

**DISEÑO DE UN SECADOR PARA CAFÉ (TIPO SILO) EN EL MUNICIPIO DE  
TERUEL-HUILA Y EVALUACION DE PROTOTIPO A ESCALA 1:10**

**JUAN CAMILO CABRERA LAISECA  
FERNANDO MORA ARCE**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
INGENIERIA AGRICOLA  
NEIVA  
2009**

**DISEÑO DE UN SECADOR PARA CAFÉ (TIPO SILO) EN EL MUNICIPIO DE  
TERUEL-HUILA Y EVALUACION DE PROTOTIPO A ESCALA 1:10**

**JUAN CAMILO CABRERA LAISECA  
FERNANDO MORA ARCE**

**Trabajo de grado presentado como  
Requisito para optar al título de  
INGENIERO AGRICOLA**

**Director**

**Ph.D. JOSE DUBAN HENAO CUELLAR**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
INGENIERIA AGRICOLA  
NEIVA  
2009**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

Director del trabajo

---

Jurado

---

Jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo expresan sus agradecimientos:

En primera instancia a Dios por darnos sabiduría paciencia y entendimiento a la hora de realizar este proyecto que con gran esfuerzo y dedicación nos llevo a lograr un objetivo en nuestra carrera universitaria.

Al Ph.D José Duvan Henao Cuellar, docente de la Universidad Surcolombiana y director del presente trabajo de grado por el valioso aporte de sus conocimientos y la colaboración desinteresada y oportuna durante el desarrollo de este proyecto.

Al Licenciado Efrén Mosquera Villarreal, encargado del de Construcciones de la Universidad Surcolombiana por su colaboración desinteresada en la realización del presenta trabajo.

A la facultad de ingeniería, programa de ingeniería agrícola, universidad Surcolombiana.

A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la realización del presente trabajo.

**GRACIAS**

**¡DIOS LOS BENDIGA!**

## **DEDICATORIA**

### **Fernando Mora Arce dedica el presente trabajo a:**

Este trabajo, se lo dedico con gran aprecio y respeto, a mis padres, Fernando Mora y María Inírida Arce, a mis hermanas Angélica María y Diana Consuelo y a mi novia Luisa Fernanda Pararroyo quienes tuvieron la paciencia necesaria por acompañarme en los momentos de insomnio, por ayudarme en los momentos de crisis y quienes dieron todo su amor y comprensión para poder cumplir con los objetivos propuestos. Ellos hacen parte de nuestro gran sentimiento de admiración y respeto.

### **Juan Camilo Cabrera dedica el presente trabajo a:**

Este trabajo, se lo dedico con gran aprecio y respeto, a mis padres, Emilce Laiseca y Jesús K. Cabrera, a mis hermanos y a mi novia Ingrid Rocío Montero quienes tuvieron la paciencia necesaria por acompañarme en los momentos de insomnio, por ayudarme en los momentos de crisis y quienes nos dieron todo su amor y comprensión para poder cumplir con los objetivos propuestos. Ellos hacen parte de nuestro gran sentimiento de admiración y respeto.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>16</b>
<b>2. MARCO TEORICO</b>	<b>17</b>
<b>2.1 EL SECADO</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 MÉTODOS DE SECADO</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2 PARAMETROS DEL SECADO</b>	<b>19</b>
2.1.2.1 Temperatura del aire de secado	19
2.1.2.2 Humedad Relativa	20
2.1.2.3 Flujo de aire	21
2.1.2.4 Humedad del grano	21
2.1.2.5 Humedad Inicial del grano	22
2.1.2.6 Humedad final del grano	23
2.1.2.7 Humedad de equilibrio	23
2.1.2.8 Presión estática y flujo de aire	24
<b>2.1.3 CINÉTICA DEL SECADO</b>	<b>25</b>
2.1.3.1 Movimiento del aire para secado	26
2.1.3.2 Pérdida de presión estática	27
<b>2.2 SISTEMAS DE SECADORES MECANICOS UTILIZADOS PARA CAFE</b>	<b>28</b>
2.2.1 Secadores mecánicos rotativos o guardiolas	28
2.2.2 Patios Quindianos	29
2.2.3 Secadores Verticales (Torres)	29
2.2.4 Cuartos Secadores o Silos	29
<b>2.3 FUENTES DE CALOR UTILIZADAS PARA EL CALENTAMIENTO DEL AIRE EN EL SECADO DE CAFÉ</b>	<b>30</b>
2.3.1 Combustibles líquidos para el secado	30
2.3.2 Combustibles gaseosos	31
2.3.3 Leña	32

<b>2.4 ETAPAS DE SECADO DEL CAFÉ</b>	<b>32</b>
2.4.1 Presecado	32
2.4.2 Secamiento	33
<b>2.5 RIESGOS PARA LA CALIDAD DEL CAFÉ EN EL SECADO</b>	<b>34</b>
2.5.1 Análisis de los riesgos en el secado del café al sol	36
2.5.2 Análisis de los riesgos en el secado mecánico del café	36
2.5.3 Buenas Prácticas en el secado del café	37
<b>2.6 CRITERIOS DE DISEÑO PARA SILOS METALICOS</b>	<b>39</b>
2.6.1 Determinación de presiones y esfuerzos Método de H. Janssen	42
2.6.2 Diseño De Tornillos	44
2.6.3 Predimensionamiento de vigas	50
<b>3.    METODOLOGIA</b>	<b>53</b>
<b>3.1 LOCALIZACION</b>	<b>53</b>
3.1.1 Clima e Hidrología	54
3.1.1.1 Factores climáticos	54
3.1.2.2 Hidrología	55
<b>3.2 PARAMETROS DE DISEÑO</b>	<b>55</b>
<b>3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SILO DE SECADO:</b>	<b>55</b>
<b>3.4 CAPACIDAD POTENCIAL DEL SILO SECADOR:</b>	<b>57</b>
<b>3.5 COMPONENTES DEL SISTEMA SILO SECADOR:</b>	<b>58</b>
3.5.1 Dimensiones del silo metálico	58
3.5.1.1 Volumen de la masa de café almacenado en el silo	59
3.5.1.2 Área de cada cuarto secador	59
3.5.1.4 Cálculo de espesor de la lámina	64
3.5.1.5 Cálculo de tornillos para las uniones	65
3.5.2 Cámara de secado	70
3.5.3 Puertas de cargue y descargue del grano	73
3.5.4 Piso de fondo perforado:	74
3.5.4.1 Cálculo estructural de soporte para la lámina perforada	74
3.5.5 Puertas de entrada y salida del aire de secado	88
3.5.6 Mecanismo de poleas para recoger el piso de la cámara superior	89
3.5.7. Sistema de apoyos para soporte de la cámara superior	95
3.5.7.1 Dimensionamiento de los soportes	95
3.5.8 Ventilador	100
3.5.8.1 Flujo o caudal de aire del ventilador (q)	102
3.5.8.3 Determinación de pérdidas de presión en el sistema	104
3.5.8.4 Potencia del motor del ventilador (HP):	109
3.5.8.5 Selección del ventilador	109
3.5.9 Intercambiador de calor	112
3.5.10. Quemador de ACPM (eléctrico de chispa)	113

<b>3.6 CÁLCULO DE CANTIDAD DE CALOR NECESARIO PARA EL SECADO</b>	<b>117</b>
3.6.1 Cálculo del secado por aire caliente	119
3.6.2 Tiempo de secado	121
3.6.3 Requerimiento energético	122
<b>3.7 Metodología de construcción del prototipo:</b>	<b>123</b>
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSION</b>	<b>124</b>
<b>4.1 COSTO DEL EQUIPO V.S OTRAS ALTERNATIVAS</b>	<b>124</b>
<b>4.2 FUNCIONAMIENTO</b>	<b>124</b>
<b>4.3 evaluacion EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO A ESCALA DEL SILO</b>	<b>125</b>
4.3.1 Determinación de humedad inicial del café	126
4.3.2 Isotherma de sorción y secado del cafe	128
4.3.3 Prueba de secado en el silo	130
4.3.4 Comparación de curva de secado experimental vs. modelación matemática de secado de café pergamino	133
4.3.5 Eficiencia del silo secador	137
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>139</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>141</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>144</b>

## ÌNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
FIGURA 1. Humedad Relativa Vs Humedad (Hbs) del Café (32.5°C) <sup>o</sup>	24
FIGURA 2. Curva de secado de granos	26
FIGURA 3. Localización del proyecto	53
FIGURA 4. Funcionamiento del silo secador	56
FIGURA 5. Disposición de tornillos para uniones de las lámina	68
FIGURA 6. Disposición de tornillos para asegurar lámina perforada	70
FIGURA 7. Detalle cámara Superior (Presecado)	71
FIGURA 8. Detalle cámara inferior (Secado)	72
FIGURA 9. Compuerta de descarga de grano.	73
FIGURA 10. Marco estructural de soporte para cámara de presecado	76
FIGURA 11. Carga distribuida a través de la viga cámara de presecado.	78
FIGURA 12. Diagrama de momento máximo en la viga de la cámara de presecado	79
FIGURA 13. Sección de la viga (presecado).	80
FIGURA 14. Marco estructural de soporte para cámara de secado	81
FIGURA 15. Expansión gradual para entrada del aire	89
FIGURA 16. Instalación del termómetro	89
FIGURA 17. Soporte para localización de poleas.	90
FIGURA 18. Disposición de soportes de cámara de secado.	95
FIGURA 19. Sección de soportes de cámara de presecado.	100
FIGURA 20. Ventilador centrifugo de alabes inclinados hacia atrás	101
FIGURA 21. Curva característica del ventilador	110
FIGURA 22. Intercambiador de Calor.	113
FIGURA 23. Instalación del quemador	114
FIGURA 24. Componentes del quemador	115

FIGURA 25. Electrodo del quemador	116
FIGURA 26. Proyección Electrodo – Boquilla quemador	116
FIGURA 27. Boquilla de descarga	117
FIGURA 28. Comportamiento de secado del café en el horno a 130°C	128
FIGURA 29. Humedad Relativa Vs Humedad (Hbs) del Café (50 y 35°C)	130
FIGURA 30. Comportamiento de la humedad en el secado del café	133
FIGURA 31. Curva de secado según modelación (ecuación de Roa)	134
FIGURA 32. Comparación Curva de secado experimental v.s modelación	135
FIGURA 33. Comportamiento de las humedades relativas durante el proceso	137

