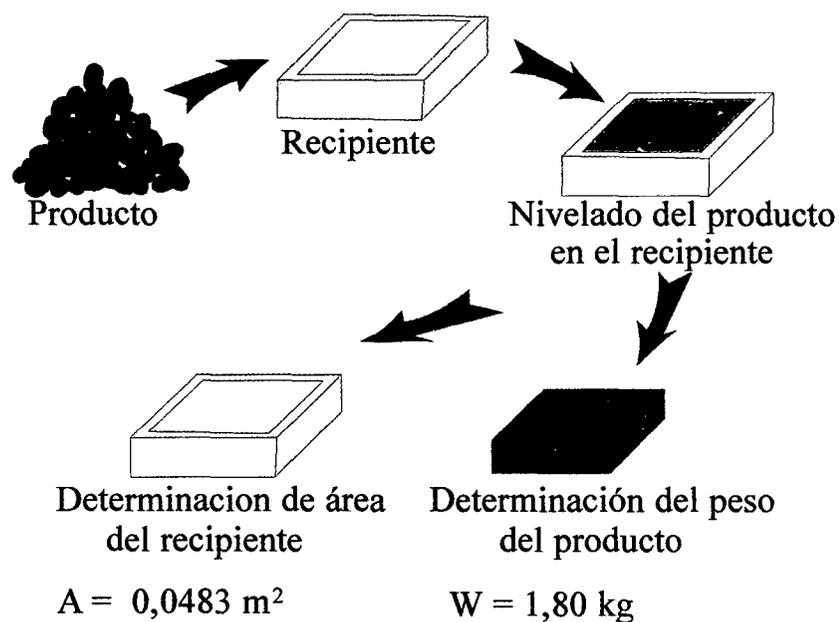


Figura 6: Diagrama para calcular el área de la bandeja de producto.

- Con este dato se procedió a dimensionar el área de la bandeja de secado que tuvo como medidas finales 2 m de largo x 1,65 m de ancho y una altura de 12 cm, la cual tiene como base malla anchovetera de nylon.
- En base a estos datos se diseñó la cámara de secado de forma paralelepípeda que tenía como estructura base vigas de madera, además para evitar efectos por lluvia se le diseñó un techo en forma semicircular que permitiera el escurrimiento rápido del agua de lluvia.
- Una vez dimensionada la cámara de secado, se procedió a tomar en cuenta la disposición ergonómica mas apropiada para la distribución de los componentes dentro de la cámara.

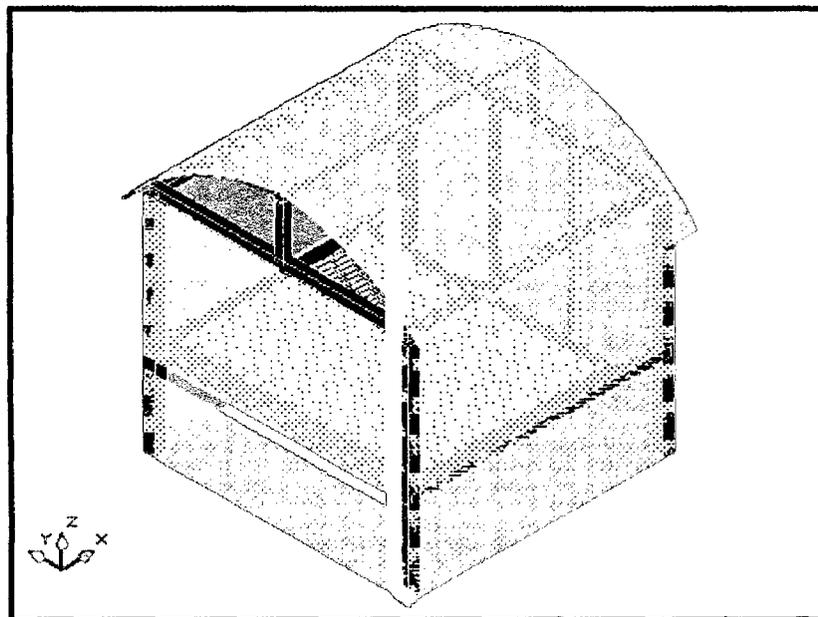


Figura 7: Cámara de secado.

## 2.9 Diseño del ventilador

### 2.9.1 Criterios para la selección de los ventiladores

Los primeros aspectos a ser tenidos en cuenta son la capacidad o flujo de aire y la presión estática a ser vencida. Luego hay que determinar el tipo de

ventilador, la selección final se realiza teniendo en cuenta la eficiencia, costo, tamaño, confiabilidad y efectos de ruido.

- a) **Ventilador centrífugo:** consiste en un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral; el aire, que entra a través del ojo del rotor paralelo a la flecha del ventilador, es succionado por el giro del rotor y arrojado hacia la envolvente, se descarga por la salida en ángulo recto a la flecha. Puede ser de entrada sencilla o de entrada doble.
  
- b) **Ventilador axial:** puede funcionar en un amplio rango de volúmenes de aire, a presiones estáticas que van de bajas a medias y es capaz de desarrollar mayores presiones estáticas que el ventilador turbo-axial y ser más eficiente; los álabes-guía, en la succión o en la descarga, o en ambas partes, se han añadido para enderezar el flujo del aire fuera de la unidad. No producen tan altas presiones como los centrífugos, pero pueden mover grandes cantidades de aire a baja presión. Estos ventiladores producen mayores niveles de ruido que los centrífugos.

Como nuestro sistema tendrá que lidiar con presiones altas se optó por un ventilador centrífugo con álabes curvados hacia delante, con motor eléctrico de 0,35 hp (1350 rpm) por ofrecer aparte de suficiente presión, una operación estable en un amplio rango de caudal de aire. Esta dimensionado de acuerdo a la pérdida de presión que tenga el sistema y al diámetro de su rotor lo que está calculado en el Apéndice A-2.

## **2.10 Control de calidad del café**

### **2.10.1 Definición**

La calidad en café, se refiere a las cualidades o características intrínsecas del grano de café y de su infusión. Sin embargo, la calidad de un café puede significar diferentes cosas para diferentes personas. Al final, la calidad del café se define por si la bebida será o no agradable al consumidor. Los estudios sobre el sabor del café han recibido gran atención, en comparación con cualquier otro material alimenticio. La percepción del sabor en el café es un fenómeno complejo que involucra sensaciones olfativas, gustativas y táctiles.

### **2.10.2 Catación**

La catación es la prueba organoléptica o sensorial aceptada internacionalmente para la comercialización del café. Esta prueba de evaluación es realizada por un especialista llamado Catador, que posee amplios conocimientos, experiencia y habilidades naturales para poder percibir cada uno de los atributos y defectos que pueda tener el café. Todos los aspectos evaluados en la catación son subjetivos, ya que la actividad es meramente empírica, puesto que cada individuo puede tomar una opinión diferente sobre la calidad y la aceptación de una infusión o licor en particular. Los atributos y defectos pueden dividirse tanto para el aspecto físico del grano como también para la bebida, y están basados en las exigencias del consumidor. Al final, la presencia y gravedad de los defectos físicos y de taza dan el concepto global de la calidad. De esta manera, la catación determina el verdadero valor y utilidad del café en el mercado.

### **2.10.3 Características físicas del grano de café**

Entre las características físicas se encuentran: tamaño, aspecto del café en oro, color en oro y tostado, aspecto externo y abertura de la hendidura del grano. El tamaño de grano (granulometría) se determina utilizando tamices con diferentes diámetros. Este se expresa en porcentaje de grano verde por clase de tamiz. Se consideran granos con defectos aquellos que presenten al menos una de las siguientes condiciones: negros, decolorados, malformados, aplastados, inmaduros (verde), mordido, picado por insectos, fermentados, manchados, entre otros. Los defectos pueden expresarse tanto en porcentaje o en cantidad.

### **2.10.4 Características organolépticas más relevantes**

Los sentidos del olfato y del gusto son importantes en el proceso de definición de la calidad de un café en particular. En este proceso, se hace alusión a un olor o sabor particular de la vida diaria. Estos olores y/o sabores pueden indicar aspectos positivos o negativos (defectos) del café evaluado. Dentro de las características organolépticas importantes se encuentran: aroma, cuerpo, acidez, amargo y sabor.

### **2.10.5 Características relevantes en el acopio del café**

La recepción y compra del café de los caficultores en pergamino se hace en base de muestras representativas y pruebas de catación a fin de tener la seguridad que se está comprando un café sano, clasificado por su calidad, limpieza y rendimiento. En el mercado internacional no se aceptan cafés que

presentan defectos o daños. La recepción y compra del café se realiza en lo que se refiere al secado, cuidando los siguientes aspectos:

**a) Que el café no tenga olores extraños**

**Taza sucia:** café que no alcanzó su punto de fermentación.

**Meloso:** café que no fue bien lavado y conserva adheridas sus mieles.

**Sabor a tierra:** café que fue recolectado del suelo, procesado con agua sucia o tendido a secar en patios sucios.

**Moho:** café que faltó secar, tiene mas de 12% de humedad, esto también origina que el grano pueda blanquearse.

**Olor a humo:** café que al secarse le penetró humo de la combustión a la secadora, esto sucede principalmente cuando se usan hornos de fuego directo. Aquí también puede contaminarse con olor a diesel, puede sucederle este mismo daño al café que se almacena cerca de lugares donde se produce humo.

**Olor a pescado:** el café adquiere este olor cuando estando mojado o húmedo permanece amontonado por mucho tiempo sin ser oreado o secado.

**Fogueado:** café acelerado en su secado con altas temperaturas o cuando no se carga una secadora a su capacidad, o porque es pasado de sol en los patios.

**b) Que el café se encuentre en su punto de secado**

El punto de secado del café debe estar a 12%, o sea, ni completamente seco, ni húmedo. Si el café esta pasado de seco pierde su calidad y al pasarlo por el descascarador se quiebra en pedazos. Pero la prueba final será siempre el rendimiento que logra el café mismo durante el procesamiento en beneficio

seco, o sea después de quitar la cáscara y eliminar los defectuosos. Los cafés de buena altura y un cuidado estricto en el control de calidad durante el acopio pueden lograr un rendimiento de 84 %. Un café de poco rendimiento solo resulta en pérdidas económicas al momento de la venta y al final el fracaso de la asociación, cooperativa e intereses del mismo agricultor.

### **Metodología a usar para el control de calidad de la muestra secada en el secador prototipo de café**

Procedimiento:

- Una vez terminado el proceso de secado en el secador solar prototipo se confirmó la humedad del café.
- Se llevó el café seco sobre una manta limpia y se siguió el proceso para obtener una muestra homogénea como se muestra en la Figura 8.

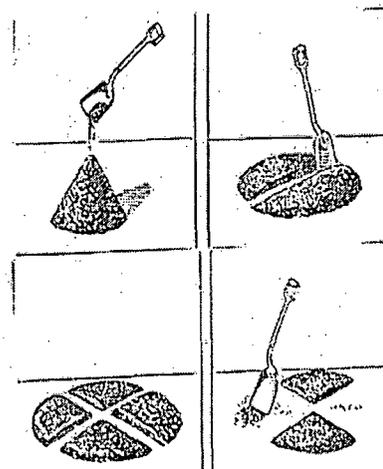


Figura 8: Método para obtener una muestra de café homogénea.

- La muestra homogénea tuvo un peso de 2 kg que fue envasada en una bolsa de polietileno de alta densidad y sellada.

- La muestra fue llevada al laboratorio de control de calidad de la Central Piurana de Cafetaleros (CEPICAFÉ) donde se hizo el análisis físico y sensorial de la muestra mínimo con 2 catadores especializados.
- El punto en el que se centró este análisis fue para encontrar defectos que se puedan haber desarrollado en la fase de secado.

### **2.11 Instalación del secador solar prototipo de 120 kg de capacidad**

El secador solar prototipo de 120 kg de capacidad fue instalado en el barrio de Huarango del distrito de Omia, ubicado aproximadamente a 15,6 km de la capital de la provincia de Rodríguez de Mendoza y a 102 km de la capital del departamento de Amazonas, se encuentra entre las coordenadas UTM 233000 y 238000 Este y entre 9283000 y 9287000 Norte.

El secador prototipo se instaló en el patio de una vivienda, básicamente por el tema de seguridad. Se construyó de madera en casi toda su estructura y revestido con plástico según muestra el plano UL-01 y E-01.

El colector fue formado por 3 módulos, los cuales fueron unidos por tablas de 1 m de longitud, además de ser unidos en el interior por maderas que hacían las veces de bases de asiento a las calaminas, cada módulo tenía un peso aproximado de 22 kg. En la entrada y salida del colector armado se colocaron difusores de acero galvanizado.

El plástico transparente de polietileno de baja densidad (PEBD) formulado con aditivo UV se colocó y se tensó sobre los módulos colectores mediante varillas de 1,20 m y 1 cm<sup>2</sup> de espesor.

### **2.12 Ensayo en el secador solar prototipo de café**

Una vez puesto el producto en la cámara de secado se procedió al encendido del ventilador. El ensayo se realizó desde las primeras horas del día en que el sol incidía en el sistema desde las 8:00 am hasta aproximadamente las 4:30 pm en que se ocultaba el sol. El control de peso del producto se realizó cada 30 minutos. Con la misma frecuencia se hizo los controles de temperatura ambiente, de entrada al colector, de salida del colector y a la salida de la cámara de secado. Cada 4 horas se retiró muestras de café para determinar si la operación de secado se realizaba en forma uniforme.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Determinación del contenido de humedad del café

a) Para determinar la humedad se hicieron 4 pruebas en el detector de humedad.

En la primera prueba de detección de humedad se empleó 1,1 g de café, tomados del total de la muestra a 2 minutos de haberse terminado el lavado, esta prueba tomó un tiempo de 21 minutos. Las otras 3 muestras se tomaron después de 30 minutos de oreo.

b) Los resultados obtenidos de las mediciones de cantidad de agua a eliminar hasta llegar a una humedad de 11.8 % duraron 5 horas aproximadamente en estufa (ver Tabla 11 y 12).

Tabla 8: Determinación de la humedad inicial del café lavado.

Inmediatamente después de Lavado						
MUESTRA	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Tiempo de Secado (min)	Humedad Final (%)
1	1,1	0,477	120	54,83	21	4,52
				<b>54,83</b>	<b>21</b>	<b>4,52</b>
30 minutos de oreo						
MUESTRA	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Tiempo de Secado (min)	Humedad Final (%)
1	1,498	0,7618	120	49,15	55'04"	4,95
2	1,5	0,751	120	49,93	58'56"	3,16
3	1,502	0,76	120	49,40	58'27"	4,05
Suma	4,5	2,27	360	148,48		12,16
<b>Promedio</b>	<b>1,5</b>	<b>0,7576</b>	<b>120</b>	<b>49,49</b>		<b>4,05</b>

Fuente: Elaborado por el tesista

Tabla 9: Determinación del agua extraída en estufa.