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Contenido de humedad del café	34
Tabla 2. Determinación de los peligros en el secado del café al sol	40
Tabla 3. Determinación de los peligros en el secado mecánico del café	41
Tabla 4. Tensión en tornillos.	45
Tabla 5. Resistencia de tornillos	46
Tabla 6. Flechas admisibles para vigas de acero	52
Tabla 7. Factores climáticos del municipio de Teruel	54
Tabla 8. Especificación de la altura del silo	58
Tabla 9. Dimensiones de cada cámara del silo secador	60
Tabla 10. Características ventilador (flujo de aire y presión estática)	101
Tabla 11. Dimensiones del ventilado	111
Tabla 12. Contenido de H <sub>bh</sub> y H <sub>bs</sub> durante el secado en el horno.	127
Tabla 13. Parámetros la ecuación de la Federación de Cafeteros	129
Tabla 14. Comportamiento de secado en el silo secador	132
Tabla 15. Comportamiento de las humedades relativas durante el proceso de secado	136

## INDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Vista en planta de la cámara de presecado del prototipo.	145
ANEXO B. Vista frontal del prototipo.	145
ANEXO C. Vista lateral del prototipo.	146
ANEXO D. Evaluación del prototipo secador.	146
ANEXO E. Prototipo en funcionamiento.	147
ANEXO F. Descripción presupuesto silo.	147

## RESUMEN

La implementación de sistemas de secado artificial como fase complementaria del beneficio de producción del café en el Huila, se ha convertido en una alternativa viable para los pequeños y medianos productores, por tal razón se diseñó un secador mecánico con una capacidad de 4680kg distribuidos equitativamente en dos compartimentos (secado y presecado); el silo secador tiene un diseño totalmente desarmable, al igual que cuenta con un sistema de descarga del grano utilizando como medio el ángulo de reposo del grano del café.

La creación y evaluación de un prototipo en escala 1:10 del silo secador sirvió como parámetro para establecer el tiempo aproximado de secado, al igual el comportamiento de las diferentes variables tenidas en cuenta durante el proceso.

**Palabras claves:** Secador Mecánico, Silo Secador, Café, Prototipo

## ABSTRACT

The implementation of artificial systems of drying as a complementary phase of the benefit of production of the coffee in the department of Huila, as a alternative to medium and small producers, this consist of a design a mechanical drier with a capacity of 4680kg divide into two compartments (drying and pre-drying); The drying silo has a totally demountable design, just like account with a system of unloading of the grain using like means the angle of rest of the coffee bean.

The creation and evaluation of a prototype in scale 1:10 of the drying silo suited someone's purposes like parameter to establish the time brought nearer of drying, just like the behaviour of the different variables used in the process.

**Key Words:** Mechanical drier, Drying silo, Coffee beans, Prototype

## 1. INTRODUCCION

La forma más económica y eficiente de conservar los granos es por medio del secado. El aumento constante en cuanto a la producción de granos durante los últimos años ha obligado al desarrollo y adaptación de nuevas técnicas de secamiento, las cuales aunque susceptibles de mejorar constituyen una acumulación de experiencias valiosas.

En el municipio de Teruel así como en gran parte del departamento del Huila se realiza la práctica de comercialización del café húmedo, debido a que los productores pequeños y medianos por falta de condiciones de infraestructura de secado apropiada se ven obligados a omitir esta labor o aplicar otros métodos de secado como lo es el secado solar, el cual no resulta practico debido no solamente a la calidad del grano para secar sino también a la variación de la radiación solar, la cual no es la más adecuada en época de cosecha, que generalmente coincide con periodos de lluvias; lo que conlleva a pérdidas o deterioro de la calidad de la bebida por el mal beneficio y almacenamiento del café húmedo, por lo cual los márgenes de rentabilidad del café mojado a seco son obtenidos por los comerciantes, que en últimas son los que obtienen mayor beneficio en el negocio del café, mientras que los agricultores no alcanzan a cubrir sus obligaciones financieras ya que reciben muy pocos ingresos por la venta del producto.

Considerando estos aspectos y con el ánimo de brindar alternativas de solución a tan grave problema, se hace necesario el diseño de un equipo de secado mecánico (silo secador) debido a las ventajas que este presenta, como lo es el ahorro de espacio, capacidad de secado, independencia de las condiciones ambientales, y operación día y noche, al igual que permite efectuar el secado de

cantidades apreciables de café, en un tiempo relativamente corto, y que además es un sistema práctico y versátil en cuanto a su construcción y manejo.

Este documento presenta de forma detallada el diseño y evaluación, de un prototipo de un silo secador, el cual consta de una cámara de presecado y secado con el objetivo de homogenizar el secado del grano. Este sistema de silo mecánico presenta un mecanismo práctico el cual facilita la descarga del grano de la cámara de presecado hacia la cámara de secado esto con el fin de economizar en costos de personal encargado de llevar a cabo dicha labor.

Además presenta la facilidad en la construcción de éste, ya que es completamente desarmable y portátil, lo que le brinda gran importancia y aplicabilidad, ya que puede ser utilizado en diferentes sitios trasladándolo de un lugar a otro con mayor facilidad.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- ♦ Diseñar un equipo de secado mecánico para café (tipo silo-secador), eficiente y económico, teniendo en cuenta parámetros climatológicos y de producción del municipio de Teruel (Huila) con el fin de contribuir al desarrollo de una caficultura en la región más competitiva y sostenible.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ♦ Optimizar el sistema de descarga del grano utilizado por los equipos de secado mecánico de café en la actualidad, mediante la implementación de un mecanismo práctico que permita mayor facilidad en el manejo del producto.
- ♦ Maximizar el proceso de secado de café en la región con el suministro de un equipo de secado mecánico portátil y completamente desarrollado que permita facilidad en su transporte de un lugar a otro, para prestar el servicio a la caficultura de la zona.
- ♦ Revisar y evaluar el funcionamiento y comportamiento del silo secador para café mediante la construcción de un prototipo a escala 1/10 del diseño propuesto.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 EL SECADO**

Según Marques (1993), el secado es un proceso de gran importancia en la cadena de producción de alimentos, ya que el contenido de humedad es, sin duda, la característica más importante para determinar si el grano corre el riesgo de deteriorarse durante el almacenamiento. El secado se realiza para inhibir la germinación de las semillas, reducir el contenido de humedad de los granos hasta un nivel que impida el crecimiento de los hongos y evitar las reacciones de deterioración. Una definición clara y completa de lo que es el secado puede ser la siguiente: "es el método universal de acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla".

Dentro de los procesos productivos del café el secado es la etapa del beneficio que tiene como finalidad disminuir el contenido de humedad del grano, hasta un porcentaje tal, que permita su almacenamiento seguro sin adquirir mal olor o sabor. Las normas vigentes para la comercialización del café pergamino seco, establecen un contenido final de humedad entre el 10 y el 12%.

#### **2.1.1 MÉTODOS DE SECADO**

Según Federación Nacional de Cafeteros (1988), los métodos disponibles para secar los productos agrícolas a nivel del agricultor están limitados, la mayoría de las veces, al uso de una combinación de radiación solar y el movimiento natural del aire ambiente: o sea, el secado natural. Otros métodos de secado son, en

cierto modo, complejos y requieren de una mayor experiencia y esfuerzo de parte del caficultor; éstos corresponden al secado artificial.

Dentro de los tipos de secado de mayor eficiencia, encontramos el secado mecánico el cual se realiza comúnmente en estructuras construidas en mampostería (ladrillo y cemento) y en lámina de hierro, especialmente las de menor capacidad. Estas estructuras se denominan silos.

En el secado mecánico (silos) se hace pasar una corriente de aire caliente, impulsada por un ventilador, a una temperatura de 50 grados Celsius, a través de la masa de café. Al calentar el aire se aumenta su capacidad para extraer humedad de los granos.

Los equipos utilizados deben permitir que el aire de secado no se mezcle con los gases de la combustión. De esta manera, se evita el café ahumado, con olor a contaminante, que afecta la calidad del café y su seguridad como producto para consumo humano.

En el secado mecánico del café, las temperaturas del aire caliente superiores a 50 grados centígrados pueden causar el grano cristalizado, el cual, además de afectar la apariencia física de la almendra, afecta negativamente el factor de rendimiento del café, al tornarse quebradizo durante el proceso de la trilla. Puede llegar a afectar el sabor de la bebida.

Los silos se construyen con compuertas para modificar la dirección del flujo del aire, con lo cual se mejora notoriamente la uniformidad de la humedad final del café.

Es conveniente utilizar equipos con compuertas para el cambio de la dirección del aire, ya que al pasar a través de la masa de café, por encima y por debajo,

generalmente cada 6 o 8 horas, se consigue una buena uniformidad en el contenido de humedad del grano.

Dentro de los tipos de silos secadores para café se pueden encontrar diversas variaciones en cuanto a su fabricación y diseño, así:

- En cuanto al número de compartimientos: de un compartimiento, de dos compartimientos.
- En cuanto al flujo del aire: flujo en una sola dirección o doble flujo.
- En cuanto al calentamiento del aire: de fuego directo, con intercambiador de calor horizontal o vertical.
- En cuanto a la fuente de calor: de energía eléctrica, con quemador de ACPM de chispa o de olla, con hornillas para coque.

## **2.1.2 PARAMETROS DEL SECADO**

Según Pazmiño, Gallego y Cabal (1978), el principal objetivo en el secado de granos es el reducir el contenido de humedad, de tal manera que no ocurran daños antes de que este sea utilizado. Varios son los parámetros que influyen al mismo tiempo para reducir el contenido de humedad en granos, tales son:

### **2.1.2.1 Temperatura del aire de secado**

Constituye uno de los parámetros que debe tratarse con gran cuidado ya que la temperatura no debe ser tan elevada dependiendo del tipo de grano que se está tratando. Una temperatura máxima de 45-50°C es recomendable para secar grano, utilizándose comúnmente una temperatura de 50°C para secado de café.

La temperatura del aire de secado es el parámetro de mayor flexibilidad en un sistema de secado a altas temperaturas e influye significativamente en la tasa y la

eficiencia de secado y en la calidad del producto final. Un aumento de dicha temperatura significa un menor consumo de energía por unidad de agua evaporada y una mayor tasa de secado.