MUESTRA	Peso Placa (g)	Peso Placa + café inicio (g)	Peso café inicio (g)	Tiempo (h)	Peso Placa + café final (g)	Peso de café final (g)
1	45,74	97,77	50,03	5	72,48	26,74
2	41,40	91,43	50,03	5	67,42	26,02
Suma						52,76
<b>Promedio</b>			<b>50,03</b>			<b>26,38</b>
<b>Agua extraída final promedio</b>						<b>23,65</b>
<b>Agua extraída final promedio (%)</b>						<b>47.2 %</b>
<b>Porcentaje del peso final del café a 11,6% de humedad en b.h.</b>						<b>52.8%</b>

Fuente: Elaborado por el tesista.

De esto se tiene para los cálculos:

Contenido de humedad inicial del grano: 54.83 % bh (1,17 bs).

Contenido de humedad después del oreo: 49.49 % bh (0,983 bs).

Contenido de humedad final del grano: 12% bh (0,136 bs).

### 3.2. Determinación del flujo másico de aire

Cálculo de la cantidad de agua a evaporar:

$$\begin{aligned} &= (M_i \text{ (bs)} - M_f \text{ (bs)}) \quad \times \quad \text{masa seca de café} \\ &= (1,17 - 0,136) \quad \times \quad (1 - 0,548) \times 120 \text{ Kg.} \\ &= 55,79 \approx 56 \text{ kg.} \end{aligned}$$

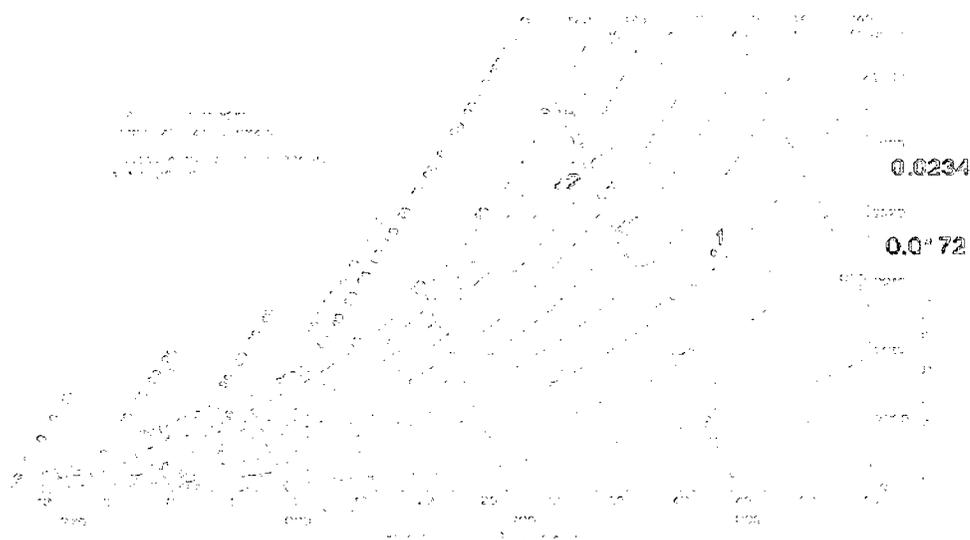


Figura 9: Determinación de humedad con el diagrama psicrométrico.

En la Figura 9 se muestra la operación de secado para la cual se ha utilizado la humedad relativa del aire a la salida de la cámara de secado de 80%, esto debido a que (Mayo, 1991) nos señala que es recomendable que el aire de la cámara de secado debe salir con una humedad de 50 a 80% de humedad relativa. No se debe superar este valor de 80% a fin de evitar problemas de

condensación y por tanto rehumidificación del producto lo que afectaría enormemente su calidad.

Luego la capacidad del secado fue:

$$0,0234 - 0,0172 = 0,0062 \text{ kg agua/kg aire}$$

y el flujo másico promedio de aire necesario es:

$$m = \frac{\text{Cantidad de agua a evaporar} / \text{Tiempo de secado}}{\text{Capacidad del aire de secado}}$$

$$m = \frac{55,79 \text{ kg} / 24 \text{ h}}{0,0062 \text{ kg agua} / \text{kg aire}}$$

$$m = 374,93 \text{ kg} / \text{h}$$

Flujo másico de aire = 374,93 kg / h
--------------------------------------

\*

\* Este dato servirá para el dimensionamiento del colector solar

Tabla 10: Datos experimentales del ensayo del secado de café en secador solar prototipo.

Medición, 1-13 del día 1, medición 14-31 del día 2, medición 32-45 del día 3 .

Medición	Tiempo (horas)	Temperatura del airea la entrada del Colector (°C)	Temperatura de aire a la salida del Colector (°C)	Temperatura de Salida de aire de la cámara de Secado (°C)	Peso del Café (kg)	Humedad Relativa (%)
1	0	34	54.6	31	94.00	máxima
2	0.5	34	55.3	42.2	91.20	40
3	1	35	60.2	44.3	88.50	35
4	1.5	34	59.6	44	85.80	38
5	2	33	59.4	43.6	83.10	35
6	2.5	35	59.2	43.4	80.40	34
7	3	36	60.1	44.6	78.60	32
8	3.5	35	51.6	43.1	76.80	35
9	4	36	51.2	41.9	75.00	36
10	4.5	35	47.3	39.9	73.90	38
11	5	35	46.2	40.2	73.20	40
12	5.5	34	33	33.6	72.10	44
13	6	34	33	30.8	71.85	44
14	6.5	28	39.9	33.1	70.95	46
15	7	29	44.8	36.2	70.25	41
16	7.5	30	51.6	45.9	69.80	34
17	8	29	56.4	46.5	69.15	30
18	8.5	32	58.3	49.9	68.00	22
19	9	34	63	49.3	66.15	23
20	9.5	34	60.2	49.5	65.10	24
21	10	35	61.2	50.4	63.75	22
22	10.5	36	60.8	50.1	62.40	22
23	11	37	58.6	50.1	61.25	24
24	11.5	37	58.1	49.6	60.15	23
25	12	36.5	58.2	49.1	59.25	23
26	12.5	36.2	53.9	46.3	58.15	20
27	13	35	50.7	44.3	57.25	20
28	13.5	35	46.2	42.3	56.55	20
29	14	34.5	41.3	38.6	55.85	28
30	14.5	33.5	34.3	35.1	55.20	30
31	15	31	33.9	34.2	54.30	30

Continuación de la Tabla 10:

Medición	Tiempo (horas)	Temperatura del aire a la entrada del Colector (°C)	Temperatura de aire a la salida del Colector (°C)	Temperatura de Salida de aire de la cámara de Secado (°C)	Peso del Café (kg)	Humedad Relativa (%)
32	15.5	30	50	41.8	53.85	23
33	16	32	54.4	45	53.65	20
34	16.5	33	58.2	48.8	52.75	20
35	17	34	63.5	50.4	52.15	20
36	17.5	35	64.2	51.9	51.15	20
37	18	36	66.5	52.1	50.25	20
38	18.5	36	65.4	51.4	49.58	20
39	19	36.5	63.3	50.5	48.90	20
40	19.5	36	65.2	50.8	48.45	20
41	20	34	50.1	39	48.00	20
42	20.5	34	48.3	39.2	47.78	20
43	21	34	47.5	39.5	47.55	20
44	21.5	34	45.6	38.4	47.55	20
45	22	33	44.3	38.1	47.55	20

Fuente : Datos experimentales en el secador solar prototipo de café

Figura10: Perfil de temperaturas del secador solar prototipo de café

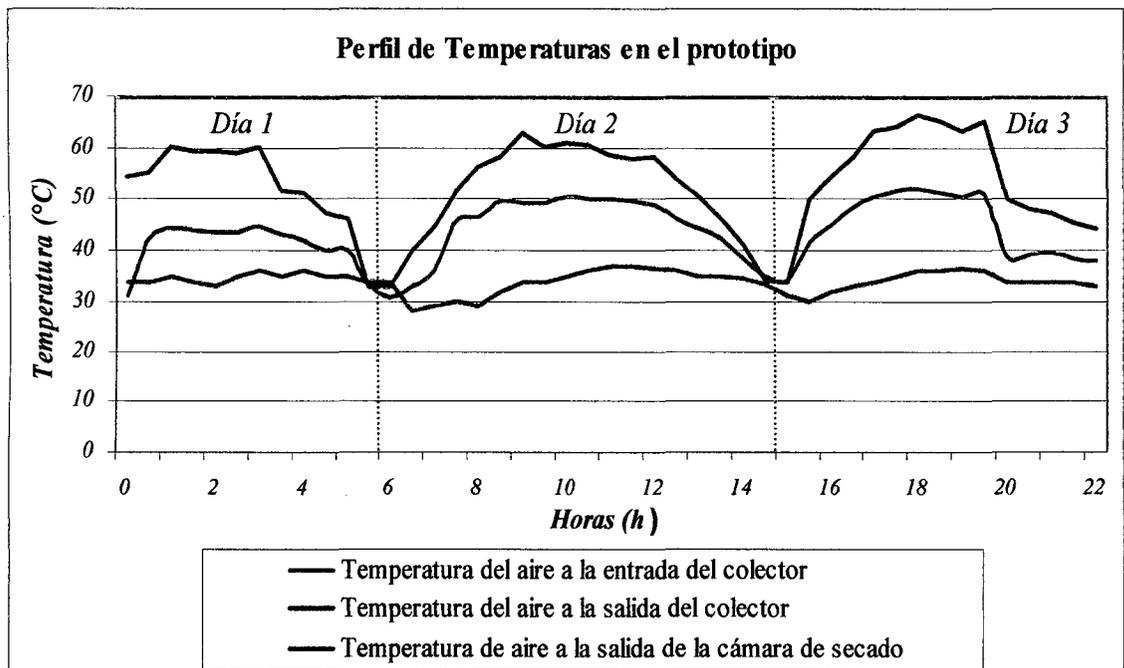


Figura 11: Variación del peso con respecto al tiempo en el secador solar prototipo de café.

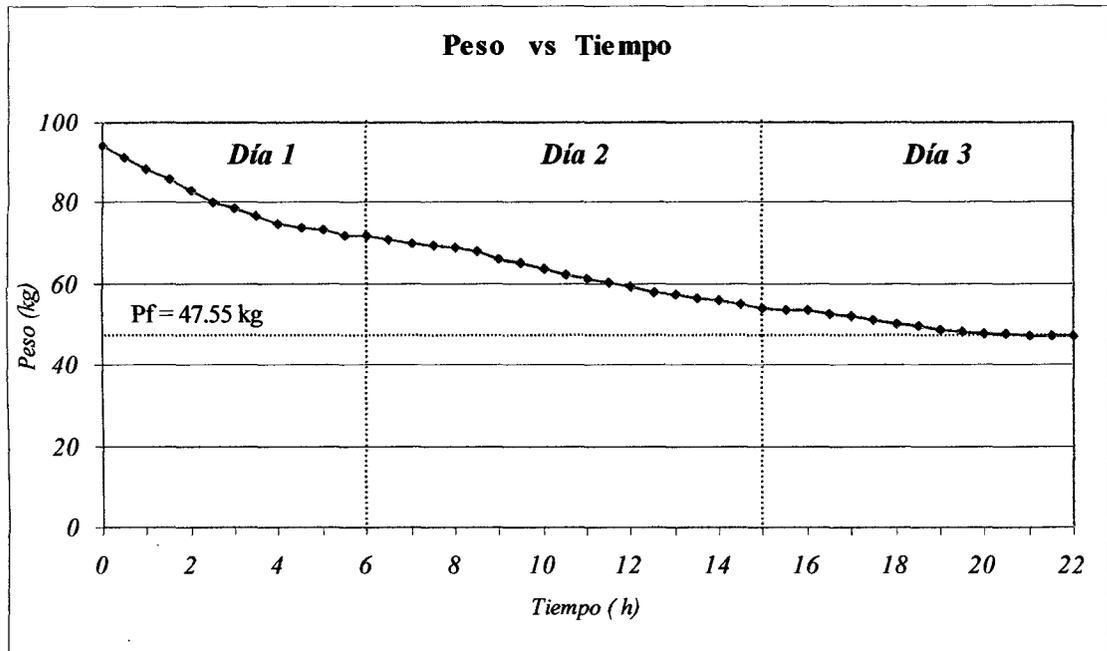


Tabla 11: Datos del ensayo del secado de café en el secador solar prototipo. Medición , 1-13 del día 1 , medición 14-31 del día 2 , medición del día 3.

Medición	Tiempo (horas)	Peso del Café (kg)	Humedad residual (kg H <sub>2</sub> O/kg ss)	dY / dt (kg H <sub>2</sub> O/kg ss.h)	Y <sub>m</sub> (kg H <sub>2</sub> O/kg ss)
1	0	94.00	1.479		
2	0.5	91.20	1.405	0.148	1.44
3	1	88.50	1.334	0.142	1.37
4	1.5	85.80	1.263	0.142	1.29
5	2	83.10	1.160	0.205	1.21
6	2.5	80.40	1.120	0.079	1.14
7	3	78.60	1.073	0.095	1.10
8	3.5	76.80	1.025	0.095	1.05
9	4	75.00	0.978	0.095	1.00
10	4.5	73.90	0.949	0.058	0.96
11	5	73.20	0.930	0.037	0.94
12	5.5	72.10	0.901	0.058	0.92
13	6	71.85	0.895	0.013	0.90

Continuación de la Tabla 11:

Medición	Tiempo (horas)	Peso del Café (kg)	Humedad residual (kg H <sub>2</sub> O/kg ss)	dY / dt (kg H <sub>2</sub> O/kg ss.h)	Y <sub>m</sub> (kg H <sub>2</sub> O/kg ss)
14	6.5	70.95	0.871	0.047	0.88
15	7	70.25	0.853	0.037	0.86
16	7.5	69.80	0.841	0.024	0.85
17	8	69.15	0.824	0.034	0.83
18	8.5	68.00	0.793	0.061	0.81
19	9	66.15	0.744	0.098	0.77
20	9.5	65.10	0.717	0.055	0.73
21	10	63.75	0.681	0.071	0.70
22	10.5	62.40	0.646	0.071	0.66
23	11	61.25	0.615	0.061	0.63
24	11.5	60.15	0.586	0.058	0.60
25	12	59.25	0.563	0.047	0.57
26	12.5	58.15	0.533	0.058	0.55
27	13	57.25	0.510	0.047	0.52
28	13.5	56.55	0.491	0.037	0.50
29	14	55.85	0.473	0.037	0.48
30	14.5	55.20	0.456	0.034	0.46
31	15	54.30	0.432	0.047	0.44
32	15.5	53.85	0.420	0.024	0.43
33	16	53.65	0.415	0.011	0.42
34	16.5	52.75	0.391	0.047	0.40
35	17	52.15	0.375	0.032	0.38
36	17.5	51.15	0.349	0.053	0.36
37	18	50.25	0.325	0.047	0.34
38	18.5	49.58	0.307	0.036	0.32
39	19	48.90	0.290	0.036	0.30
40	19.5	48.45	0.278	0.024	0.28
41	20	48.00	0.266	0.024	0.27
42	20.5	47.78	0.260	0.012	0.26
43	21	47.55	0.254	0.012	0.26
44	21.5	47.55	0.254	0.000	0.25
45	22	47.55	0.254	0.000	0.25

Fuente : Datos obtenidos de la tabla N° 10

Figura 12: Variación de la humedad con respecto al tiempo total del secado en el secador prototipo de café.

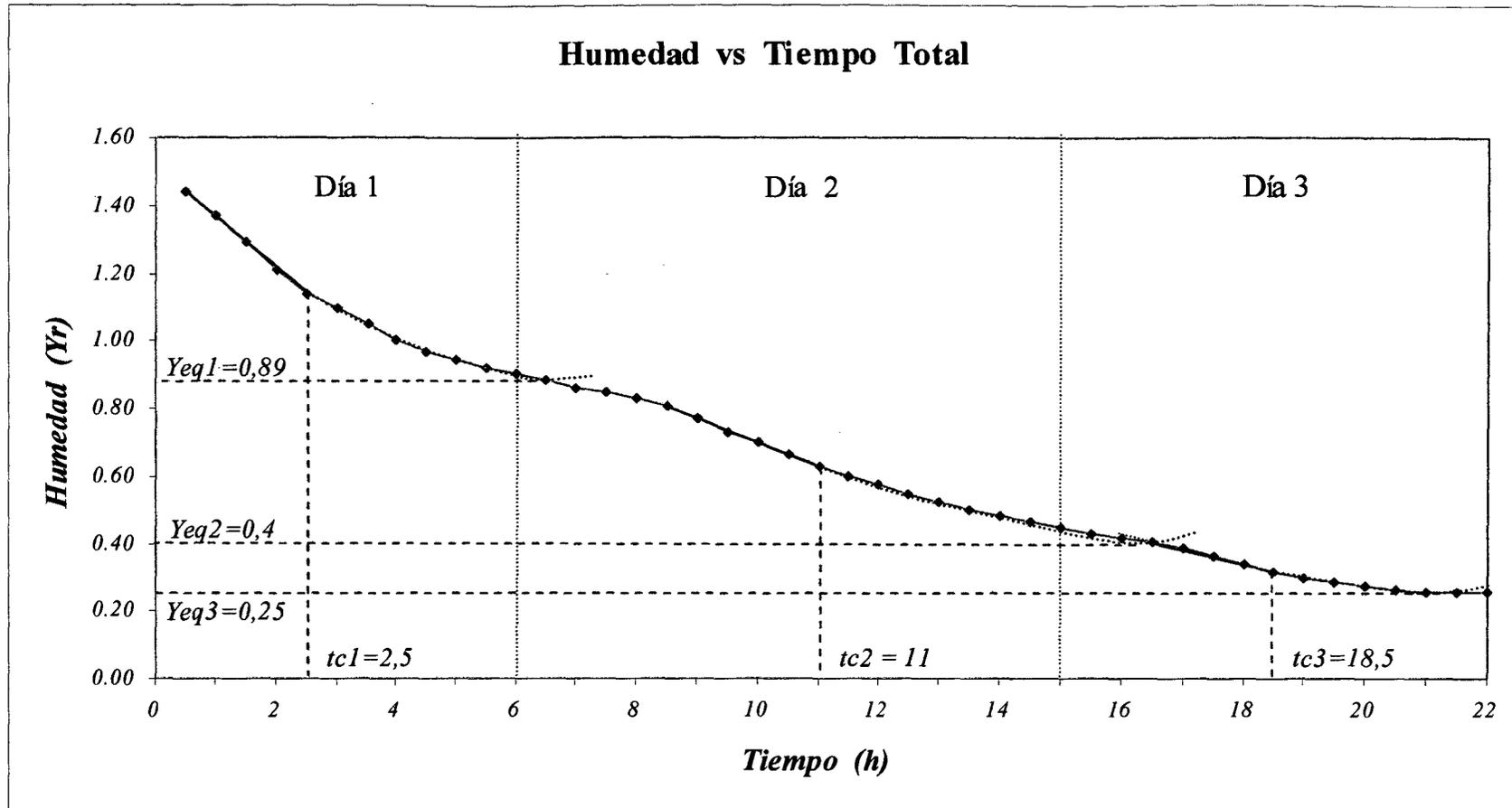


Figura 13: Variación de la humedad con respecto al tiempo el día 1.

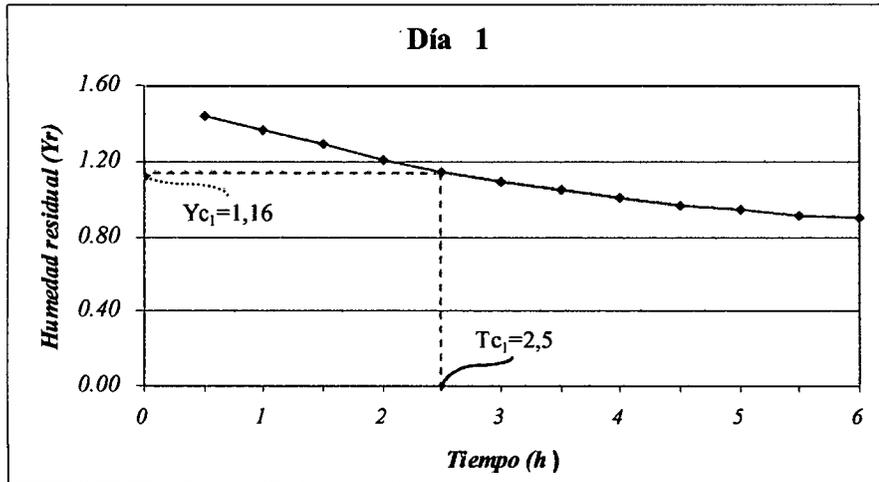


Figura 14: Variación de la humedad con respecto al tiempo el día 2.

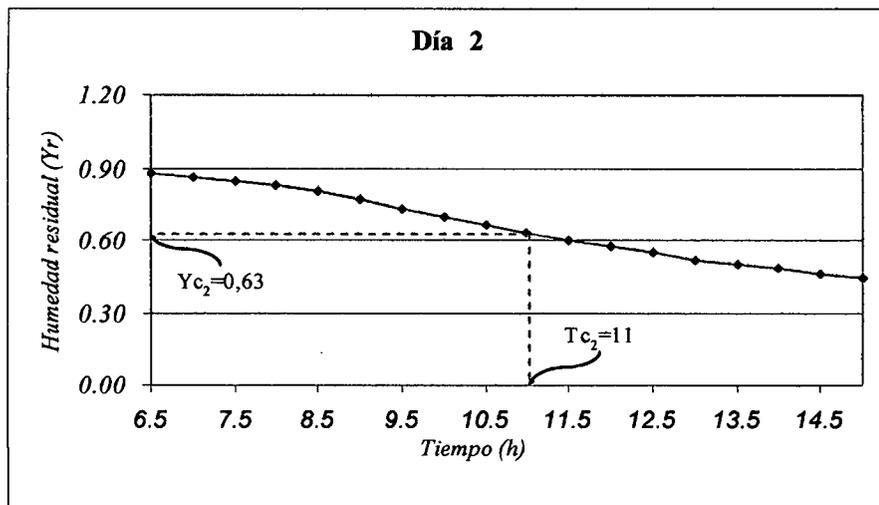


Figura 15: Variación de la humedad con respecto al tiempo el día 3.

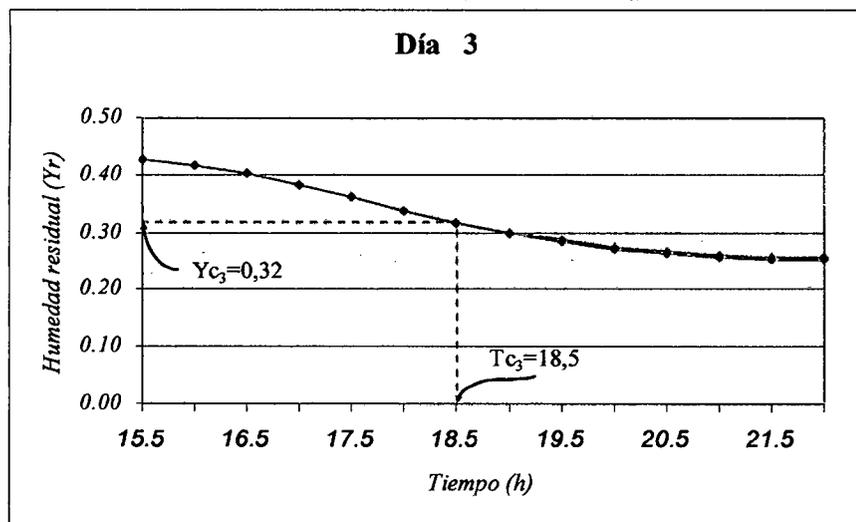


Figura 16: Pérdida de la humedad en la unidad de tiempo vs. humedad promedio

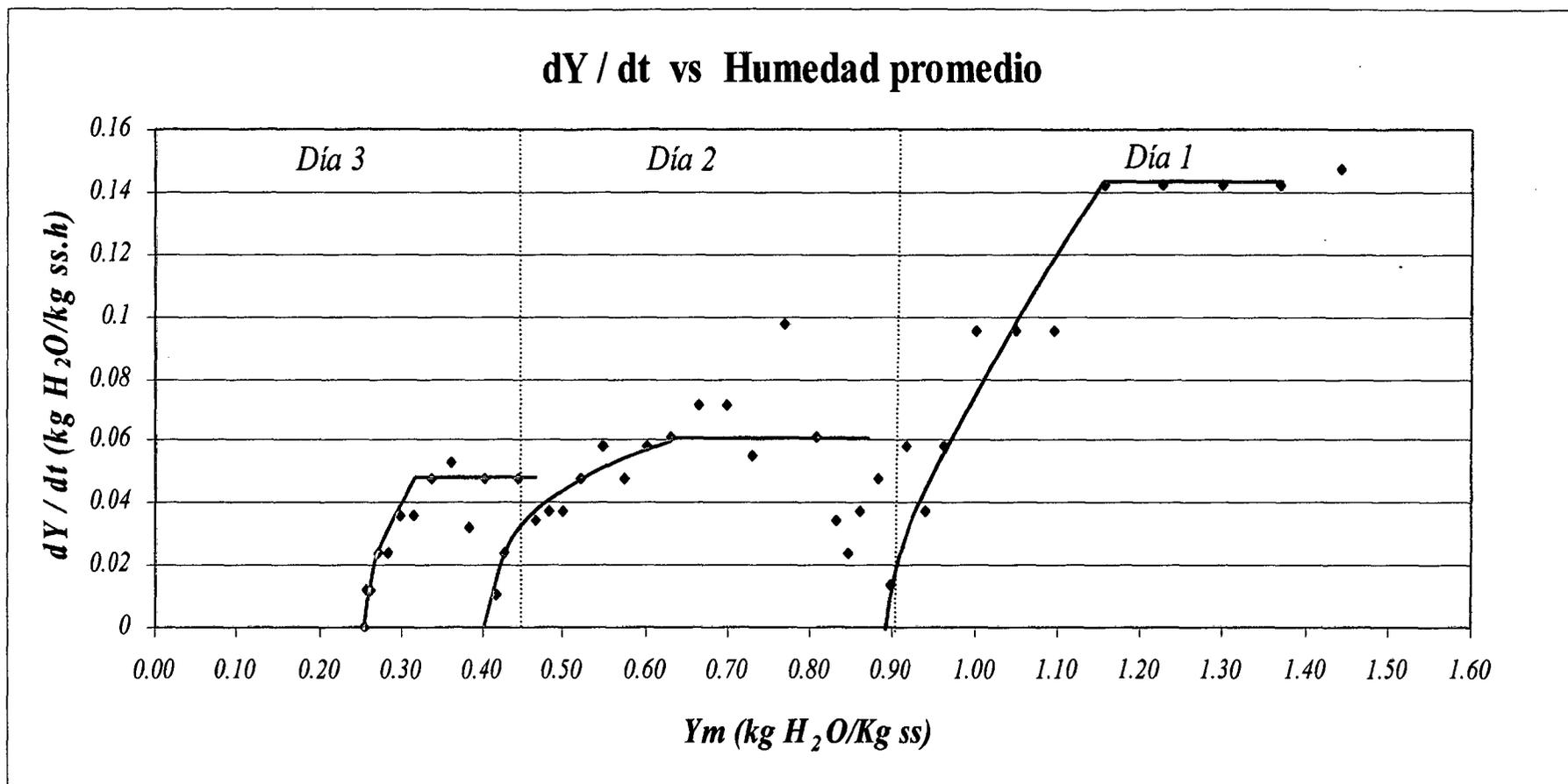


Figura 17: Pérdida de la humedad en la unidad de tiempo vs humedad promedio el día 1

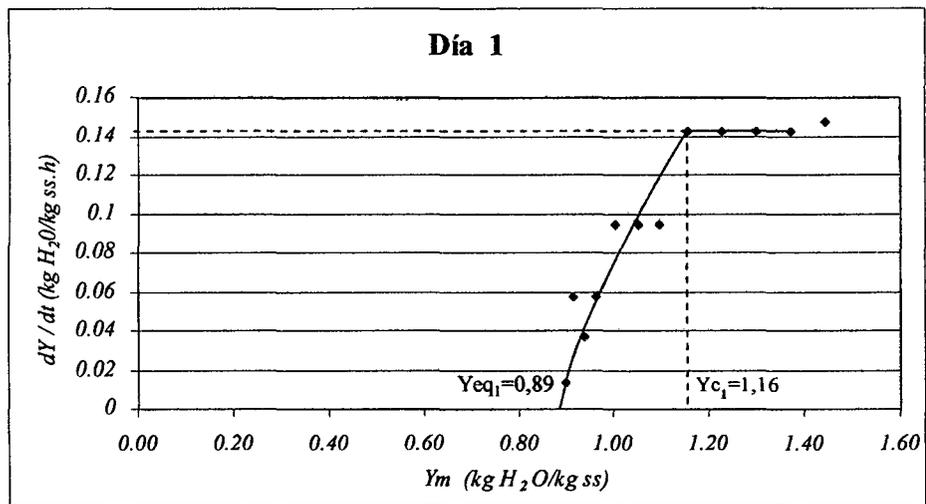


Figura 18: Pérdida de la humedad en la unidad de tiempo vs humedad promedio el día 2