### **2.1.2.2 Humedad Relativa**

Es el parámetro que tiene mayor influencia en el proceso de secado. definiéndose como: la relación entre la presión de vapor de agua presente en un volumen de aire y la presión de vapor de agua que existiría en ese mismo volumen de aire, y en iguales condiciones de temperatura y presión cuando está completamente saturado de agua, la humedad relativa se expresa normalmente en términos de porcentaje.

Al calentar el aire se reduce su humedad relativa y aumenta su capacidad de retener humedad sin que esta se condense, igualmente la baja humedad relativa hace al aire ávido de la humedad de los granos que se coloquen en su camino.

La extracción de la humedad se realiza cuando la presión de vapor del aire secante es menor que la presión de vapor del grano. Por lo tanto se va a presentar un déficit de presión, expresado matemáticamente por la siguiente relación:

$$\Delta PV = PV2 - PV1$$

Donde:

$\Delta PV$ = Déficit de presión de vapor, (pulg. c.a)

$PV2$ = Presión de vapor del grano, (pulg. c.a)

$PV1$ = Presión de vapor del aire del medio secante, (pulg. c.a)

Todo lo anterior ocurre como efecto de la aplicación de calor al grano, lo cual incide en el aumento de su presión de vapor, traduciéndose finalmente en una entrega de humedad al medio secante; el grano pierde humedad hasta que la presión de vapor de agua en su interior sea igual a la presión de vapor de agua del aire.

### **2.1.2.3 Flujo de aire**

Parámetro que influye notablemente en la velocidad de secado, ésta aumenta al incrementar el volumen de aire utilizado. En el proceso de secado el flujo es influenciado por los siguientes factores:

- a. Resistencia que ofrece la capa de grano al paso del aire, la cual se hace mayor al aumentar el espesor.
- b. Contenido de humedad del grano, la humedad hace que se forme una película que obstruye el paso del aire.
- c. Angulo de reposo del grano, si es muy pequeña la circulación del aire se ve restringida, restricción que se disminuye en caso de que el ángulo sea mayor. Según cenicafé (1988), el ángulo de reposo para café lavado es de 40,7 grados y para café en almendra es de 27.8 grados.
- d. Resistencia que presenta el piso falso al paso del flujo del aire, normalmente está constituido por malla perforada de 3mm de diámetro.

### **2.1.2.4 Humedad del grano**

Según castillo (1978), en los granos se puede considerar que el agua está presente en las siguientes formas:

- a. Agua libre o absorbida: depositada en la superficie del grano, o en sus espacios intergranulares y poros.

- b. Agua absorbida: unida a la materia seca; las moléculas de agua interactúan con las de la sustancia y en consecuencia sus propiedades se afectan. El agua absorbida se comporta diferente al agua líquida, su presión de vapor es menor.
- c. Agua de constitución: combinada en uniones químicas formando parte de la misma sustancia.

Según Castillo (1978) para el cálculo del contenido de humedad se puede efectuar, teniendo en cuenta que la cantidad de materia seca, permanece constante durante el proceso

En el grano húmedo:

$$\text{Materia seca} = W_i \times \frac{(100 - H_i)}{100}$$

En el grano seco:

$$\text{Materia seca} = W_f \times \frac{(100 - H_f)}{100}$$

Donde:

$W_i$  = Peso inicial del grano

$W_f$  = Peso final del grano

$H_i$  = Humedad inicial del grano

$H_f$  = Humedad final del grano, porcentaje

#### **2.1.2.5 Humedad Inicial del grano**

El contenido de humedad inicial también influye en la tasa de secado. Cuanto más elevado sea el contenido de humedad de un producto, mayor será la cantidad de

agua evaporada por unidad de energía. Con elevados contenidos de humedad, las fuerzas de adsorción de la estructura celular del material sobre las moléculas de agua, son menores que cuando el contenido de humedad del producto es más bajo. En consecuencia, se utiliza un mayor porcentaje de energía disponible para evaporar la humedad contenida en los granos más secos.

El porcentaje de humedad inicial con que es llevado el café pergamino a la planta de secamiento, está entre 50 y 55% en base húmeda.

#### **2.1.2.6 Humedad final del grano**

Es la humedad con la cual debe salir el grano después del proceso de secado. La humedad es la de mayor importancia, puesto que su alto contenido facilita el desarrollo de hongos causantes de los mayores deterioros en los granos almacenados. Según el uso y el tiempo de almacenamiento que vaya a tener el grano, será el porcentaje al cual debe ser llevado.

El contenido de humedad final del grano tiene influencia en el proceso de secado, en la medida en que nos permite determinar las condiciones de entrada del aire que nos garantiza la extracción de la cantidad de agua necesaria, y el tiempo requerido para llegar al porcentaje de humedad necesario, que para el caso del café pergamino se encuentra entre el 10-12%.

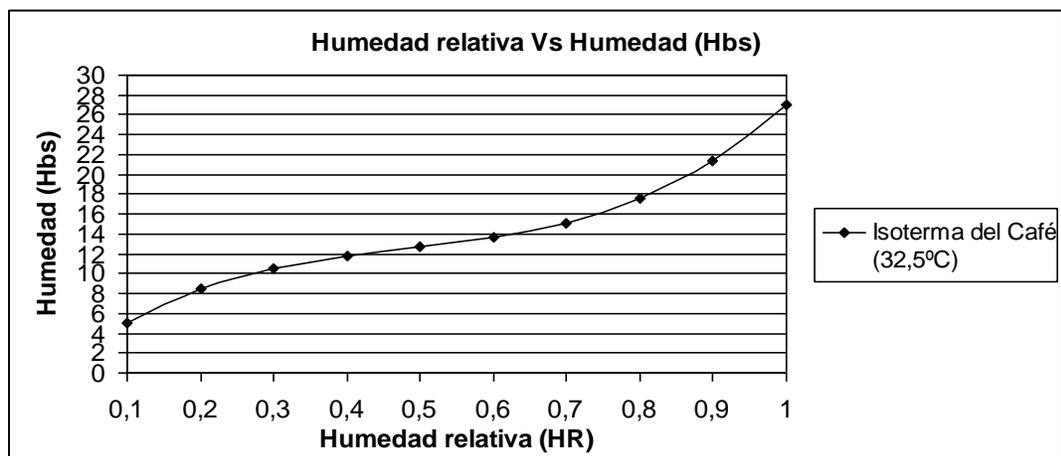
#### **2.1.2.7 Humedad de equilibrio**

Según Monroy, Norman y Citelly (1974), la humedad de equilibrio está directamente relacionada con la humedad relativa del aire; se dice que el aire con una determinada humedad relativa, está en equilibrio con el grano a una determinada humedad, a la misma temperatura, lo cual implica que sus presiones de vapor son iguales. La presión de vapor interna de un grano aumenta a medida que aumenta la temperatura, para un contenido de humedad constante. Cuando no existe el equilibrio, el flujo de humedad es de un punto de alta a otro de baja

presión de vapor, y depende de la diferencia de presión de vapor entre el producto y el medio ambiente.

La humedad de equilibrio es un factor importante en el secado. Si el aire ambiental tiene un porcentaje de humedad relativa inferior a la condición de equilibrio, es decir su presión de vapor es menor que la presión de vapor del grano, éste aire tiene poder desecante; entonces se puede realizar un secado con aire ambiental.

Si el aire tiene una humedad relativa cercana a la condición de equilibrio, se puede añadir calor al aire con el fin de aumentar su capacidad de secado. Parte del calor es cedido al grano con el fin de aumentar la presión de vapor y crear un desequilibrio que obligue a la migración de humedad del grano al aire



**FIGURA 1. Humedad Relativa Vs Humedad (Hbs) del Café (32.5°C)<sup>o</sup>**

### 2.1.2.8 Presión estática y flujo de aire

La pérdida de carga de un flujo de aire a través de una capa de granos, conocida generalmente como resistencia al flujo de aire y denominada presión estática, influye en este flujo y, en consecuencia, en la tasa de secado. Para determinado tamaño de ventilador, cuanto mayor sea el espesor de la capa de granos y menor

la cantidad de Impurezas en ella, mayor será el flujo de aire y también la tasa de secado. Esto, porque el menor espesor de la capa y la menor cantidad de impurezas significan menos resistencia al paso del aire a través de los granos.

### **2.1.3 CINÉTICA DEL SECADO**

Según Madariaga (1995), en la cinética del secado se basan los estudios en los cambios de la cantidad promedio de humedad con el tiempo, contrario a lo que describe la dinámica del secado que describe los cambios de temperatura y humedad.

Así la cinética del secado describe la cantidad de humedad evaporada, el tiempo, el consumo de energía, etc. Sin embargo, el cambio de humedad depende de la transferencia de calor y de masa entre la superficie del cuerpo, el ambiente y el interior del material a secar.

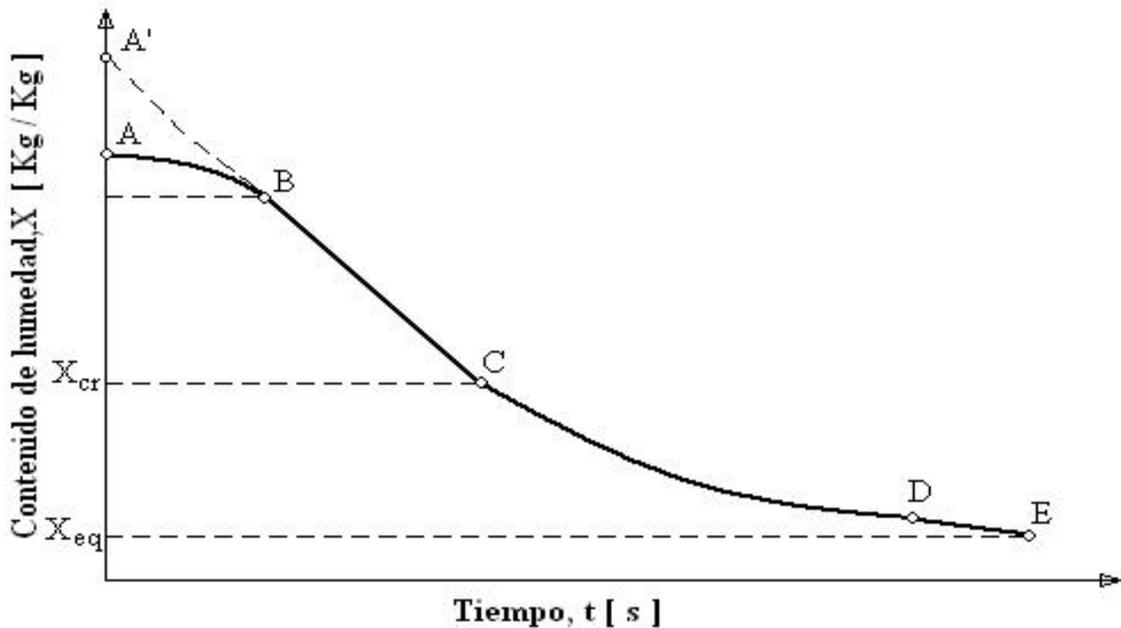
Es indispensable saber que la intensidad del secado refleja el cambio en la cantidad de humedad a través del tiempo, que es influenciado por los parámetros del secado como, temperatura, humedad, velocidad relativa del aire, presión total, etc.