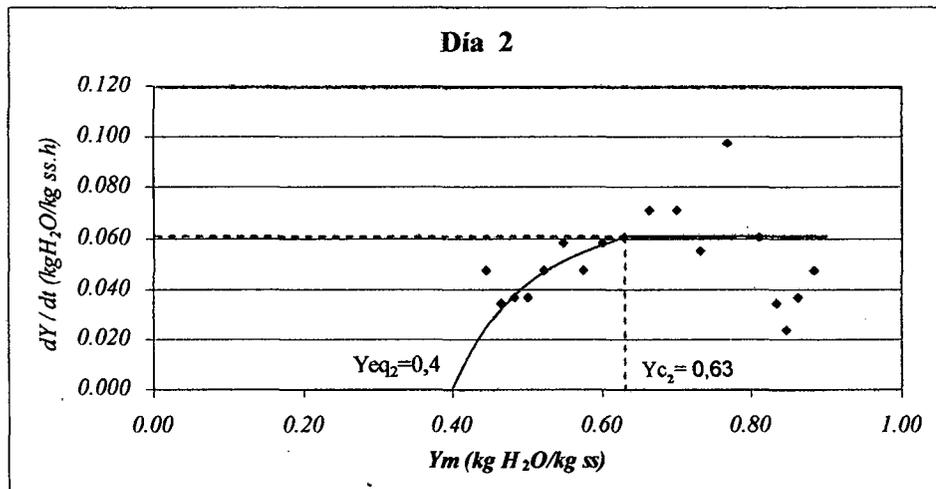
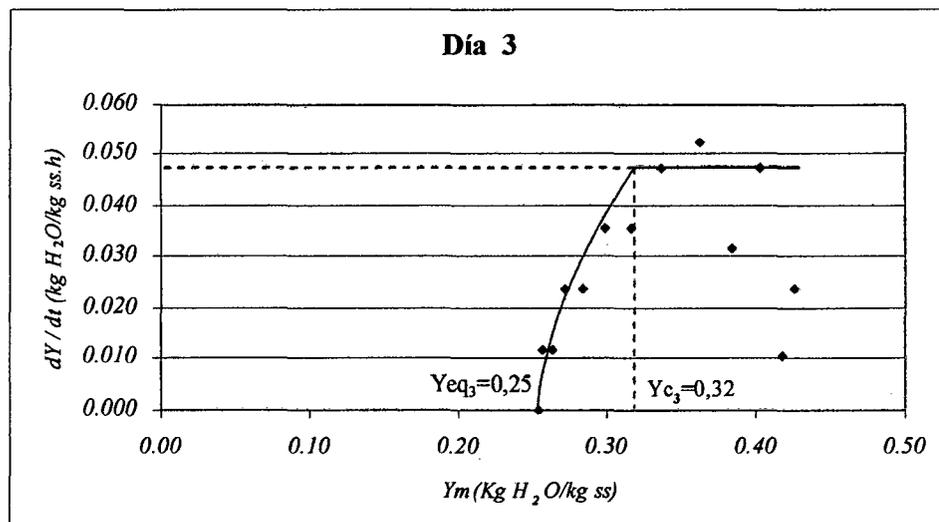


Figura 19: Pérdida de la humedad en la unidad de tiempo vs humedad promedio el día 3



### 3.3 Evaluación financiera del uso del secador solar prototipo de café

#### 3.3.1 Cálculo de gastos del secador solar prototipo de café

Tomando datos de febrero del 2008 (1 US \$ = S/. 2,90) considerando precios constantes y una tasa de descuento del 10%, se presenta la evaluación financiera del uso del secador solar prototipo de café. En este caso solo se consideran los gastos y beneficios adicionales a los del secado tradicional y debidos al uso del secador. La evaluación financiera se basa en comparar las anualidades de gastos adicionales a los del secado tradicional producidas por el uso del secador solar prototipo de café con los beneficios adicionales introducidos por el uso de este secador. Los costos realizados en la construcción del secador solar prototipo de café se muestran en la Tabla 8.

Tabla 12: Costo de construcción del secador solar prototipo de café.

ITEM	Cantidad	Costo ( S/. )	Costo ( US \$ )
<b>1. Colector Solar</b>			
- Manta plástica de PEBD con aditivo anti UV	6,5 m <sup>2</sup>	25,50	8,80
- Acero galvanizado Calamina (1,8m x 0,83 m)	3	51,00	17,60
- Aislante (Tecknopor) Plancha de 1,20 m x 2,40 m x 1"	2	24,00	8,30
- Papel metálico aluminizado	1	12,00	4,15
- Módulos de madera (1,60m x 0,92m x 0,20m) 2 cm espesor	3	90,00	31,00
- Pintura negro mate (spray x 250 mL)	2	12,00	4,15
- Clavos, tornillos, etc.		4,00	1,37
- Cola sintética (bolsa x 0,5 kg)	1	5,00	1,72
<b>Sub Total</b>		<b>223,50</b>	<b>77,02</b>
<b>2. Cámara de secado</b>			
- Manta plástica de PEBD con aditivo anti UV.	21,5 m <sup>2</sup>	82,00	28,30
- Estructura de madera		120,00	41,4
- Tubo de PVC 1" (3 m)	3	9,00	3,10
- Malla anchovetera	3,5 m <sup>2</sup>	6,00	2,1
- Sogas	6 m	9,00	3,10
- Tornillos		4,00	1,40
- Nylon	15 m	3,00	1,00
<b>Sub Total</b>		<b>233,00</b>	<b>80,30</b>

<b>3. Ventilador</b>			
- Marca WEG 1340 rpm	1	290,00	100,00
- Cable eléctrico	20 m	10,00	3,45
<b>Sub Total</b>		<b>300,00</b>	<b>103,45</b>
<b>4. Difusores</b>			
- Difusores de acero galvanizado	2	55,00	19,00
- Difusor de madera.	1	30,00	10,34
- Silicona	1	4,00	1,40
- Remaches	40	6,00	2,06
<b>Sub Total</b>		<b>95,00</b>	<b>32,75</b>
<b>5. Sistema de recirculación</b>			
- Tubos de PVC de 4"	3	36,00	12,41
- Codos de PVC de 4"	4	12,00	4,15
<b>Sub Total</b>		<b>48,00</b>	<b>16,56</b>
<b>6. Mano de Obra</b>			
- Construcción e instalación		200,00	67,00
<b>Sub Total</b>		<b>200,00</b>	<b>67,00</b>
<b>TOTAL</b>		<b>1099,5</b>	<b>379,10</b>

Elaborado por el-tesista

El costo calculado para este secador fue de S/. 1099,50 o US \$ 375,00, cifra

que es muy aceptable por los beneficios:

- Evita pérdidas en época de lluvias; esto significa que el café quedará de un día para otro en el secador solar para reiniciar el secado al siguiente día, evitándose pérdidas del 2 al 5 % que ocurren durante el recojo en mantas para guardarlo durante la noche o cuando llueve.
- Evita las pérdidas usuales en el proceso de secado natural que pueden llegar al 5%, por caída de granos durante el recojo.
- Mejora la calidad del producto lo que puede asegurar un mejor precio para los agricultores que practican un buen secado. La experiencia muestra que un grano de mejor calidad obtiene un precio mayor al normal, esto significa un incremento entre 10 a 30% mas del valor normal.

Tabla 13: Costos corrientes del secador solar prototipo de café por año.

ITEM	Costo ( S/. )	Costo ( US \$ )
Renovación del plástico	55,00	18,96
Consumo de electricidad (250 Kwh/año)	102,50	43,44
Mantenimiento del equipo	35,00	12,06
<b>TOTAL</b>	<b>192,50</b>	<b>66,37</b>

Elaborado por el tesista

El tiempo de vida del secador solar prototipo de café es de 8 años, teniendo en cuenta el tiempo de duración de la estructura, del ventilador y el cambio de por lo menos 3 veces de la cubierta plástica. El valor residual del secador solar prototipo será nulo;  $L = 0$ .

### 3.3.2. Cálculo de la anualidad de gastos del secador solar prototipo

Utilizando la fórmula de anualidad:

$$AN = Cc + ( I_0 - L ) FR ( i, T ) + L$$

Donde:

$Cc$  : Costos corrientes de funcionamiento

$I_0$  : Inversión inicial

$FR$ : Factor de recuperación.

$i$  : interés

$T$  : tiempo

$L$  : valor residual

Utilizando la fórmula y ubicando en la tabla de factor de recuperación en el anexo (tabla 16) , considerando precios constantes y una tasa de descuento de  $(i)$  del 10% se tiene una anualidad en soles para el secador solar prototipo de:

$$AN = 192,5 + (1099,5 - 0) \times (0,149) + 0$$

$$AN = 356,32$$

- Beneficio por reducción de mermas y ganancia por la calidad.

Considerando que las mermas en el secado varían entre 2 a 5% y que en el año obtienen de 3 hectáreas un aproximado de 2500 kg de café pergamino, para una evaluación financiera del uso del secador solar prototipo de café es necesario suponer una situación concreta. Un agricultor promedio de Omia que posee 3 hectáreas cultivables de café, cosechará al año aproximadamente 12500 kg de café cerezo de lo cual pierde por proceso de despulpado, fermentado y lavado aproximadamente el 60 %, teniendo al final un promedio de 5000 kg listos para secar, si de esto pierde el 2% en el secado el agricultor pierde en el año aproximadamente 100 kg, que si lo lleváramos a pergamino seco sería aproximadamente 52,5 kg de café listo para comercializar, lo que representa para él una pérdida de aproximadamente S/. 300,00 tomando en cuenta el precio promedio del café del 2007 que fue de S/. 5,5 por kg de café pergamino seco, entonces deducimos que la pérdida es cercana al gasto anual y si a eso le añadimos que el mismo agricultor recibe mínimo el 10% del precio adicional por ser de buena calidad, obtenemos que gana alrededor de S/. 0,55 adicional por kg; de los 2625 kg finales que tuvo para comercializar le dio una ganancia mínima de S/. 1443,75 por concepto de calidad del producto. Se deduce que el gasto anual representa aproximadamente el 20% de los ingresos adicionales que obtendría el agricultor por el uso de este secador solar

prototipo de café, convirtiéndose en una buena alternativa para mejorar sus ingresos.

Tabla 14: Comparación de ingresos entre caficultores en base al tipo de secado que emplean.

<b>ITEM</b> <b>(En campaña cafetalera)</b>	<b>Caficultor A</b> <b>(Con secador solar prototipo)</b>	<b>Caficultor B</b> <b>(Secado tradicional)</b>
Cosecha de café cerezo en 3 hectáreas cultivables	12500,00 kg	12500,00 kg
*Cantidad de café listo para ser secado	5000,00 kg	5000,00 kg
Pérdidas por mermas (2%) en el secado	0,00 kg	100,00 kg
Café pergamino seco listo para comercializar 52,5% (*)	2625,00 kg	2572,5 kg
Ingresos por venta del café considerando S/. 5,5 x kg	S/.14437,50	S/. 14148,75
Plus adicional por calidad 10% (S/. 5,5) = S/.0,55 x kg	S/.1443,75	-----
Egresos por anualidades de operación del prototipo	- S/. 356,32	-----
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 15524,93</b>	<b>S/. 14148,75</b>

Elaborado por el tesista

Tabla 15: Resultados de análisis físico y sensorial de la muestra de café secado el secador solar prototipo de café.

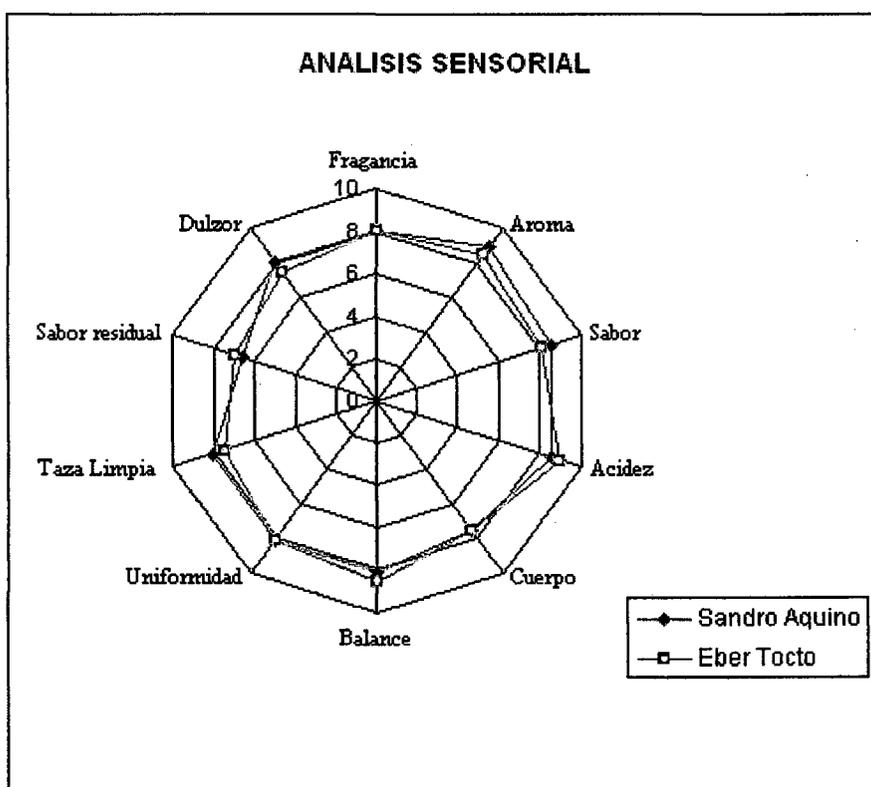
Nombre: Walter Emilser Gonzales Bringas  
 Agrupación o Empresa UNAT-A  
 Zona: Caldera  
 Distrito: Omia  
 Tipo de caficultura: Tradicional  
 Variedades: *Typica y Caturra*  
 Provincia: Rodríguez de Mendoza  
 Región: Amazonas  
 Altura: 1640 msnm

Catación SCAA	Humedad	Malla 16 arriba	Malla 17 arriba.	Brocados en 100 gr.	Rendimiento en el pilado	Color de catación	Cantidad de tazas
80	11.60%	76.50%	51%	0	78.50%	54 Agtron	5

CATA SCAA	
Este café 80	

> 90	Extraordinario
80-89,9	Excelente
70-79,9	Muy Bueno
60-69,9	Bueno
50-59,9	Corriente
< 50	Deficiente

Calidad	Intensidad
10: sublime	intenso
9:excelente	
8:muy bueno	
7:bueno	fuerte
6:promedio	
5: regular	medio
4:malo	
3.muy malo	débil
2:pésimo	
1:asqueroso imperceptible	



Defectos Mayores	Defectos Agronómicos	Defectos de recolección	Defectos de beneficio	Defectos de secado	Defectos genéticos	Materia extraña e impurezas	Otros defectos
0.1%	7.2%	1.2%	3.9%	0%	0%	0%	0%

Conclusión general : Café de buena Taza

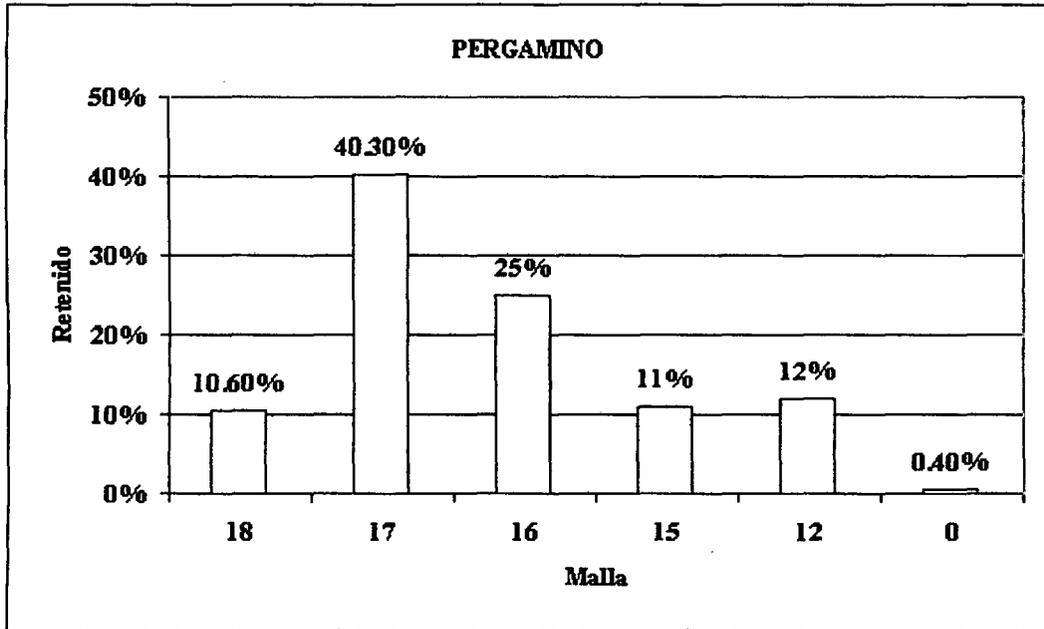
### PROCESO INDUSTRIAL

Tipo de Beneficio Tradicional Beneficio húmedo  
 Secado En secador solar prototipo de café

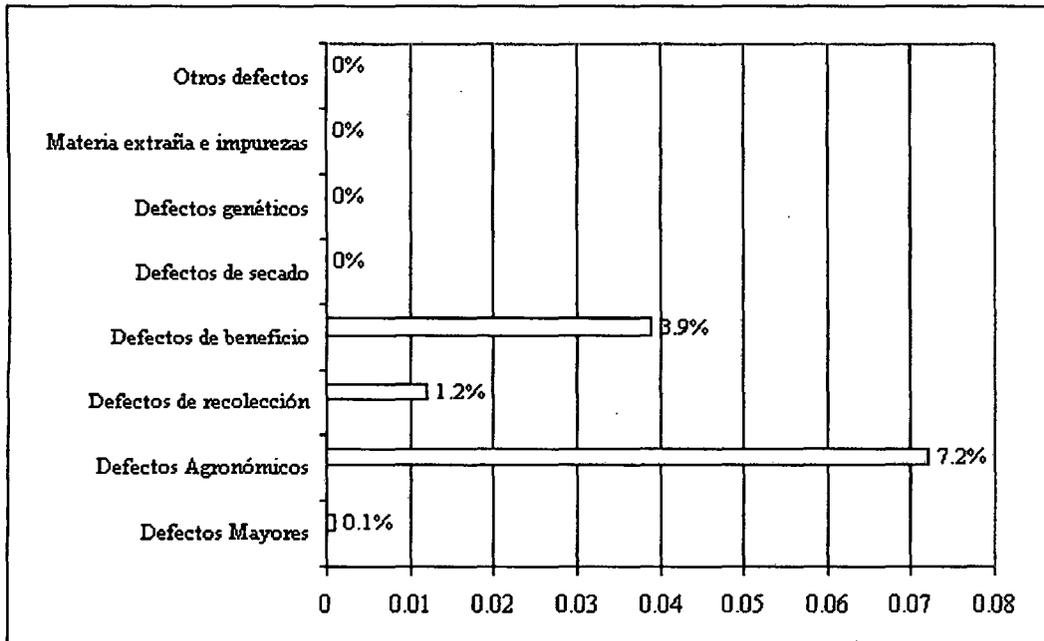
Continuación de la tabla 15:

**CARACTERÍSTICAS DEL GRANO DE CAFÉ**

Aspecto y color del pergamino : ok  
 Humedad : 11.60%  
 Temperatura: 26 °C  
 Olor del pergamino : característico  
 Rendimiento al pilar: 78.70%



**PONDERACIÓN DE LOS DEFECTOS SEGÚN ORIGEN DEL DEFECTO**



La ponderación de los defectos muestra visualmente el origen de los defectos dando una idea donde se encuentran los problemas más graves del café y por lo tanto donde se deben tomar acciones o correcciones para mejorar la calidad del café.

Continuación de la tabla 15:

**DESCRIPCION DE LOS DEFECTOS EN EL BENEFICIO HUMEDO**

		Conteo	Peso (gr.)
<b><i>Defectos Recolección</i></b>			
Inmaduro y/o paloteado		0	0
Película manchada severa		0	0
Película manchada leve		19	2.4
<b><i>Defectos Beneficio</i></b>			
Mordido o cortado		44	6.4
Majado		18	2.2
Lunares y pecas		0	0
<b><i>Defectos Secado</i></b>			
Cristalizado		0	0
Flojo		0	0
Germen o embrión muerto		0	0
Decolorado veteado		0	0
Decolorado sobresecado		0	0

Fuente : Resultados de análisis físico muestra MB1 en el Laboratorio de CEPICAFÉ

**CONCLUSIÓN:**

El análisis realizado a la muestra MB1 nos muestra un café de buena taza con algunos defectos en la etapa del beneficio húmedo que afectaron su calidad , cabe señalar que en la operación de secado, parte fundamental , en la que se tuvo mas interés no se registro ningún defecto, lo que recomienda un mejor control de las etapas anteriores lo que garantizará un café de alta calidad

#### IV. DISCUSIÓN

La Figura 10 ilustra los perfiles de temperaturas en el secador solar prototipo de café. estas curvas siguen una tendencia proporcional a la irradiación solar, aunque pequeñas fluctuaciones de esta variable no afectan de forma inmediata el estado térmico del prototipo debido a la inercia térmica del equipo, lo que favorece al secado del café.

Las curvas de secado obtenidas experimentalmente, mostradas en la figura 12 y 16, del secado en el secador solar prototipo tienen la forma característica de secado solar.

Debido a la falta de equipo de medición para medir la radiación solar en la zona de construcción, para el diseño del colector solar, se tuvo que tomar en cuenta datos del atlas solar de SENAMHI del año 2003, según información vertida por medios de comunicación especializados esto ha variado de acuerdo a los últimos reportes de cambios climáticos severos ocurridos en el planeta.

En base a la Figura 10, se deduce que hay un calentamiento de todo el sistema, alcanzándose en promedio  $43.5^{\circ}\text{C}$ , durante los tres días de operación, para el aire de secado. La radiación solar influye directamente sobre la temperatura alcanzada en el secador solar.

En la Figura 12 se aprecia que el café se ha secado en tres días, y en ellos se nota una etapa de secado a velocidad constante y una etapa a velocidad decreciente. La explicación a esto es que durante las horas de no operación del

secador solar por reducción o falta de radiación solar, la humedad del interior del grano sale hacia la superficie equilibrándose en todo el grano, por tanto, en cada nuevo día se presentaban las dos nuevas etapas atenuándose cada día.

Partiendo de 94 kg de café oreado durante 30 minutos y 49,5% de humedad, en el primer día de secado se alcanzó a las 2,5 horas una humedad crítica de 1,16 kgH<sub>2</sub>O/kg ss y una humedad de equilibrio de 0,89 kg H<sub>2</sub>O/kg ss. En el segundo día, a las 11 horas de secado( contadas desde el día 1) se obtuvo una humedad crítica de 0,63kgH<sub>2</sub>O/kg ss y una humedad de equilibrio de 0,40 kgH<sub>2</sub>O/ kg ss. En el tercer día a las 18,5 horas totales de secado se alcanzó una humedad crítica de 0,32 kgH<sub>2</sub>O/ kg ss y una humedad de equilibrio de 0,25 kgH<sub>2</sub>O/ kg ss. En este momento el café llegó a una humedad final de 11,8%.

De las Figuras 17 a la 19 se deduce que el secado en el día 1 fue en mayor velocidad que en los otros días de operación del secador solar prototipo.

El café secado en el secador solar prototipo tenía las siguientes características de calidad en lo físico no se detectaron defectos por secado y en lo sensorial tampoco se hallaron olores extraños producto de un mal secado, encontrándose algunos defectos en otras etapas, en general se tuvo un café de buena calidad

En cuanto al costo de construcción y operación del secador solar prototipo, podemos mencionar que es recuperable si lo comparamos con la forma de secado tradicional (sobre mantas expuestas al sol), puesto que incrementa la calidad del café lo que redundara en mayores ingresos para el caficultor.

## V. CONCLUSIONES

1. En el secador solar prototipo para café se trataron batch de 94 kg de café recién lavado y oreado durante 30 minutos, reduciéndose su humedad desde 49,5% hasta 11,8% en 21 horas de operación discontinua a lo largo de tres días, con un aire de secado a una temperatura promedio de 50°C.
2. Durante el primer día de operación de secado se logro disminuir la humedad a mayor velocidad que los otros días.
3. Los resultados experimentales de cada día de operación de secado permiten observar la forma típica de la curva de secado: una etapa a velocidad constante y otra etapa a velocidad decreciente.
4. La inversión en la construcción y operación del secador solar prototipo lo puede recuperar rápidamente el caficultor porque el café secado en este equipo será de mayor calidad y precio.
5. Los materiales para construir el secador solar prototipo para café se encuentra disponibles en la zona lo que hace fácil su construcción.
6. El secador solar prototipo para café, usa energía renovable para la calefacción del aire de secado, se constituye en un equipo adecuado para reducir la contaminación ambiental.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Es de vital importancia, que nuestra región implemente un sistema de monitoreo ambiental a través de estaciones meteorológicas bien equipadas que brinden información detallada y confiable lo que servirá como una base importante de información tanto para proyectos de investigación como el de este tipo, como para prever desastres naturales ocasionados por cambios climáticos severos; también para el planeamiento de miles de agricultores, para el mejor manejo de sus parcelas.
2. Es necesario seguir insistiendo en que hay que dirigir esfuerzos hacia la investigación del aprovechamiento de la energía solar , desarrollar estudios basados en nuevos materiales y procesos de fabricación termosolares que mejoren la eficiencia de los dispositivos solares con los que contamos en la actualidad.
3. Es muy importante dirigir nuestra atención hacia un desarrollo potencial y sostenible de las energías renovables con el fin de aliviar en algo la aguda crisis ambiental que esta pasando el planeta estos últimos años y paralelamente buscar alternativas económicas al uso de la energía.
4. Transferir esta tecnología de secado de café a los agricultores para que incrementen la calidad del café en grano que comercializan.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

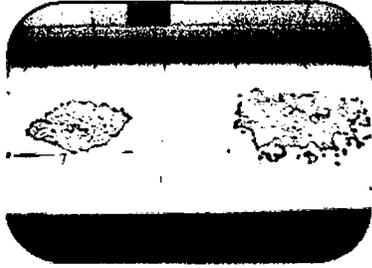
1. Alvarez , J. R.,Lopez, R. y Cardona, 1978. Pérdidas causadas por el secado excesivo de café. Colombia. Avance Técnico N°84. Cenicafe.
2. Berrueta, V., F. Limón, J. L. Fernández-Zayas y L. Soto-Pinto. 2003. Participación Campesina en el Diseño y Construcción de un Secador Solar para Café. Agrociencia. México Vol. 37 : 95-106.
3. Blaga A. 1986 . Use of Plastics. Solar Energy . EEUU Vol 21, pag 331-338.
4. Close,D.J. 1963 . Solar air heaters for low and moderate temperatura applications . Solar Energy , Vol 7, N° 3 EEUU
5. Columbus ,M y Pulgarín G. 2002 . Proyecto de Producción de Café Orgánico Para la Exportación como una Nueva Alternativa Comercial para Ecuador,Tesis FCE - UL, Guayaquil , Ecuador.
6. Corvalan , R.,Horn, M. , Roman ,R.,Saravia,L. 1992. Ingeniería de Secado Solar. CYTED Salta-Argentina.
7. Duffie and Beckman. 1974, Solar Engineering of Termal Process . Harrisville-EEUU.
8. Fonseca F., S.,1998. Análisis de Alternativas de Utilización de Secadores Solares en el Proceso de Beneficio de Café, Tesis de Maestría en Ingeniería de Procesos, Universidad de Oriente – Bolivia
9. Hollands, K.G.T, Shenen, E.C.1988 . Optimization of flowPassage Geometry for Air-Heating Solar Collectors. University of Waterloo, Ontario – Canada
10. Hottel ,H .C, Whillier A . 1955 . Evaluation of Flat Plate Solar Collector Performance . The Scientific Basis, pag. 74-104. Arizona-EEUU

11. Loewer, Bridges, Bucklin, A. On-farm drying and storage systems. St. Joseph, MI. Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas, EEUU. p.1994, 560.
12. Mc. Adams, W. 1985. Transmisión de Calor 2da Edición .Editorial Mac Graw-Hill, New York-EEUU
13. Mayo, E., Horn M., Espinoza R. 1991. Teoría y Práctica del Secado Solar. CER – UNI y GTZ Lima – Perú.
14. Parker L.,Blaine F. 1981. Derivation of efficiency and loss factors for solar air heaters.Solar Energy, Vol 26 . EEUU
15. Organización Internacional del Café (OIC) 1998. Informe “Mejora de la calidad del café mediante la prevención de la formación de moho” Londres-Inglaterra.
16. Paredes y Ponce.1994. “Efecto de la Velocidad y Temperatura del Aire en el Tiempo de Secado de Maíz en un Secador Solar” Trujillo-La Libertad. Tesis FIQ - UNT.
17. Portillo, Pedro 1988. “Energía Solar”, Editorial Pirámide , Madrid- España
18. Silva, j. S.; Lacerda Filho.1984 “ Construcción de secador para productos agrícolas”. Brasil: Consejo de Extensión de la Universidad Federal de Viñosa. Informe técnico no. 41,1984, p.17.
19. Whillier, A. 1964 Performance of black-painted solar air heaters of conventional design. Solar Energy,Vol 8 , EEUU.
20. Specialty Coffee Association of America (SCAA).2005. *Acerca de SCAA*. Disponible en: [http://www.scaa.org/about\\_scaa.asp](http://www.scaa.org/about_scaa.asp).
21. X Simposio Peruano de Energía Solar. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cuzco, Cuzco-Perú. 2003