Existen cuatro periodos en el proceso de secado, los cuales se encuentran representados en la grafica 2, y son:

- a. De A-B. es la etapa de extracción de humedad de la superficie del grano, en ella la velocidad de evaporación aumenta según el grano se va calentando.
- b. De B-C. la pérdida ocurre desde la superficie. Ésta pérdida ocurre por el fenómeno de convección. El punto C es el de contenido de humedad crítico que ocurre cuando la velocidad de difusión del producto es menor que la

velocidad con que se ésta evaporando en la superficie. Es el periodo de velocidad constante.

- c. De C-D depende de las características del producto y comprende el movimiento de humedad dentro del producto hacia la superficie por difusión. Es el periodo de velocidad decreciente.
- d. De D-E es el periodo final del proceso. En éste periodo la capacidad del aire secante utilizado en el proceso es mínimo, porque las condiciones ambientales en éste momento son las únicas que influyen en el proceso. Es el periodo de equilibrio.



**FIGURA 2. Curva de secado de granos**

### 2.1.3.1 Movimiento del aire para secado

Según Pazmiño Gallego Y Cabal (1974), el flujo de aire que proporciona el ventilador al sistema, para efectuar el secamiento, tiene que hacer un recorrido

hasta el sitio donde se encuentra el grano a secar, trayecto en el cual encuentra resistencias ocasionando las algunas pérdidas como son:

### 2.1.3.2 Pérdida de presión estática

**a. Resistencia del grano al flujo del aire:** La masa de grano ejerce una resistencia al paso del aire, siendo analizado de la siguiente manera: los fenómenos de fricción y turbulencia que son pérdidas de energía, se presentan cuando el aire pasa a través de una capa de granos, ocasionando una caída de presión. Muchos factores tienen influencia sobre la caída de presión como son la forma y características del grano secar, incremento del flujo de aire, tamaño y forma de las perforaciones del piso falso, variabilidad del tamaño de las partículas.

El flujo de aire que pasa a través de una capa de grano se expresa en  $\text{pies}^3/\text{min}/\text{pies}^2$  de área transversal.

Para determinar la caída de presión por resistencia del grano se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta P' = A \times \frac{Qa^2}{\ln(1+B \times Qa)}$$

Donde:

$\Delta P'$  = Caída de presión por pie de grano

A y B = Constantes definidas para cada grano

$Qa = \text{CFM}/\text{pies}^2$

**b. resistencia del piso perforado (Lámina) al paso del aire:** Cuando el flujo de aire que se proporciona a una columna de grano, en un proceso de secado o

ventilación, pasa a través del piso perforado que sostiene el grano que se encuentra en el silo, se origina una pérdida de energía o caída de presión.

Henderson (1966), encontró que la caída de presión a través de la malla perforada cuando se encuentra cubierta por grano, se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \frac{10^{-6}}{9} \times \frac{Qa}{(e \times Of)^2}$$

Donde:

$\Delta P$  = Caída de presión total, pulgadas columna de agua.

$Of$  = Porcentaje de abertura, decimal.

$E$  = Porcentaje de vacíos en el grano; decimal.

Brooker (1974), afirma que con un 10% o más área abierta, la caída de presión a través del piso viene a ser tan pequeña, comparada con la caída de presión originada en la columna de grano, considerándosele despreciable.

## **2.2 SISTEMAS DE SECADORES MECANICOS UTILIZADOS PARA CAFE**

Según Cenicafé (1988), los tipos de secadores mecánicos se clasifican dependiendo del movimiento relativo del aire y de movimiento de grano entre los que se encuentran:

### **2.2.1 Secadores mecánicos rotativos o guardiolas**

La guardiola es un tambor cilíndrico de uno o cuatro compartimentos montados sobre un eje hueco por donde circula el aire caliente que pasa al interior del tambor por tubos radiales perforados y sale al exterior por las perforaciones de la lámina del tambor.

En la parte central del tambor se distribuye aire muy caliente (aproximadamente 100°C), este aire caliente proviene de un intercambiador de tipo superficie, que puede utilizar como medio de calentamiento gases de combustión de ACPM, carbón mineral o coque, o un calentador de resistencias eléctricas.

### **2.2.2 Patios Quindianos**

Son secadores mecánicos consistentes en un tanque rectangular, con un piso de malla perforada colocada a 0.5 m de altura sobre el nivel del fondo, quemador de fuego directo y ventilador.

El espesor de la capa de café varía entre 20-25cm. Para hacer un secado homogéneo se debe revolver el café a lo largo y ancho, esta operación se debe hacer a intervalos de tiempo cortos (cada 10-20 minutos), de lo contrario se tuesta el café.

Como ventajas del patio quindiano se anota la disminución del tiempo de secado y el bajo consumo de combustible, comparado con otros equipos de igual capacidad.

### **2.2.3 Secadores Verticales (Torres)**

El secado se realiza al hacer pasar un flujo de aire caliente por entre una cascada de café, para luego sufrir un reposo corto; este movimiento es continuo.

Las desventajas de este tipo de secadores son la gran cantidad de café que trillan y el alto costo, comparado con otros secadores estáticos.

### **2.2.4 Cuartos Secadores o Silos**

En la actualidad son los secadores más utilizados para café. Estos pueden presentar variaciones en cuanto su fabricación y diseño, así:

- A. En cuanto al número de compartimentos (de un compartimiento o de dos).
- B. En cuanto al flujo del aire (flujo en una dirección con pre-secado y sin él; Doble flujo con pre-secado y sin él).
- C. En cuanto al calentamiento del aire (a fuego directo o con intercambiador de calor)
- D. En cuanto la fuente de calor (energía eléctrica, con quemador de ACPM, con quemador de aceite, con hornillas para coque y carbón mineral).

Entre las ventajas de los silos secadores se pueden anotar: el café se puede depositar húmedo en ellos, no requieren movimiento del grano, el manejo de los equipos es relativamente fácil y además el precio comparativo con otros secadores es mucho más bajo.

## **2.3 FUENTES DE CALOR UTILIZADAS PARA EL CALENTAMIENTO DEL AIRE EN EL SECADO DE CAFÉ**

Según de Dios (1996), en el secado de café a demás de las fuentes de calor convencionales se han canalizado esfuerzos en investigación para el potencial aprovechamiento de biosólidos como combustible alterno. Los biosólidos son todos aquellos compuestos de naturaleza orgánica que se generan en forma residual posterior a un proceso biológico o industrial. Tal es el caso de la cascarilla de café proveniente del proceso de trillado, producción de biogás a partir de las aguas residuales provenientes de beneficio de café, pulpa de café para la producción de bioetanol.

### **2.3.1 Combustibles líquidos para el secado**

Se encuentran en el mercado los siguientes:

- Gasoil
- Diesel oíl
- Diluyente para fuel oíl

Fueloil  
Kerosene

El gasoil es el más costoso y el fueloil el más económico, pero por razones operativas y de mantenimiento no se aconseja el uso de este último, ya que es un combustible sucio. El kerosene es un buen combustible, pero suele producir olores objetables y su costo es algo mayor.

En cuanto al diluyente, si bien tiene un buen poder calórico y otras propiedades, presenta ciertos inconvenientes, como degradarse en almacenamientos prolongados, y tapar con más frecuencia los filtros y los picos.

La diferencia de precios de los combustibles mencionados es el motivo principal de la elección de su uso, lo cual no suele estar de acuerdo con los factores de calidad del grano.

Cuando se adquieran combustibles más económicos, como dieseloil, diluyente y fueloil, hay que tener muy en cuenta la elección del proveedor, para evitar mezclas, adulteraciones y otras maniobras que perjudican la calidad de los productos. Sólo deben contratarse los proveedores de agentes o distribuidores oficiales de las distintas compañías.

### **2.3.2 Combustibles gaseosos**

Existen dos tipos principales de gas que pueden emplearse:

1. Gas licuado (propano y/o butano), que es provisto en tanques o cisternas. Es un producto líquido, que se gasifica rápidamente al abrir las válvulas, por la alta presión a que está sometido.
2. Gas natural, que se recibe por cañerías de la red general de gasoductos que abastecen a gran parte del país. Este gas circula a baja presión y su precio es inferior al primero. El gas natural, si bien es más barato y más

simple su manejo, necesita contar con la línea que conecte la secadora con la red general. En la mayoría de los casos la red está alejada, y el propietario de la planta debe hacerse cargo del costo de la misma. Sin embargo, el gas natural tiene la ventaja de no tener la necesidad de un depósito o tanque y de la seguridad de su aprovisionamiento.

### **2.3.3 Leña**

Según de Dios (1996), la leña es un combustible muy económico para zonas donde abundan bosques y montes. Tiene un aceptable poder calórico y es de fácil combustión. Su manejo no exige mano de obra calificada y tiene bajo tenor de cenizas y azufre.

Para su empleo se necesita un horno grande especial, provisto de una grilla de hierro fundido y revestido de material refractario

Los inconvenientes que presenta la leña es el gran volumen de espacio que ocupa y su correspondiente acarreo. Requiere además, un operario para la carga del horno y el control de temperatura.

Además, el abastecimiento puede ser irregular, considerando las grandes cantidades necesarias. Si bien su poder calórico es aceptable, resulta inferior al de los combustibles sólidos.

## **2.4 ETAPAS DE SECADO DEL CAFÉ**

### **2.4.1 Presecado**

Según Ruiz (1998), el presecado consiste en retirar el exceso de agua retenida después del beneficiadero. Se puede realizar manualmente (orear al sol) o mecánicamente (flujo forzado de aire). En esta etapa se aplica un determinado

flujo de aire caliente a la masa de café. La naturaleza granular de esta, permite el paso del aire y la transferencia del calor a la superficie del grano.