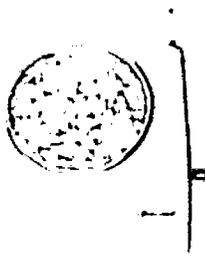
# **ANEXOS**

# Fotograma 1: Análisis de humedad inicial y agua a evaporar en el laboratorio

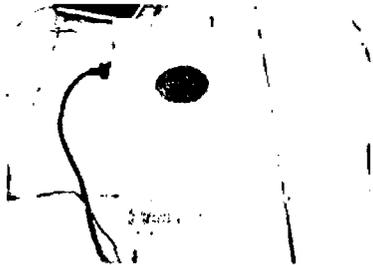
## Preparación de la muestra



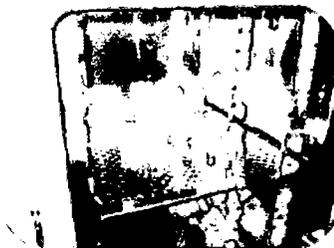
## Pesado de muestra



## Determinación de la humedad inicial



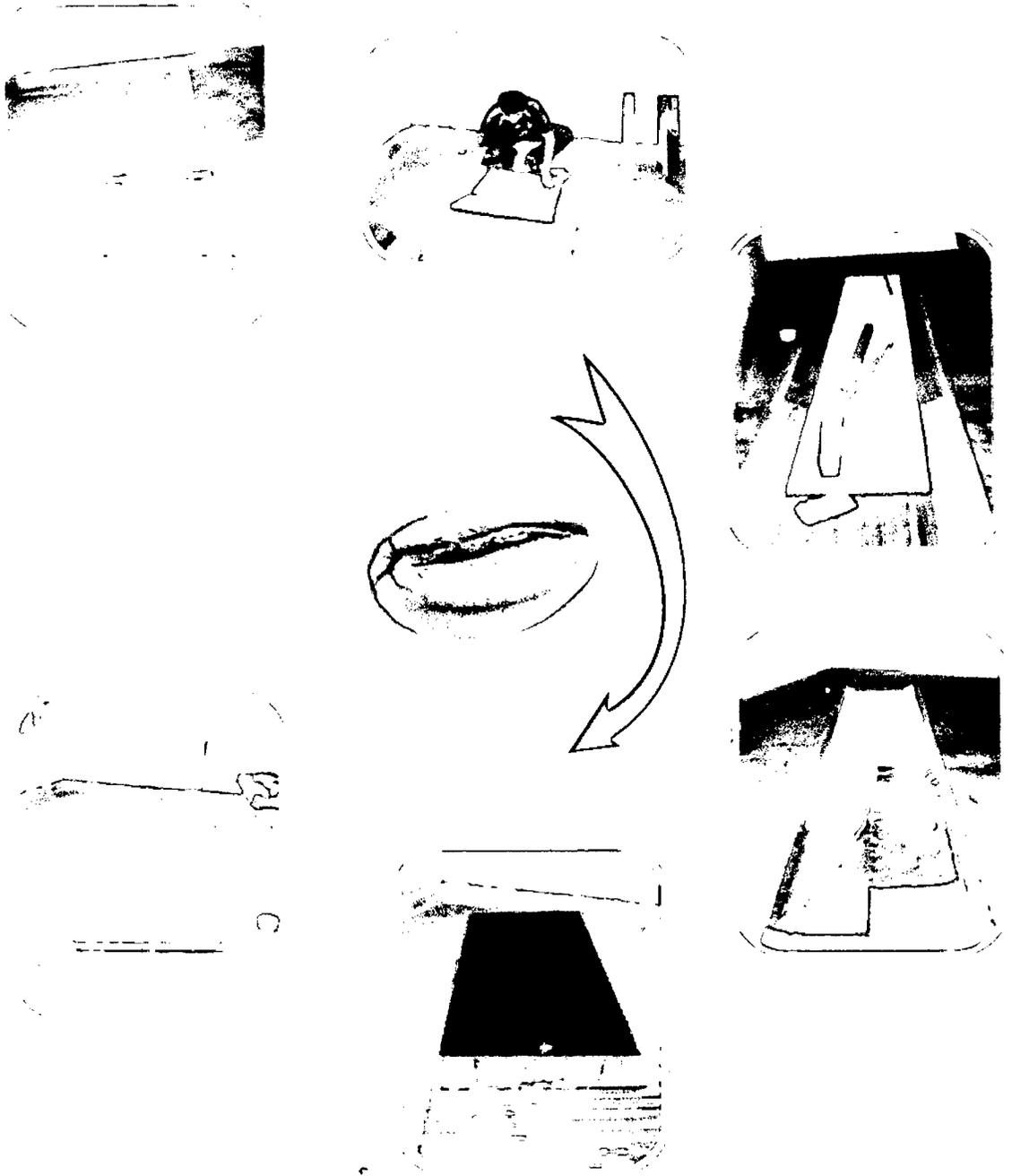
## Determinación de la cantidad de agua a extraer



Fotograma 2: Secuencia de la construcción de la cámara de secado

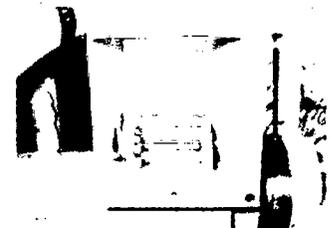
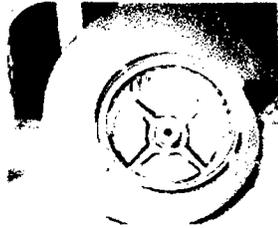


Fotograma 3: Secuencia de la construcción del colector solar

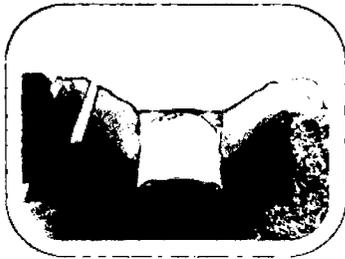


Fotograma 4: Componentes auxiliares del prototipo secador solar.

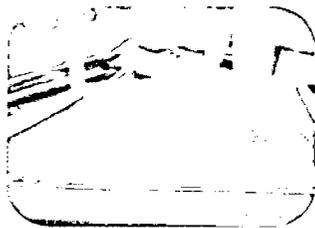
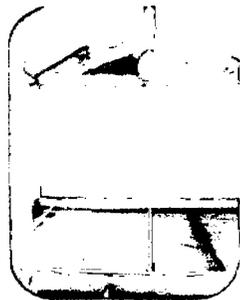
El ventilador



Los difusores



Bandeja de producto



El sistema de recirculación



Fotograma 5: Detalles de la construcción del prototipo de secador solar .

Detalles de construcción



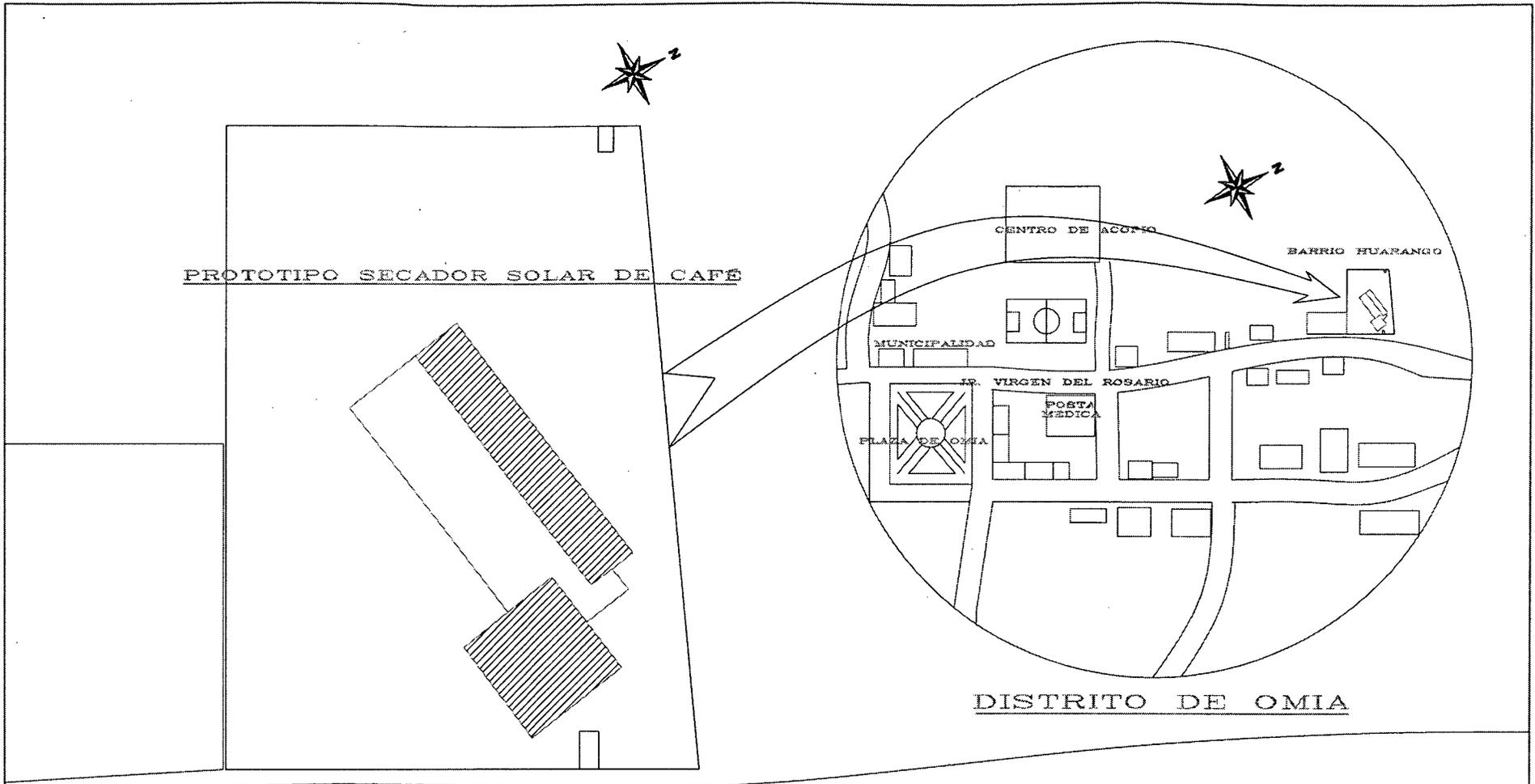
Prototipo secador solar terminado

Tabla 16: Factor de recuperación FR (i, T)

Tabla 11.4 : Factores de recuperación FR(i,T)

i (%) T años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	1.010	1.020	1.030	1.040	1.050	1.060	1.070	1.080	1.090	1.100	1.110	1.120	1.130	1.140	1.150	1.160	1.170	1.180	1.190	1.200	1.210	1.220	1.230	1.240	1.250	1.260	1.270	1.280
2	0.507	0.515	0.522	0.530	0.537	0.545	0.553	0.560	0.568	0.576	0.583	0.591	0.599	0.607	0.615	0.623	0.630	0.638	0.646	0.654	0.662	0.670	0.678	0.686	0.694	0.702	0.710	0.718
3	0.340	0.346	0.353	0.360	0.367	0.374	0.381	0.388	0.395	0.402	0.409	0.416	0.423	0.430	0.438	0.445	0.452	0.459	0.467	0.474	0.482	0.489	0.497	0.504	0.512	0.519	0.527	0.535
4	0.256	0.262	0.269	0.275	0.282	0.288	0.295	0.301	0.308	0.315	0.322	0.329	0.336	0.343	0.350	0.357	0.364	0.371	0.379	0.386	0.393	0.401	0.408	0.415	0.423	0.431	0.439	0.446
5	0.206	0.212	0.218	0.224	0.231	0.237	0.243	0.250	0.257	0.263	0.270	0.277	0.284	0.291	0.298	0.305	0.312	0.319	0.327	0.334	0.341	0.349	0.356	0.364	0.371	0.379	0.387	0.394
6	0.172	0.178	0.184	0.190	0.197	0.203	0.209	0.216	0.222	0.229	0.236	0.243	0.250	0.257	0.264	0.271	0.278	0.285	0.293	0.300	0.309	0.315	0.323	0.331	0.338	0.346	0.354	0.362
7	0.148	0.154	0.160	0.166	0.172	0.179	0.185	0.192	0.198	0.205	0.212	0.219	0.226	0.233	0.240	0.247	0.254	0.262	0.269	0.277	0.285	0.292	0.300	0.308	0.316	0.324	0.332	0.340
8	0.130	0.136	0.142	0.148	0.154	0.161	0.167	0.174	0.180	0.187	0.194	0.201	0.208	0.215	0.222	0.230	0.237	0.245	0.252	0.260	0.268	0.276	0.284	0.292	0.300	0.308	0.315	0.325
9	0.116	0.122	0.128	0.134	0.140	0.147	0.153	0.160	0.166	0.173	0.180	0.187	0.194	0.202	0.209	0.217	0.224	0.232	0.240	0.248	0.256	0.264	0.272	0.280	0.288	0.297	0.305	0.314
10	0.105	0.111	0.117	0.123	0.129	0.135	0.142	0.149	0.155	0.162	0.169	0.177	0.184	0.191	0.199	0.206	0.214	0.222	0.230	0.238	0.246	0.254	0.263	0.271	0.280	0.288	0.297	0.305
11	0.095	0.102	0.108	0.114	0.120	0.126	0.133	0.140	0.146	0.154	0.161	0.168	0.175	0.183	0.191	0.198	0.206	0.214	0.222	0.231	0.239	0.247	0.256	0.264	0.273	0.282	0.291	0.299
12	0.088	0.094	0.100	0.106	0.112	0.119	0.125	0.132	0.139	0.146	0.154	0.161	0.169	0.176	0.184	0.192	0.200	0.208	0.216	0.225	0.233	0.242	0.250	0.259	0.268	0.277	0.286	0.295
13	0.082	0.088	0.094	0.100	0.106	0.113	0.119	0.126	0.133	0.140	0.148	0.155	0.163	0.171	0.179	0.187	0.195	0.203	0.212	0.220	0.229	0.237	0.246	0.255	0.264	0.273	0.282	0.291
14	0.076	0.082	0.088	0.094	0.101	0.107	0.114	0.121	0.128	0.135	0.143	0.150	0.158	0.166	0.174	0.182	0.191	0.199	0.208	0.216	0.225	0.234	0.243	0.252	0.261	0.270	0.279	0.289
15	0.072	0.077	0.083	0.089	0.096	0.103	0.109	0.116	0.124	0.131	0.139	0.146	0.154	0.162	0.171	0.179	0.187	0.196	0.205	0.213	0.222	0.231	0.240	0.249	0.259	0.268	0.277	0.287
16	0.067	0.073	0.079	0.085	0.092	0.099	0.105	0.113	0.120	0.127	0.135	0.143	0.151	0.159	0.167	0.176	0.185	0.193	0.202	0.211	0.220	0.229	0.238	0.247	0.257	0.266	0.276	0.285
17	0.064	0.070	0.076	0.082	0.088	0.095	0.102	0.109	0.117	0.124	0.132	0.140	0.148	0.156	0.165	0.174	0.182	0.191	0.200	0.209	0.218	0.227	0.237	0.246	0.255	0.265	0.274	0.284
18	0.061	0.066	0.072	0.079	0.085	0.092	0.099	0.106	0.114	0.121	0.129	0.137	0.146	0.154	0.163	0.171	0.180	0.189	0.198	0.207	0.217	0.226	0.235	0.245	0.254	0.264	0.273	0.283
19	0.058	0.063	0.069	0.076	0.082	0.089	0.096	0.104	0.111	0.119	0.127	0.135	0.144	0.152	0.161	0.170	0.179	0.188	0.197	0.206	0.215	0.225	0.234	0.244	0.253	0.263	0.272	0.282
20	0.055	0.061	0.067	0.073	0.080	0.087	0.094	0.101	0.109	0.117	0.125	0.133	0.142	0.151	0.159	0.168	0.177	0.186	0.196	0.205	0.214	0.224	0.233	0.243	0.252	0.262	0.272	0.282
21	0.053	0.058	0.064	0.071	0.078	0.085	0.092	0.099	0.107	0.115	0.123	0.132	0.140	0.149	0.158	0.167	0.176	0.185	0.195	0.204	0.213	0.223	0.233	0.242	0.252	0.262	0.271	0.281
22	0.050	0.056	0.062	0.069	0.076	0.083	0.090	0.098	0.105	0.114	0.122	0.130	0.139	0.148	0.157	0.166	0.175	0.184	0.194	0.203	0.213	0.222	0.232	0.242	0.251	0.261	0.271	0.281
23	0.048	0.054	0.060	0.067	0.074	0.081	0.088	0.096	0.104	0.112	0.121	0.129	0.138	0.147	0.156	0.165	0.174	0.184	0.193	0.203	0.212	0.222	0.232	0.241	0.251	0.261	0.271	0.281
24	0.047	0.052	0.059	0.065	0.072	0.079	0.087	0.095	0.103	0.111	0.119	0.128	0.137	0.146	0.155	0.164	0.174	0.183	0.193	0.202	0.212	0.221	0.231	0.241	0.251	0.261	0.270	0.280
25	0.045	0.051	0.057	0.064	0.071	0.078	0.085	0.093	0.101	0.110	0.118	0.127	0.136	0.145	0.154	0.164	0.173	0.182	0.192	0.202	0.211	0.221	0.231	0.241	0.250	0.260	0.270	0.280
26	0.043	0.049	0.055	0.062	0.069	0.076	0.084	0.092	0.100	0.109	0.117	0.126	0.135	0.144	0.154	0.163	0.172	0.182	0.192	0.201	0.211	0.221	0.231	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280
27	0.042	0.048	0.054	0.061	0.068	0.075	0.083	0.091	0.099	0.108	0.117	0.126	0.135	0.144	0.153	0.163	0.172	0.182	0.191	0.201	0.211	0.221	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280
28	0.041	0.047	0.053	0.060	0.067	0.074	0.082	0.090	0.098	0.107	0.116	0.125	0.134	0.143	0.153	0.162	0.172	0.181	0.191	0.201	0.211	0.220	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280
29	0.039	0.045	0.052	0.058	0.065	0.073	0.081	0.089	0.098	0.106	0.115	0.124	0.133	0.143	0.152	0.162	0.171	0.181	0.191	0.201	0.210	0.220	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280
30	0.038	0.044	0.051	0.057	0.065	0.072	0.080	0.088	0.097	0.106	0.115	0.124	0.133	0.142	0.152	0.161	0.171	0.181	0.191	0.200	0.210	0.220	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280