El pergamino y la capa exterior del endospermo se calientan primero. Debido al aumento de temperatura, se inicia un periodo de evaporación rapidísima del agua superficial, la cual es arrastrada por el mismo flujo de aire. A partir de ese momento, y durante todo el proceso el aire cumple dos funciones: transmitir el calor al café y acarrear lejos el agua, en forma de vapor. La temperatura del aire lógicamente disminuye, mientras aumenta su humedad, proceso que se conoce como saturación adiabática.

#### **2.4.2 Secamiento**

Después de la etapa inicial de presecado, caracterizado por una baja temperatura en el grano, sigue un nuevo periodo de calentamiento del mismo. Conforme va avanzando el proceso de secado se va formando la cámara de aire dentro del grano, y se endurece el pergamino y los tejidos exteriores del endospermo, que en el café recién lavado están unidos.

Se forma así paulatinamente una barrera física que dificulta la transferencia de calor hacia el centro del grano y la salida de vapor de agua. El secado del grano que en su etapa inicial es eficiente y rápido, se va haciendo cada vez más lento y dificultoso.

El factor limitante de la velocidad de secado es la resistencia a la difusión el agua, que debe migrar desde el interior del grano hasta la superficie. Además el agua comienza a estar retenida cada más firmemente por fuerzas físico químicas, tales como los enlaces del agua de hidratación y del agua que es parte de la estructura de los constituyentes químicos del café o agua de constitución.

En este periodo la temperatura del grano tiende progresivamente a ponerse en equilibrio con la del aire desecante, y es mayor el riesgo de sobre calentamiento y deterioro de sus características orgánicas. Simultáneamente, la humedad del aire

expulsado a la atmósfera va disminuyendo y en algunos sistemas de secado se le utiliza nuevamente, recirculándolo sobre granos más húmedos, pues todavía tiene condiciones desecantes.

**Tabla 1. Contenido de humedad del café**

Estado del café	Porcentaje de humedad (%)
Café mojado escurrido	52 – 54
Agua entre almendra y pergamino	45 – 50
Piel seca, no hay agua entre la almendra y el pergamino	40 – 45
Café seco al agua	40 -35
Almendra color opaco	35 – 30
Almendra con tonalidad ligeramente negra pero aun hay partes opacas	25 – 30
Almendra de color verde intenso	20 – 25
Almendra color verde oscuro	13 – 20
Café pergamino seco de trilla (almendra color verde oliva, humedad de equilibrio).	10 – 12
Café sobresecado (color amarillo verdoso y su almendra es quebradiza).	7 – 10

**Fuente: RUIZ, 1998.**

## 2.5 RIESGOS PARA LA CALIDAD DEL CAFÉ EN EL SECADO

Según Puerta (2008), en el procesamiento de alimentos, un riesgo se refiere a un agente físico, químico, biológico o cualquier condición que ocasione la pérdida de la calidad y de la inocuidad, y por consiguiente, el producto no es apto para el consumo humano.

Los principales riesgos para el café son las sustancias químicas que incluyen los residuos de plaguicidas, la ochratoxina A, las emisiones de humo, los combustibles y los elementos químicos pesados, y los agentes biológicos como los hongos, la broca (*Hypothenemus hampei*), el gorgojo (*Araecerus fasciculatus*) y los roedores.

Así mismo, la permanencia del grano de café con altos contenidos de humedad, los tiempos prolongados de los procesos, el contacto con la pulpa y los residuos, y la falta de higiene del personal, las instalaciones y los equipos, así como los ambientes húmedos y las altas temperaturas en el almacenamiento, son condiciones de riesgo que ocasionan daños físicos, descomposición de los granos y deterioro de la calidad y de la inocuidad del producto.

En el 41% de las fincas de Colombia el secado del café se realiza al sol, donde los granos se exponen al aire y al sol durante varios días. En general, estas fincas tienen un tamaño menor a 5 ha y utilizan instalaciones como los carros secadores, los secadores parabólicos y los patios, entre otros.

El 95% de los secadores al sol se utilizan regularmente, aunque el área total disponible corresponde solo al 59% de la requerida para secar la producción del café en estas fincas.

Por otra parte, en un 2% de las fincas cafeteras, principalmente en aquellas con más de 5 ha, se usan los secadores mecánicos, los cuales disponen de una cámara, donde los granos húmedos son depositados y a través de la cual circula aire caliente por convección forzada.

Para el calentamiento del aire se utilizan varios combustibles como ACPM, carbón coque, carbón mineral o cisco de café. Los secadores mecánicos más usados para el café son los silos.

Debido a la insuficiencia de secadores para el café, al sobredimensionamiento de las cámaras de los secadores mecánicos y a otros aspectos económicos y sociales, en varias regiones cafeteras de Colombia se ha incrementado en los últimos años la comercialización del grano de café pergamino húmedo, práctica que genera riesgos para la calidad y la inocuidad del café.

### **2.5.1 Análisis de los riesgos en el secado del café al sol**

Para el secado del café al sol, los riesgos biológicos y los químicos están directamente relacionados con la permanencia de los granos de café con altos contenidos de humedad por largos períodos. Entre los riesgos para el café se encuentran:

Una capa de café en secado mayor de a 3 cm., la cual retarda el secado del café y mantiene durante mayor tiempo a los granos con un contenido crítico de humedad. El hongo *Aspergillus ochraceus* que puede producir en el café húmedo la ochratoxina A (OTA), que es una sustancia química tóxica y cancerígena, que ya está regulada para varios alimentos.

El defecto fenol, puede ser ocasionado tanto por la contaminación del grano con insecticidas y solventes, que puede ocurrir en el cultivo, el beneficio o el almacenamiento, como por mohos. El defecto se presenta con mayor frecuencia en los granos dañados por la broca y cuando se almacena café húmedo.

Por consiguiente, el secado de los granos de café sanos junto con los defectuosos y “brocados” representa un riesgo para la calidad. También, los retrasos en el secado del café conducen a la decoloración y al enmohecimiento de los granos y a la presencia de sabores sucio, fenol, terroso y mohoso en la bebida.

### **2.5.2 Análisis de los riesgos en el secado mecánico del café**

En el caso del secado mecánico, los riesgos químicos incluyen también a los combustibles y la contaminación del grano por las emisiones de la combustión

directa, ocurridas al interior de las cámaras donde se depositan los granos para el secado.

Además, cuando se utilizan capas de café mayores a lo especificado en el diseño del secador, se obtienen granos de aspecto heterogéneo (veteados). Por consiguiente, es necesario planificar las cargas de café a secar y operar el intercambio del flujo del aire, según el diseño y la capacidad de los secadores, con el fin de obtener uniformidad en la humedad y en la calidad del grano seco.

### **2.5.3 Buenas Prácticas en el secado del café:**

El secado del café es un proceso que requiere de control. A continuación se detallan algunos límites críticos y prácticas preventivas para asegurar la calidad del café durante el secado.

**Capacitación:** El personal debe lavarse las manos antes de manipular el café pergamino y usar elementos de protección personal. También debe estar capacitado para rotular los secadores, registrar la trazabilidad del café, operar los secadores y utilizar los medidores de la humedad del grano.

**Condiciones ambientales:** Es necesario conocer las épocas del secado del café y las condiciones climáticas como la temperatura ambiente, el brillo solar y los días de lluvia predominantes en el lugar, con el fin de utilizar las tecnologías de secado más apropiadas, estimar el tiempo requerido para que el secado se complete y planificar el manejo y el almacenamiento del café pergamino seco.

**Diseño de los secadores:** Se recomiendan secadores modulares (al sol y mecánicos) de diferentes áreas y volúmenes, de tal forma que se usen dependiendo de las cantidades producidas en las distintas cosechas. En los secadores al sol con cubierta se evita el rehumedecimiento del café. Los

secadores mecánicos deben disponer de combustión externa y chimeneas para el control de la contaminación del producto y del aire. No deben utilizarse superficies de secado de madera, ni de metales que se oxiden.

**Instalación de los secadores:** Los secadores del café deben dotarse de medidores de humedad, termómetros, medidores de caudal del aire y balanzas. Los combustibles deben rotularse.

**Mantenimiento y limpieza:** Los equipos y las instalaciones de secado deben revisarse y repararse oportunamente. Los secadores al sol deben lavarse y los mecánicos limpiarse periódicamente con el fin de eliminar el polvo, las partículas de granos y así, controlar la presencia de los mohos.

**Control del café pergamino a secar:** Se debe secar café libre de defectos e impurezas. Para el sistema de la trazabilidad es necesario registrar la procedencia y las condiciones de procesamiento del café que se va a secar y también marcar el secador con la fecha de inicio de secado, la variedad y la parcela de procedencia.

**Control de las contaminaciones:** Durante el secado del café se debe prevenir la contaminación de los granos por la lluvia, los insectos como la broca, los combustibles, los animales, los mohos y otros materiales. Se debe mantener la higiene de las instalaciones y revisar las barreras de protección del café contra las fuentes de contaminación. No se debe apagar el secador mecánico cuando contiene el café todavía húmedo, ya que esta práctica origina defectos como contaminado, químico y fenol.

**Control de la humedad del grano:** Se requiere un plan de evaluación de la humedad del grano durante el secado, con el fin de evitar pérdidas por sobresecado o por falta de secado. Para el secado mecánico se pueden tomar

muestras cada hora, después de las 12 horas de secado. Los medidores de humedad deben calibrarse periódicamente y las mediciones deben efectuarse a temperatura ambiente. El contenido de humedad final del grano debe estar entre el 10 y el 12%, antes de su empaque.

## **2.6 CRITERIOS DE DISEÑO PARA SILOS METALICOS**

Según el criterio de estados límite de falla (Normas y especificaciones para estudios. proyectos, construcción e instalaciones, ASTM), las estructuras deben dimensionarse de manera que la resistencia de diseño de toda sección, con respecto a cada fuerza o momento interno que en ella actúe (fuerza axial, fuerza cortante, momento flexionante, momento de torsión) o a la combinación de dos más de ellos, sea igual o mayor que el o los valores de diseño de dicha fuerza o momento internos. Las resistencias de diseño deben incluir el factor de reducción FR correspondiente. Las fuerzas y momentos internos de diseño se obtienen, en general, multiplicando por el factor de carga correspondiente los valores de las fuerzas y momentos internos calculados bajo acciones nominales.