# PLANOS



JR. VIRGEN DEL ROSARIO

LOCALIDAD: OMIA	DIRECCION: VIRGEN DEL ROSARIO N°728	PROTOTIPO SECADOR SOLAR DE CAFÉ			LAMINA:
PROVINCIA: RODRIGUEZ DE MENDOZA	DISTRITO: OMIA	PLANO:	UBICACIÓN		UL-01
DEPARTAMENTO: AMAZONAS	ESC: ESQUEMA	DIB: W.E.G.B.	VºBº: Ma.C M.A.B.C.	FECHA: FEB-2008	

## APÉNDICE A-1

### CÁLCULO DEL DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE

#### a) Datos Requeridos

- **Condiciones ambientales:**

Temperatura Ambiental ( $t_a$ ) .....	24,8 °C
Humedad relativa del ambiente (Hra).....	87%
Velocidad del viento ( $V_{vie}$ ).....	3 m/s (asumido)
Número de horas de sol.....	9 (asumido)
Radiación solar diaria acumulada promedio.....	5,5 kw-h/m <sup>2</sup>

- **Condiciones del Aire en calentador solar:**

Flujo de aire.....	374,93 Kg/h
Temperatura de aire de ingreso al colector solar .....	25 °C (asumido)
Temperatura de aire a la salida colector solar .....	43 °C (asumido)

- **Propiedades del aire:**

Densidad del aire a 25 °C .....	1,187 Kg / m <sup>3</sup>
a 43 °C.....	1,12 Kg / m <sup>3</sup>
Conductividad térmica del aire a 25 °C .....	0,026 W/m.K
a 43 °C .....	0,0275 W/m.K
Conductividad térmica del aire a 25 °C .....	1,006 W/m.K
a 43 °C .....	1,007 W/m.K

- **Materiales del Colector Solar:**

Recubrimiento de pintura negro mate,  
absortividad..... 0,97

Superficie inferior de papel metálico ,  
reflectividad..... 0,20

Cubierta transparente de (PEBD)  
Transmisividad..... 0,88

Emisividad de (PEBD)  
(asumido igual al del vidrio común) ..... 0,88

Emisividad del recubrimiento  
de pintura negro mate..... 0,97

Espesor del aislamiento.....0,025 m(1")

Conductividad térmica del teknopor.....0,036 W/m.°C

A continuación se procede a ejecutar los pasos indicados en la fig. 5.

**b) Cálculo del número de Nusselt.-** Asumimos previamente que la temperatura de la superficie absorbente, (tp) es igual a 75°C, mientras que la temperatura de la superficie inferior o reflectante (tr) es de 50°C.

Por tanto,

$$Nu = 0,0225 \times Re_f^{0.8} \times Pr_f^{0.33}$$

Para  $t_f = (75 + 34) / 2 = 54,5$  ;  $Pr = 0,7032$  ;  $\nu = 1,98 \times 10^{-5}$

$$Nu = 0,0200 \frac{(\nu \times Dh)}{\nu^{0.8}}^{0.8}$$

$$Nu = 119,64 (v \times Dh)^{0,8}$$

**c) Cálculo del coeficiente de convección  $h_2$**

$$h_2 = Nu \times \frac{K}{Dh} \quad ; \quad h_2 = \frac{4,251 (m^\circ / \rho)^{0,8}}{Dh^{1,8}} \quad ; \text{ o también}$$

$$h_2 = 3,392 \times \frac{V^{0,8}}{(m^\circ / \rho)^{0,1}}$$

$$\text{En nuestro caso } (m^\circ / \rho) = \frac{374,93 \text{ kg./h}}{3600 \times 1,15 \text{ kg/m}^3} = 0,090 \text{ m}^3/\text{s}$$

Al asumir un diámetro hidráulico ( $Dh$ ) igual a 0,22 m, obtendremos

$$h_2 = 9,452 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k} \text{ y una velocidad de } 2,66 \text{ m/s.}$$

Al comprobar que los valores encontrados para un diámetro hidráulico aproximado al tamaño que se proyectaba construir y comprobando resultados se encuentran entre intervalos recomendados.

Así tenemos que , para 0,090 m<sup>3</sup>/s y un  $h_2$  igual a 9,462 w/m<sup>2</sup> .k y una velocidad del aire dentro del colector solar de 2,66 m/s.

Con este valor de  $Dh$  (0.22m) se dimensionó la sección transversal del calentador .(ver fig. 5 y en le plano C-01 )

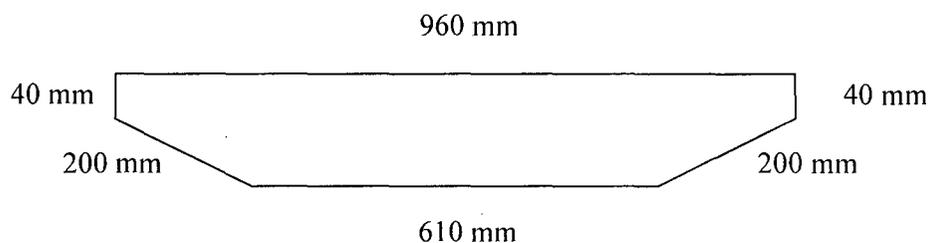


Figura 20 : Sección transversal de del colector solar

**d) Cálculo del coeficiente de emisividad (E)**

$$E = \frac{1}{\frac{1}{0,97} + \frac{1}{0,2} (0,960 / 1,170) - \frac{0,960}{1,170}} = 0,2320$$

**e) Cálculo del coeficiente radiativo equivalente (hr)**

$$hr = 4 \times \sigma \times \bar{T}^3 \times 1/B \times E$$

$$hr = 4 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (333)^3 \times \frac{1,170}{0,960} \times 0,2320 ]$$

$$hr = 2,368 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

$$\text{Donde: } \bar{T} = (75 + 50) / 2 + 273 = 333$$

$$\sigma : \text{constante de Boltzman} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$$

**f) Cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de calor entre la calamina absorbente y el flujo de aire (h)**

$$h = h_2 + \frac{1}{\frac{1}{h_3} + \frac{1}{hr}}$$

Para efecto de cálculo  $h_2 = h_3$

$$h = 9,452 + \frac{1}{\frac{1}{9,452} + \frac{1}{2,368}}$$

$$h = 11,3456 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

**g) Factor de transmisividad efectiva del conjunto (PEBD) transparente-calamina galvanizada ennegrecida (f).**

$$f = \tau \times a \times 0,86$$

$$f = 0,88 \times 0,97 \times 0,86$$

$$f = 0,734$$

**h) Coeficiente de transferencia de calor entre la calamina absorbente y el medio ambiente (Ut).**

De la formula :

$$U_t = \left[ \frac{N}{\frac{(344)}{TP} \frac{(TP-TA)^{0,31}}{N+fc}} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \left[ \frac{\sigma (TP + TA) (TP^2+TA^2)}{(Ep + 0.0425 (1-Ep) N)^{-1} + \frac{(2N + fc - 1) - N}{Ec}} \right]$$

Donde:

$$TP = 75 + 273 = 348 \quad \text{y,} \quad TA = 25 + 273 = 298$$

$$h_w = 5,7 + 3,8 \times 3 = 17,1$$

N = Número de cubiertas transparentes = 1

$$fc = (1,0 - 0,04 \times h_w + 5,0 \times 10^{-4} \times h_w^2) \times (1 + 0,058N) = 0,489$$

$$fc = 0,489 \quad ; \quad h_w = 17,1$$

$$U_t = 6,465 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

**i) Coeficiente por conducción del aislamiento (Ub).**

$$U_b = \frac{K}{e} I$$

I = No se utilizara ya que no hay incidencia de la radiación sobre el aislante

$$U_b = \frac{0,036 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}}{0,0254 \text{ m}} = 1,4173$$

$$U_b = 1,4173 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

**j) Coeficiente global de transferencia de calor (UI).**

$$U_I = U_t + U_b$$

$$U_I = 6,465 + 1,4173 = 7,882$$

$$U_I = 7,882 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

**k) Cálculo del Factor de Eficiencia de la Superficie Absorbente (F')**

$$F' = 1/(1+UI/h)$$

$$F' = (1 + 7,882 / 11,3436)^{-1}$$

$$F' = 0,59$$

En este nivel de cálculo, se chequea los valores de  $t_p$  y  $t_r$  mediante la aplicación de formulas :

$$t_p = \frac{I \times f + UI \times t_a + h \times t_2}{UI + h} = 50,24$$

$$t_r = \frac{t_p \times hr + h3 \times t_2}{hr + h3} = 44,45$$

Obtenemos  $t_p$  igual a 50,24 °C y  $t_r$  igual a 43,49 °C

**l) Cálculo del Flujo de Aire por Unidad de Área del Colector (G)**

$$G = \frac{F' \times UI}{Cp \times \ln \left[ 1 - \frac{t_2 - t_1}{I \times f / UI - (t_1 - t_a)} \right]}$$

Con los nuevos cálculos de las temperatura corregidas  $t_p = t_2$  ;  $t_r = t_1$  y

$$t_a = 24,8^\circ\text{C}$$

Tenemos:

$$hr = 1,813 \text{ w / m}^2 \cdot \text{C}$$

$$h = 19,45 \text{ w / m}^2 \cdot \text{C}$$

$$U_t = 5,53 \text{ w / m}^2 \cdot \text{C}$$

$$UI = 6,94 \text{ w / m}^2 \cdot \text{C}$$

$$F' = 0,62$$

De esto obtenemos un

$$G = 0,0238 \text{ kg/s.m}^2$$

1) Ahora con este flujo másico de aire hallamos el Área de l colector solar de

$$A = \frac{m \times \rho}{G}$$

$$A = \frac{0,090 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,15 \text{ kg} / \text{m}^3}{0,0238 \text{ kg/s.m}^2}$$

$$A = 4,34 \text{ m}^2$$

2 ) Eficiencia del colector solar par aire

ref. [ ]:

$$n = G \times C_p \times (t_2 - t_1) / I$$

$$n = 0,0238 \times 1006,5 \times (t_2 - t_1) / I$$

$$n = 0,0238 \times 1006,5 \times (43 - 26) / 550$$

$$n = 0,7021 \text{ (70\%)}$$

## **APÉNDICE A-2**

### **CÁLCULOS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA**

A continuación se presentan los cálculos de la caída de presión a través de un sistema comprendido por colector solar, ductos de recirculación y cámara de secado. Los cálculos presentados corresponden al punto o condición de diseño.