Las estructuras metálicas pueden analizarse y diseñarse utilizando métodos elásticos o plásticos; estos últimos son aplicables cuando se satisfacen los requisitos siguientes:

El valor mínimo garantizado del esfuerzo correspondiente al límite inferior de fluencia del acero,  $F_y$ , no es mayor que el 80% de su esfuerzo mínimo especificado de ruptura en tensión,  $F_u$ .

**Tabla 2. Determinación de los peligros en el secado del café al sol**

Tipo de riesgo	Riesgo	Causa y justificación	Probabilidad del riesgo	Significado del riesgo	Medidas preventivas
Físico	Tierra Cenizas Polvo	-Calzado del operario -Pisar el café -Ambientes de secado	Media	Bajo	<b>BPA</b> Capacitación de los operarios Diseño e instalación del secador
Biológico	Hongos	-Guardar café húmedo -Mezclas de café con diferente grado de humedad -Capas gruesas de secado -Ambientes contaminados con hongos -Animales en contacto con el café	Media	Alto	<b>BPA</b> Diseño, capacidad e instalación del secador Higiene de ambientes de secado Uso de trampas contra la broca  <b>Control de operaciones:</b> Separación y rotulación de las áreas de secado Inicio del secado del café inmediatamente después del lavado Evaluación del contenido de humedad del grano Empleo de capas de secado menores a 3 cm Revolver el café durante el secado
	Insectos	-Guardar café húmedo -Daño por la broca			
Químico	OTA	-Guardar café húmedo  -Mezclas de granos de café con diferente grado de humedad  -Secado incompleto	Media	Alto	<b>BPA</b> Higiene de superficies y ambientes de secado  <b>Control de operaciones:</b> Secar el café después del lavado Controlar la humedad del grano Usar capas de secado menores a 3 cm Revolver el café durante el secado
Defectos físicos	Decolorado Flojo Aplastado Pelado Mohoso	-Falta de control de la humedad del grano	Media	Alto	<b>BPA</b> Higiene en los secadores Diseño de utensilios de secado Capacitación de operarios en manejo de utensilios y equipos  <b>Control de operaciones:</b> Secar el café después del lavado Medir la humedad del grano Controlar el tiempo de secado Usar capas de secado menores a 3 cm Revolver el café durante el secado
		-Pisar el café			
		-Daño del grano de café			
Defectos en taza	Sucio Mohoso Terroso Fenol	-Falta de control de la humedad del grano	Media	Alto	<b>BPA</b> Materiales de los secadores Higiene en los secadores Capacitación de los operarios en secado del café  <b>Control de operaciones:</b> Secar el café después del lavado y mantenerlo extendido hasta su secado completo Medir la humedad del grano seco Controlar el tiempo de secado Usar capas de secado menores a 3 cm Revolver el café durante el secado

**Fuente: (Cenicafé, avance técnico 371, mayo de 2008)**

**Tabla 3. Determinación de los peligros en el secado mecánico del café**

Tipo de riesgo	Riesgo	Causa y justificación	Probabilidad del riesgo	Significado del riesgo	Medidas preventivas
Físico	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	-
Biológico	Hongos	Guardar café húmedo Ambientes contaminados con hongos	Media	Alto	<b>BPA</b> Capacitación del operario de secado Diseño y capacidad del secador Higiene de los ambientes de secado  <b>Control de operaciones:</b> Medir la humedad del grano Usar las capas de secado según el diseño del secador Usar aire limpio para el secado
Químico	OTA	Guardar café húmedo	Media	Alto	<b>BPA</b> Capacitación del operario de secado Diseño y capacidad de secador Usar diseños con combustión externa Usar intercambiador de calor Higiene en ambientes de secado Rotular y almacenar adecuadamente los combustibles  <b>Control de operaciones:</b> Medir la humedad del grano Usar capas de secado según el diseño del secador Controlar el tiempo de secado Usar aire limpio para el secado Operar el intercambio de los flujos según el diseño del secador
	Combustibles	Combustibles almacenados inadecuadamente			
	Gases de combustión	Aire de secado contaminado con gases de combustión			
Defectos físicos	Decolorado Flojo Cristalizado Mohoso	Falta de control de humedad del grano Uso de alta temperatura de secado Uso de combustión directa Retiro del café de los silos cuando todavía está húmedo	Alta	Alto	<b>BPA</b> Higiene en los secadores Capacitación para la operación de los secadores Diseño de los secadores Usar intercambiador de calor  <b>Control de operaciones:</b> Iniciar secado después del lavado Medir la humedad del grano Controlar el tiempo de secado Usar capas de secado según el diseño del secador Usar aire limpio para el secado Operar el intercambio de los flujos según el diseño del secador

Fuente: (Cenicafé, avance técnico 371, mayo de 2008)

### 2.6.1 Determinación de presiones y esfuerzos Método de H. Janssen

Según Motta (1982), Fue el primer método para el cálculo de silos en ser desarrollado, en 1895. H. A. Janssen estudió las presiones estáticas debido al material almacenado en silos. Su teoría se basa en el equilibrio de una sección diferencial del silo con el material en reposo. Con este análisis consiguió derivar la expresión para la presión vertical del material, la presión lateral y la fuerza de fricción en la pared del silo. Su método es fácil de llevar a cabo, no es preciso el uso de ordenador para determinar estas fuerzas. Es también uno de los métodos más empleados para el análisis de estas fuerzas y está recomendado por la mayoría de las normativas vigentes para el cálculo de silos.

Las expresiones a las que llegó Janssen son las siguientes:

#### Cálculo de la presión vertical:

$$P_v = \frac{W \times R}{u' \times K} \left( 1 - e^{\frac{-u' \times K}{R \times h}} \right)$$

Donde:

$P_v$  = Presión vertical en Kg/m<sup>2</sup>

$W$  = Densidad del materia almacenado en el silo en Kg/m<sup>3</sup>

$R = A/U$  = Radio hidráulico medio de la sección en m.

$u' = Tg \theta$      $\theta$  Ángulo de rozamiento interno mínimo oscila 20 – 25°

$A$  = Área de la sección recta en m<sup>2</sup>

$U$  = Perímetro de la sección.

$h$  = Altura del nivel del grano.

$K$  = Relación entre presión horizontal y presión vertical, también se puede determinar cómo:

$$K = \frac{1 - \text{sen} \theta}{1 + \text{sen} \theta}$$

$\theta$  = Ángulo de rozamiento del producto - lámina, el cual para silos metálicos oscila entre 30 – 35°.

### **Cálculo de la presión horizontal:**

$$Ph = \frac{W \times R}{u' \times K} \left( 1 - e^{-\frac{u' \times K}{R \times h}} \right)$$

Donde:

Ph = Presión horizontal en Kg/m<sup>2</sup>

De igual forma las fórmulas para la determinación de los esfuerzos horizontales y verticales.

### **Esfuerzos verticales:**

$$Ny = Ph \times r \qquad r = \text{Radio}$$

### **Esfuerzos horizontales:**

$$Nx = u' \left( \frac{Pv}{B} - A h \right)$$

Donde:

$$A = \frac{W \times R}{u'}$$

$$B = \frac{k \times u'}{R}$$

### **Cálculo de espesor de la lámina:**

El cálculo de la se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$e = \frac{N_x}{f's}$$

Según Singer L. Ferdinand (1982)  $f's$  se toma como el 40% de valor del límite de fluencia del acero.

$e$  = espesor de lámina se calcula el crítico

$$f's = f_s \times 0.4$$

### **2.6.2 Diseño De Tornillos**

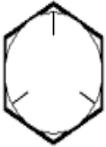
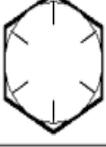
Según ASTM (2000), todos los tornillos de alta resistencia deben apretarse hasta que haya en ellos una tensión no menor que la indicada en la Tabla N° 4. El apriete puede hacerse con el método de la vuelta de la tuerca, por medio de un indicador directo de tensión o utilizando llaves adecuadamente calibradas.

El área resistente efectiva al aplastamiento de tornillos y remaches se calcula multiplicando su diámetro por la longitud de aplastamiento, que es el grueso de la placa en la que están colocados. Si los remaches o tornillos son de cabeza

embutida, para calcular la longitud de aplastamiento se resta la mitad de la profundidad de la cabeza.

La resistencia de diseño de tornillos es igual al producto del factor de resistencia FR por el área nominal de la sección transversal de la parte del vástago no roscada y por la resistencia nominal que corresponde a esa parte del vástago. Los factores de resistencia y las resistencias nominales se dan en la Tabla N° 5

**Tabla 4. Tensión en tornillos.**

Marcado de pernos de acero grado SAE					
Número de grado SAE	Rango del diámetro [inch]	Carga de prueba [kpsi]	Esfuerzo de ruptura [kpsi]	Material	Marcado de la cabeza
1 2	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$ - $\frac{7}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	55 33	74 60	Acero de bajo carbono ó acero al carbono	
5	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	Acero al carbono, Templado y Revenido	
5.2	$\frac{1}{4}$ - 1	85	120	Acero de bajo carbono martensítico, Templado y Revenido	
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	105	133	Acero al carbono aleado, Templado y Revenido	
8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	Acero al carbono aleado, Templado y Revenido	
8.2	$\frac{1}{4}$ - 1	120	150	Acero de bajo carbono martensítico, Templado y Revenido	

**Fuente: ASTM, 2000**

**Tabla 5. Resistencia de tornillos**

<b>RESISTENCIA DE DISEÑO DE REMACHES, TORNILLOS Y BARRAS ROSCADAS</b>				
Elementos de unión	Resistencia en Tensión		Resistencia al cortante en conexiones por aplastamiento	
	Factor de resistencia $F_R$	Resistencia nominal, Kg/cm <sup>2</sup>	Factor de resistencia $F_R$	Resistencia nominal, Kg/cm <sup>2</sup>
Tornillos A307	0.75	3160 <sup>1</sup>	0.60	1900 <sup>2,3</sup>
Tornillos A325, cuando la rosca no está fuera de los planos de corte.		6330		3800 <sup>3</sup>
Tornillos A325, cuando la rosca está fuera de los planos de corte.		6330		5060 <sup>3</sup>
Tornillos A490, cuando la rosca no está fuera de los planos de corte.		7900		4750 <sup>3</sup>
Tornillos A490, cuando la rosca está fuera de los planos de corte.		7900		6330 <sup>3</sup>
Partes roscadas que satisfacen los requisitos de, cuando la rosca no está fuera de los planos de corte		$0.75F_u^1$		$0.45F_u$
Partes roscadas que satisfacen los requisitos de, cuando la rosca está fuera de los planos de corte		$0.75F_u^1$		$0.60F_u$
Remaches A502, grado 1, colocados en caliente		3160		2530 <sup>3</sup>
Remaches A502, grados 2 y 3, colocados en caliente		4200		3380 <sup>3</sup>

**Fuente: ASTM, 2000**

La resistencia de diseño al aplastamiento entre un tornillo o remache y la pieza en que está colocado es  $FRRN$ , donde  $FR = 0.85$  y.

$$R_n = 3 dt F_u$$

Donde:

$d$  = Es el diámetro del remache o tornillo

$t$  = El grueso de la parte conectada

$F_u$  = Su esfuerzo mínimo especificado de ruptura en tensión

**Número De Tornillos Para Las Uniones:** Se ilustrará el método a seguir para hallar el número de tornillos necesarios para las uniones de las láminas que conforman las paredes del silo y el número de tornillos para asegurar el piso falso.

**Uniones de las láminas:**

Según Motta (1982) se tiene para la lámina:

$$P^0 = D \times e \times n \times s$$

Donde:

$P^0$  = Esfuerzo a calcular de la lámina.

D = Diámetro del tornillo

e = Espesor de la lámina

s = Esfuerzo permisible al corte, donde  $s = f_v = 0.4 \times f_y$

$f_v$  = Esfuerzo cortante

$f_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero

n = Número de caras sometidas al corte para el tornillos

Esfuerzo a calcular del tornillo

$$P' = \left( \frac{\pi \times D^2 \times s \times n}{4} \right)$$

$P'$  = Esfuerzo a calcular del tornillo kg

**Número de tornillo:**

$$L' = \frac{Ph \times A}{P^0}$$

Donde:

Ph = Presión horizontal

A = Área de la lámina

P<sup>0</sup> = Esfuerzo de la lámina a calcular

**Distancia entre tornillo:**

$$D' = \frac{h}{L'}$$

Donde:

h = Altura de la lámina

L' = Número de tornillos

D' = Distancia entre tornillos

**Uniones de la malla:**

$$P^0 = D \times e \times n \times s$$

Donde:

P<sup>0</sup> = Esfuerzo a calcular de la lámina.

D = Diámetro del tornillo

e = Espesor de la lámina

s = Esfuerzo permisible al corte, donde  $s = fv = 0.4 \times fy$

fv = Esfuerzo cortante

fy = Esfuerzo de fluencia del acero

n = Número de caras sometidas al corte para el tornillos

Esfuerzo a calcular del tornillo

$$P' = \left( \frac{\pi \times D^2 \times s \times n}{4} \right)$$

P' = Esfuerzo a calcular del tornillo kg

**Número de tornillo:**

$$L' = \frac{Pv \times A}{P^o}$$

Donde:

Pv = Presión vertical

A = Área de la lámina

P<sup>o</sup> = Esfuerzo de la lámina a calcular

**Distancia entre tornillo:**

$$D' = \frac{h}{L'}$$

Donde:

$h$  = Altura de la lámina

$L$  = Número de tornillos

$D$  = Distancia entre tornillos

### 2.6.3 Predimensionamiento de vigas

Según Garcimartín (1998), se parte de los valores de las cargas para determinar los esfuerzos (momento flector  $M$  y esfuerzo cortante  $V$ ), tanto ponderados como característicos, generalmente proporcionados por un análisis de estructuras o calculados a partir de las cargas aplicando las teorías de la Resistencia de Materiales, con el fin de determinar el momento de inercia mínimo para la viga.

Para el dimensionamiento se calcula la estructura más crítica del silo con el fin de dimensionar igual todo el marco estructural; con la metodología se determinan los perfiles:

#### **Determinación de las cargas soportadas por la estructura (Q):**

$$Q = \frac{W}{A}$$

Donde:

$W$  = Peso de la carga que soporta la estructura (carga viva+ carga muerta)

$A$  = Área de la malla.

$$q = Q \times L_{infl}$$

Donde:

$L_{infl}$  = Influencia de la estructura (m)

$q$  = Carga distribuida soportada por la viga

### **Determinación del momento máximo ( $M_{max}$ )**

Las vigas se consideran para el cálculo como vigas biapoyadas, por lo cual se utiliza la ecuación de momento para esta situación.

$$M_{max} = \frac{q \times l^2}{8}$$

Donde:

$q$  = Carga distribuida linealmente sobre la viga (kg/m)

$l$  = Longitud de la viga (m)

### **Momento de inercia**

$$I_x = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E}$$

Dónde:

$q$  = Carga ponderada (kg/cm)

Según Garcimartín (1998), la carga ponderada se toma como  $q / 1,5$  para estructuras con sobrecarga

$l$  = Longitud de la viga (cm)

$E$  = Módulo de elasticidad del acero ( $2,1 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>)

**Comprobación del perfil:** Para la comprobación del perfil se utiliza la comparación de flechas la admisible y la máxima obtenida de la sección, Según Garcimartín (1998), La flecha admisible para vigas de acero hasta 5m de luz es de L/300.

$$f_{adm} = L/300$$

L = Longitud en mm

La flecha máxima

$$f_{max} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I}$$

$$f_{max} < f_{adm} \text{ o.k.}$$

Si la flecha máxima es menor que la admisible se puede decir el chequeo por flechas está bien.

**Tabla 6. Flechas admisibles para vigas de acero**

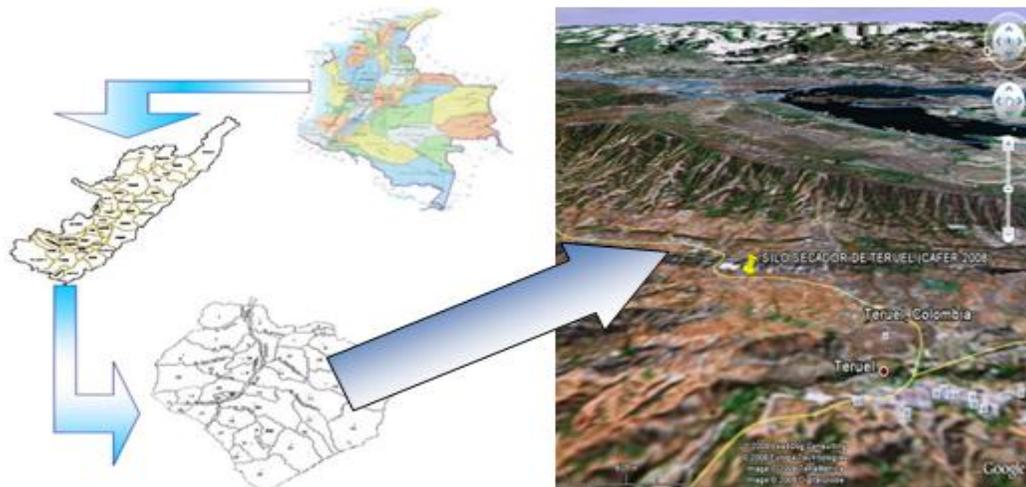
<b>flecha total</b>	L/250
vigas de hasta 5m de luz y viguetas de forjado que no soporten muros	L/300
vigas de más de 5m de luz	L/400
vigas y viguetas que soporten muros fábrica	L/500
ménsulas	L/300

**Fuente: Garcimartín, 1998**

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 LOCALIZACION

El diseño del silo secador vertical para café se realizó teniendo en cuenta las necesidades y condiciones medioambientales del sector cafetero del municipio de Teruel, pero es de aclarar que dicho diseño o modelo puede ser utilizado para secar café en todos los municipios que se beneficien de las actividades del cultivo del café, teniendo en cuenta los factores climatológicos como son: temperatura , humedad relativa con el objetivo de ajustar la temperatura del aire de secado que sea necesaria en determinada región. El municipio de Teruel está localizado en la parte occidental del Departamento del Huila, margen izquierda del Río Magdalena y en las estribaciones de la cordillera Central. Su cabecera municipal está ubicada geográficamente a 2 grados 44 minutos latitud norte y 75 grados 34 minutos longitud oeste a una distancia por carretera de 50 km de la ciudad de Neiva totalmente pavimentada.



**FIGURA 3. Localización del proyecto**

### 3.1.1 Clima e Hidrología

El Municipio de Teruel pertenece a la región Andina de nuestro país. La cabecera municipal se encuentra a 910 m.s.n.m. con temperatura promedio de 23°C.y una humedad relativa del 65%. La mayor altura corresponde al área cercana al Parque Nacional Natural Nevado del Huila (5750m).

#### 3.1.1.1 Factores climáticos

En la tabla N°7 se muestra la clasificación de los pisos térmicos existentes en el municipio de Teruel, los cuales van de una altitudes menores a los 1000 msnm hasta los 5700 msnm.

**Tabla 7. Factores climáticos del municipio de Teruel**

<b>Pisos Térmicos</b>	<b>Alturas (m)</b>	<b>%</b>	<b>Veredas</b>
Cálido (>24°C)	Menor 1000	20,8	La Cañada, Estambul, Portachuelo, Cafuchal, La Castilla, El Tablón, Almorzadero
Templado (18°-24°C)	1000-2000	33.1	La Castilla, Pedernal, Yarumal, Sináí, Gualpí, Primavera.
Frío (12°-18°C)	2000-3000	32.6	Corrales, Pedernal, Las Herreras, La María, Arrayanes, La Floresta, Río Iquira, Paraíso, La Mina, Beberrecio, Monserrate, La Armenia.
Muy Frío(c°-12°C)	3000-4000		La Armenia
Páramo (menor 6°)	4000-5700	3.5	Zona Nevado del Huila.
Total		100%	

**Fuente: POT municipio de Teruel (Huila, Colombia, 2000).**

A demás en el municipio se encuentran 5 estaciones pluviométricas, de las cuales se deduce que los meses más lluviosos son abril, mayo, octubre, noviembre, diciembre y la época de verano corresponde a los meses de junio, julio y agosto; con una precipitación promedio de 1.447 mm.