El sistema en consideración esta representado esquemáticamente en la Figura 21

# ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN DE COMPONENTES DEL PROTOTIPO SECADOR

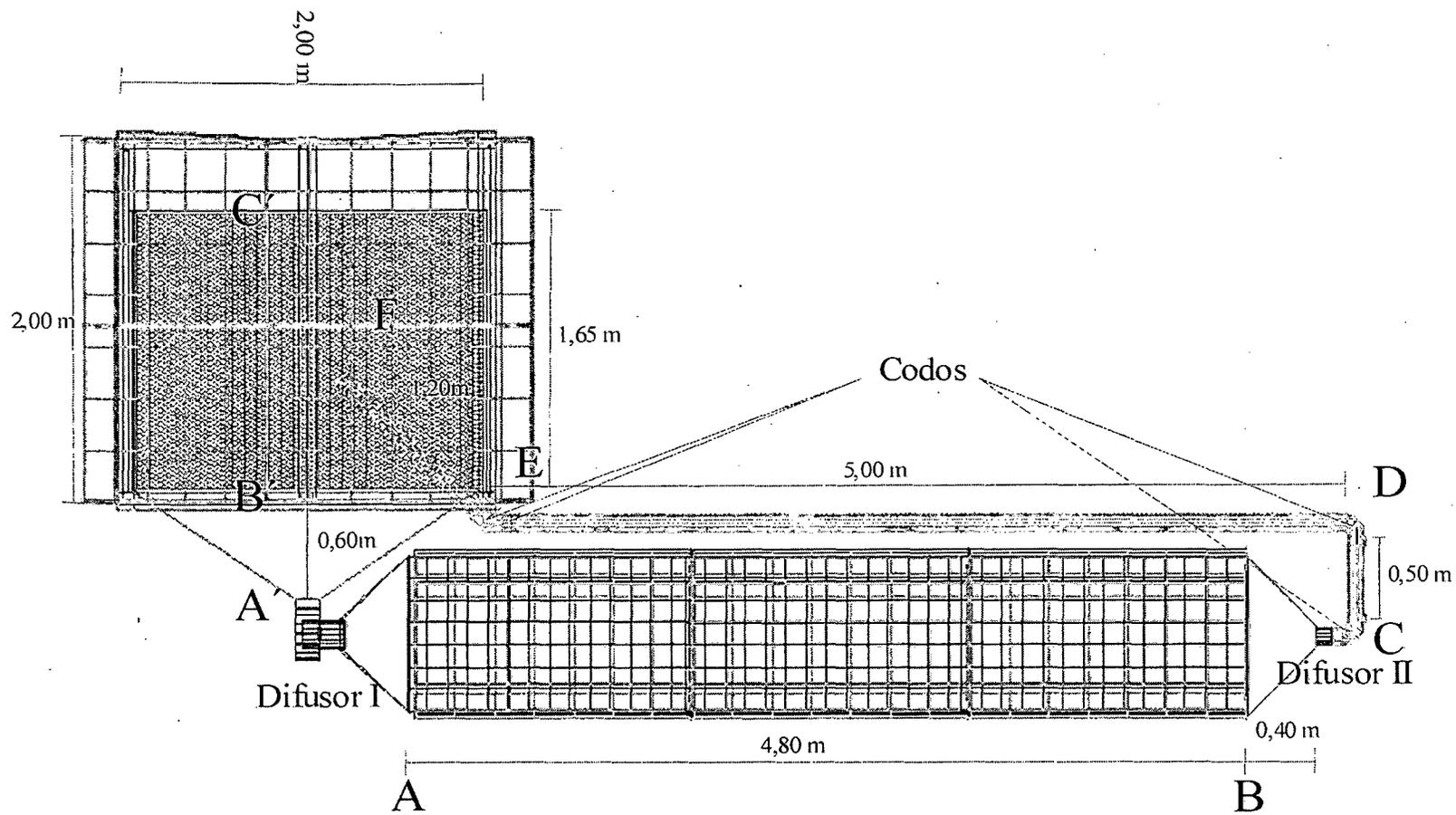


Figura 21: Disposición del secador solar prototipo de café

a) En el tramo A-B El cálculo de la pérdida de presión en los ductos se realizara con la ayuda de la ecuación de D'Arcy y del Diagrama de Moody. La Ecuación de D'Arcy es :

$$P_f = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \delta \cdot \frac{v^2}{2}$$

Donde:

$P_f$  : Caída de presión debida a la fricción en un ducto, en Pa.

$f$  : Coeficiente de pérdida de carga por fricción.

$\delta$  : Densidad del aire , Kg/m<sup>3</sup>

$D_h$  : Diámetro hidráulico del ducto, m

$L$  : Longitud del ducto, m.

- Datos a utilizar para el Ducto del Colector

Densidad de aire a temperatura promedio de entrada y

Salida en el ducto del colector (34°C).....1,1519 kg/m<sup>3</sup>

Viscocidad de aire a temperatura promedio de entrada y

Salida en el ducto del colector (34°C)..... 1,88 x 10<sup>-5</sup> kg/ms

Coeficiente de rugosidad.....0,15 mm

Diámetro hidráulico ..... 0,22m

Velocidad en el interior del ducto ..... 2,5 m/s

El número de Reynolds resulta:

$$Re = \frac{1,1519 \text{ kg/m}^3 \times 2,5 \text{ m/s} \times 0,22\text{m}}{1,88 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}}$$

$$Re = 33699,2 \approx 3,37 \times 10^4$$

El coeficiente de rugosidad relativa es:

$$\frac{K}{D_h} = \frac{0,15 \times 10^{-3} \text{ m}}{0,22\text{m}} = 6,8 \times 10^{-4}$$

En el diagrama de Moody, la intersección de la curva correspondiente a una rugosidad relativa de 0,0006 (ubicado por interpolación) con la recta vertical  $Re = 3,37 \times 10^4$  de termina un punto que corresponde a un coeficiente de rozamiento  $f = 0,025$ .

La pérdida de presión en el ducto sera:

$$P_f = \frac{0,025 \times 4,8\text{m} \times 1,1519 \text{ kg/m}^3 \times (2,5 \text{ m/s})^2}{0,22 \text{ m} \times 2}$$

$$P_f = 1,96 \text{ Pa} = 0,200 \text{ mma}$$

b) En el tramo C-D-E-F El cálculo de Datos a utilizar para los tubos rectos de la recirculación

Densidad de aire a temperatura promedio de entrada y salida

en el tubo de la recirculación(25°C).....1,18 kg/m<sup>3</sup>

Viscosidad de aire a temperatura promedio de entrada y salida

en el tubo de la recirculación (25°C)..... 1,79 x 10<sup>-5</sup> kg/ms

Coefficiente de rugosidad.....0,05 mm

Diámetro hidráulico ..... 0,1 m

Velocidad en el interior del ducto ..... 1,2 m/s

El número de Reynolds resulta:

$$Re = \frac{1,18 \text{ kg/m}^3 \times 1,2 \text{ m/s} \times 0,1\text{m}}{1,79 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}}$$

$$Re = 7910,61 \approx 7,9 \times 10^3$$

El coeficiente de rugosidad relativa es:

$$\frac{K}{D_h} = \frac{0,05 \times 10^{-3} \text{ m}}{0,1\text{m}} = 5,0 \times 10^{-4}$$

En el diagrama de Moody, la intersección de la curva correspondiente a una rugosidad relativa de 0,0005 (ubicado por interpolación) con la recta vertical  $Re = 7,9 \times 10^3$  de termina un punto que corresponde a un coeficiente de rozamiento  $f = 0,034$ .

La pérdida de presión en el tubo será:

$$P_f = \frac{0,034 \times 6,7 \text{ m} \times 1,18 \text{ kg/m}^3 \times (1,2 \text{ m/s})^2}{0,1 \text{ m} \times 2}$$

$$P_f = 1,93 \text{ Pa} = 0,19 \text{ mma}$$

c) Cálculo de pérdida de presión en codos que estará dado por:

Para nuestro caso el número de codos es 4 y todos los codos son codos de 90° iguales:

Diámetro ..... 0,1 m.

Radio ..... 0,05 m

Densidad a 27 °C ..... 1,18 kg/m<sup>3</sup>

Kf ..... 0,6

Hallamos la relación R / D

$$\frac{R}{D} = \frac{0,05}{0,2} = 0,25$$

$$P_s = K_f \cdot \delta \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$P_s = \frac{0,6 \times 1,18 \text{ kg/m}^3 \times (2 \text{ m/s})^2}{2} = 1,416$$

$$\text{En 4 codos } 4P_s = 5,66 \text{ Pa} = 0,58 \text{ mma}$$

d) Cálculo de pérdida por difusores de sección variable.

$$P_s = (1-n) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot \frac{\delta}{2}$$

Donde:

$P_s$  : Pérdida de presión a través de difusores.

$n$  : Coeficiente de recuperación.

$v_1$  : Velocidad en la sección de área menor.

$v_2$ : Velocidad en la sección de área mayor.

Para este caso tenemos dos difusores para los cuales, por ser distintos se harán los cálculos como difusor I y difusor II

- **Para el Difusor I Contracción**, se tiene los siguientes datos:

$$A_1 = 0,18 \times 0,18 = 0,0324 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,92 \times 0,06 = 0,0552 \text{ m}^2$$

$$L = 0,4$$

De esto se tiene para cálculos en tabla:

$$A_2 / A_1 = 1,7$$

$$L / a_1 = 2,2$$

De la Figura 22 se obtiene  $n = 0,8$

Se asume un caudal de aire de  $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$  con este caudal se determinara las velocidades de l aire en  $A_2$  y  $A_1$ ;  $T = 43 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_1 = (0,14 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0324 \text{ m}^2) = 4,32 \text{ m/s}$$

$$V_2 = (0,14 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0552 \text{ m}^2) = 2,53 \text{ m/s}$$

Finalmente tendremos

$$P_s = \frac{(1 - 0,8) \times [(4,32 \text{ m/s})^2 - (2,53 \text{ m/s})^2]}{2} \times 1,139 \text{ kg/ m}^3$$

$$P_s = 1,329 \text{ Pa} = 0,141 \text{ mma}$$

- **Para el Difusor II Expansión** se tiene los siguientes datos:

$$A_1 = 0,12 \times 0,12 = 0,014 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,92 \times 0,06 = 0,0552 \text{ m}^2$$

$$L = 0,4$$

$$a_1 = 0,12$$

De esto se tiene para cálculos en tabla.

$$A_2 / A_1 = 3,94$$

$$L / a_1 = 3,33$$

De la Figura 22 se obtiene  $n = 0,04$

Se asume un caudal de aire de  $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$  con este caudal se determinara las velocidades de l aire en  $A_2$  y  $A_1$  ;  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_1 = (0,06 \text{ m}^3/\text{s} / 0,014 \text{ m}^2) = 4,3 \text{ m/s}$$

$$V_2 = (0,06 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0552 \text{ m}^2) = 1,08 \text{ m/s}$$

Finalmente tendremos

$$P_s = \frac{(1 - 0,04) \times [(4,3 \text{ m/s})^2 - (1,08 \text{ m/s})^2]}{2} \times 1,18 \text{ kg/m}^3$$

$$P_s = 9,81 \text{ Pa} = 1,0 \text{ mma}$$

e) Cálculo de la pérdida en el tramo A' - B' Difusor de entrada a la cámara.

Se tiene los siguientes datos:

$$A_1 = 0,14 \times 0,14 = 0,0196 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2,00 \times 0,06 = 0,12 \text{ m}^2$$

$$L = 0,6$$

$$a_1 = 0,14$$

De esto se tiene para cálculos en tabla.

$$A_2 / A_1 = 6,12$$

$$L / a_1 = 4,3$$

De la Figura 22 se obtiene  $n = 0,6$

Se asume un caudal de aire de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  con este caudal se determinara las velocidades de l aire en  $A_2$  y  $A_1$  ;  $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_1 = (0,2 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0196 \text{ m}^2) = 10,0 \text{ m/s}$$

$$V_2 = (0,2 \text{ m}^3/\text{s} / 0,12 \text{ m}^2) = 1,67 \text{ m/s}$$

Finalmente tendremos

$$P_s = \frac{(1 - 0,6) \times [(10,0 \text{ m/s})^2 - (1,67 \text{ m/s})^2] \times 1,11 \text{ kg/m}^3}{2}$$

$$P_s = 21,6 \text{ Pa} = 2,20 \text{ mma}$$

f) Cálculo de la pérdida de presión a través de la cama de secado

$$P_p = w \cdot d \cdot \delta \cdot \frac{v^2}{2}$$

Donde:

$P_p$  : Caída de la presión debido al paso a través del producto , Pa

$d$  : Espesor del producto , m.

$w$  : Coeficiente de pérdida especifica al paso del aire en ,  $\text{m}^{-1}$

$$P_p = \frac{39000 \text{ m}^{-1} \times 0,04 \times (1,67)^2}{2}$$

$$P_p = 217,53 \text{ pa} = 22,18 \text{ mma}$$

## CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL DEL SISTEMA

$\Sigma P$  = Pérdida de presión en todos los tramos

$$\Sigma P = (1,96 + 1,93 + 5,66 + 1,329 + 9,81 + 21,6 + 217,53) \text{ Pa.}$$

$$\Sigma P = 259,82 \text{ Pa} = 26,50 \text{ mma.}$$

## DIMENSIONAMIENTO DEL ROTOR DEL VENTILADOR

De acuerdo al principio de cifra de presión :

$$\Psi = \frac{H}{\frac{2V}{2 \cdot g}}$$

Donde :  $V = \frac{\pi \times D \times N}{60}$  y

H : Altura de Presión del Ventilador ( m )

D : Diámetro del Rotor ( m )

V : Velocidad periférica del rotor ( m/s )

N : Revoluciones por minuto del rotor

Para nuestro caso

$\Psi$  es igual a 1.

$$N = 1350 \text{ rpm} \text{ ó } N = 22,5 \text{ rps}$$

$$H = 26,50 \text{ mma}$$

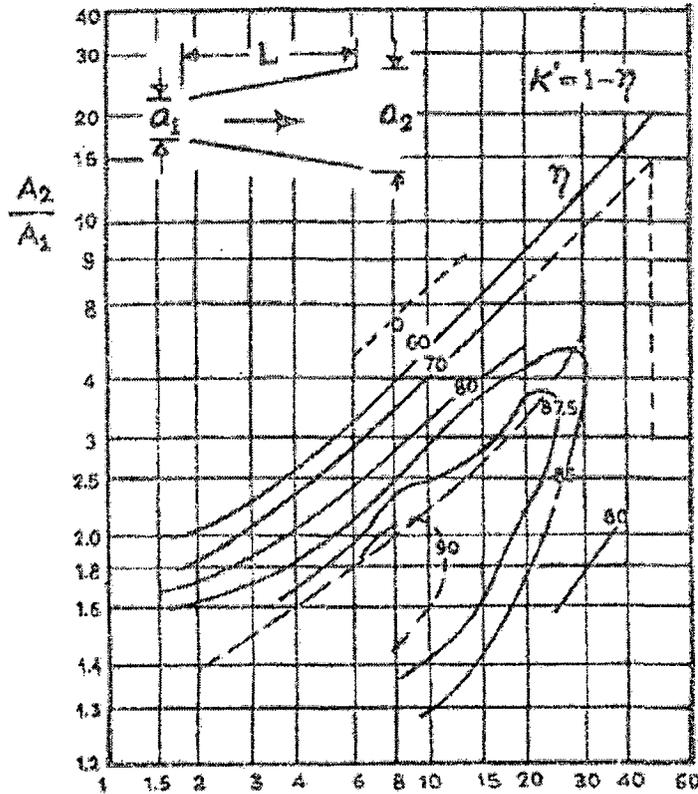
Despejando el diámetro:

$$D = \frac{60 \times g \times H}{\pi \times N \times \Psi}$$

$$D = \frac{60 \times 9,8 \times 0,0265}{3,1416 \times 22,5 \times 1}$$

$$D = 0,22 \text{ m}$$

Figura 22 : Coeficiente de pérdida en accesorios de sistemas de ductos



ELEMENTO	ILUSTRACIONES	CONDICIONES	VALOR DE $n$
Contracción abrupta		$\frac{V_1}{V_2} = \begin{cases} 0.0 \\ 0.25 \\ 0.50 \\ 0.75 \end{cases}$ Pérdidas referidas a $V_2$	0.35° 0.30 0.20 0.10
Expansión abrupta		Pérdidas referidas a $V_1$	$n = \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)^2$
Expansión		$\alpha = 5^\circ$ $\alpha = 10^\circ$ $\alpha = 20^\circ$ $\alpha = 30^\circ$ $\alpha = 40^\circ$ Pérdidas referidas a $(h_e - h_{e2})$	0.17 0.28 0.45 0.59 0.73
Contracción		$\alpha = 30^\circ$ $\alpha = 45^\circ$ $\alpha = 60^\circ$ Pérdidas referidas a $V_2$	0.02 0.04 0.07
Transformador			0.15