### **3.1.2.2 Hidrología**

Teruel pertenece al sector de la Cuenca Alta del Río Magdalena en cual encontramos algunas subcuencas y microcuencas como:

♦ Subcuenca el Río Yaguará: con sus microcuencas denominadas Río Iquira y Río Pedernal, Subcuenca Río Baché, Subcuenca Río Páez, La Microcuenca del Río Tune y Microcuenca del Río Iquira:

### **3.2 PARAMETROS DE DISEÑO**

El diseño se hace para una capacidad inicial de 4680 kg de café pergamino húmedo, de los cuales 2340 kg en presecado y 2340 kg en secado. El sistema está compuesto por una unidad de secado (silo), un ventilador centrifugo con alabes inclinados hacia atrás, un intercambiador de calor de dos cilindros y un quemador eléctrico (ACPM).

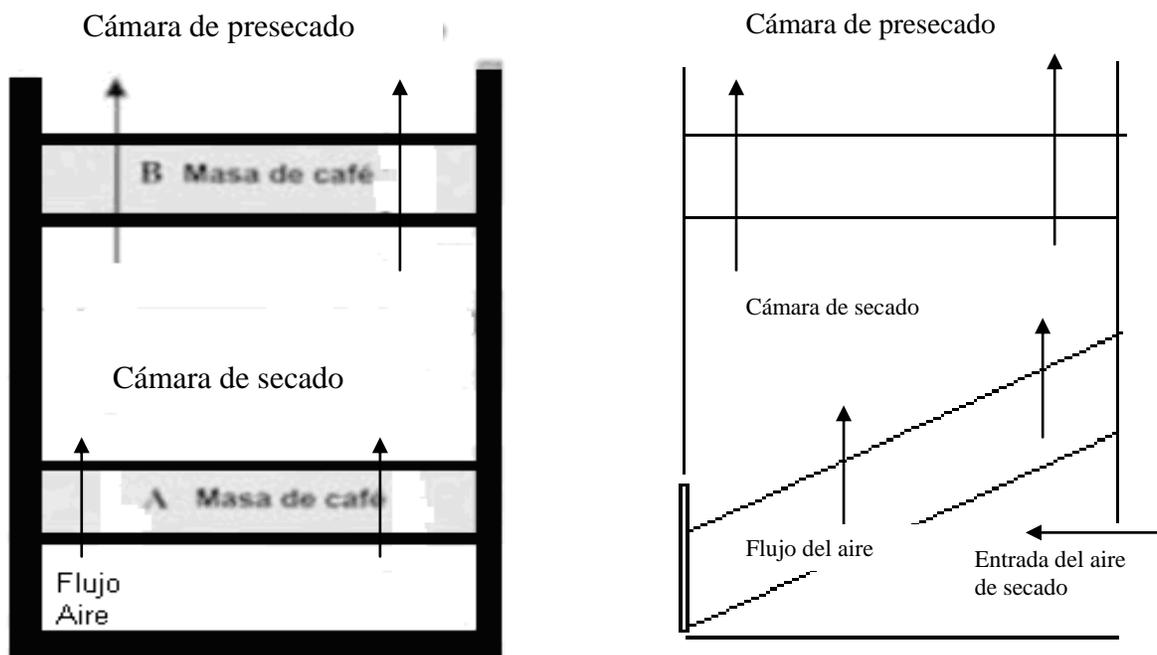
La etapa de secado en el silo tiene una duración estimada de 20 horas, tiempo durante el cual se lleva el café de una humedad inicial de 55% a una final de 12%. La operación en el silo secador inicia con la primera cochada, en donde el café entrará con el 55% de humedad bulbo húmedo a la cámara de presecado y luego es pasado a la cámara de secado con una humedad aproximada 30% en donde termina el proceso de secado.

### **3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SILO DE SECADO:**

El silo secador vertical de dos pisos metálico está compuesto por dos secciones; una de secado y otra de presecado. El secado se encuentra ubicado en la cámara inferior, y el presecado en la cámara superior del silo.

El aire de secado es calentado hasta una temperatura máxima de 50°C. El caudal está fijado según Roa Mejía (2000), el cual indica que para el secado de café pergamino en capa estática el valor recomendado es el de 25m<sup>3</sup>/ minuto/m<sup>3</sup> (25m<sup>3</sup> por minuto por cada m<sup>3</sup> que ocupe la totalidad de café depositado en el secador). Cuando las dos secciones son cargadas al tiempo se requiere de 20-24 horas estimadas para secar el producto desde el 55% bh. hasta 12% bh., esto sucede inicialmente, pues en los siguientes ciclos de secado el tiempo se reducirá a la mitad ya que el café al entrar a la cámara de secado habrá sido presecado en la cámara superior, por lo cual se necesita solamente de 6-8 horas adicionales estimadas para pasar el café del 30% bh al 12% bh final necesario para el almacenamiento de éste.

El principio de funcionamiento del silo secador vertical se representa mediante la siguiente figura:



**FIGURA 4. Funcionamiento del silo secador**

En el silo secador la cámara de presecado está localizada sobre la cámara de secado; el aire que sale de la cámara inferior o de secado pasa a la cámara superior a través de la malla perforada, realizando el presecado en forma ascendente.

Una vez el grano ubicado en la cámara inferior ha alcanzado el contenido de humedad deseado se retira por las compuertas inferiores de descarga haciendo uso de la gravedad, esto debido a que el piso inferior se encuentra con una inclinación de 35°; el grano que se encuentra en la cámara superior (de presecado) es trasladado por gravedad a la cámara inferior al retirar los soportes ubicados en las paredes haciendo que el piso del segundo nivel del silo, el cual se encuentra abisagrado, se abra y caiga el grano a la cámara inferior para terminar allí su proceso de secado.

### **3.4 CAPACIDAD POTENCIAL DEL SILO SECADOR:**

Para café pergamino húmedo (50% bh.), el secador tiene una capacidad de 4680 kg, de los cuales se encuentra distribuido dentro del silo secador 2340 kg para secado y 2340 Kg. en presecado, empleando una capa de masa de grano de café de 0.4 m.

Teóricamente se obtiene de la siguiente manera el peso final del grano:

$$W_i * (100 - H_{bhi}) = W_f * (100 - H_{bhf})$$

Donde:

$W_i$  = peso inicial del grano en cámara de presecado

$W_f$  = peso final del grano

$H_{bhi}$  = humedad inicial base húmeda

$H_{bhf}$  = humedad final base húmeda

Así:

$$W_f = W_i * (100 - H_{bhi}) / (100 - H_{bhf})$$

$$W_f = 2340 \text{ Kg} * (100 - 50\%) / (100 - 12\%)$$

$$W_f = 1329.55 \text{ Kg. (Peso café seco)}$$

### 3.5 COMPONENTES DEL SISTEMA SILO SECADOR:

El sistema de silo secador vertical metálico de dos pisos está compuesto por tres unidades principales, las cuales son: unidad silo metálico, unidad de ventilación, y la unidad calorífica con su fuente energética (intercambiador de calor y quemador).

#### 3.5.1 Dimensiones del silo metálico:

El silo secador tiene una altura total de 5m, esto obedeciendo a la altura de cada una de las cámaras como se muestra en la tabla N°8, en donde se especifica la altura que tiene cada una de las cámaras que conforman el silo, en donde se puede observar una altura de 3.5m en la cámara inferior del silo (secado), esto debido a la inclinación de 35° que tiene ésta.

**Tabla 8. Especificación de la altura del silo**

<b>ESPECIFICACIONES</b>	<b>DISTANCIA (m)</b>
altura de la base del silo a la cámara inferior	0,5
altura del piso cámara inferior al piso cámara superior	3,5
altura del piso cámara superior al cielorrazo	1.0
<b>altura total silo</b>	<b>5.0</b>

Cada sección del silo se encuentra conformada por 5 láminas galvanizada calibre 20 (espesor 0.90mm) de 3m<sup>2</sup> (3m\*1m), esto obedeciendo las dimensiones del silo, con el fin de utilizar lámina unidas entre sí con tornillos en acero de 1/4" distribuido a lo ancho de la lámina espaciados cada 25cm, con la finalidad de que el silo sea totalmente desarmable y portátil.

### 3.5.1.1 Volumen de la masa de café almacenado en el silo:

#### Parámetros de diseño silo secador de café:

- ◆ Capacidad total = 4680 kg
- ◆ Cámara de secado = 2340 kg
- ◆ Cámara de presecado = 2340 kg
- ◆ Altura de la capa de grano = 0.4m
- ◆ Densidad café pergamino húmedo = 650 kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Masa de café a secar (kg)}}{\text{Densidad de café (kg/m}^3\text{)}}$$

- Densidad café húmedo lavado ( $\rho$ ) = 650Kg/m<sup>3</sup> (Tomada de CENICAFE, 1988).

$$\text{Volumen} = \frac{2340 \text{ kg}}{650 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Volumen} = 3.6 \text{ m}^3$$

#### 3.5.1.2 Área de cada cuarto secador:

$$\text{Área} = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)}}{\text{espesor capa de café (m)}}$$

$$\text{Área} = \frac{3,6\text{m}^3}{0,4\text{m}}$$

$$\text{Área} = 9.0 \text{ m}^2$$

De acuerdo con lo anterior el área de cada cámara de secado (presecado y secado), será de 9.0 m<sup>2</sup>, con dimensiones así: 3.0 m de largo \* 3.0 m de ancho.

Por consiguiente el silo esta diseñado para un área total de secado de 18.0 m<sup>2</sup> y un volumen total de secado de 7.2 m<sup>3</sup>

En la tabla N°9 se muestran las dimensiones para el silo secador (ancho y largo de la cámara de secado) las cuales se calcularon para utilizar láminas o mallas perforadas de 3 m x 1 m, de esta manera se evita, en la mayoría de los casos, cortar las láminas en pedazos menores.

**Tabla 9. Dimensiones de cada cámara del silo secador**

Dimensiones		Área de la lámina perforada (m <sup>2</sup> )	Capacidad máxima de cámara de secado (m <sup>3</sup> )
Largo (m)	Ancho (m)		
3.0	3.0	9.0	3.6

### **3.5.1.3 Determinación de presiones sobre las paredes y el piso del silo según metodología de H. Janssen (1985)**

Para la determinación de las presiones ejercidas por el grano en el silo se utiliza el método de H. Janssen, en el cual se calcula las presiones actuantes sobre las paredes del silo y el fondo.

**Cálculo de la presión vertical:** Para el cálculo de la presión vertical se utiliza la siguiente ecuación determinada por H. Janssen:

$$P_v = \frac{W \times R}{u' \times K} \left( 1 - e^{-\frac{u' \times K}{R \times h}} \right)$$

Donde:

$P_V$  = Presión vertical en  $\text{Kg/m}^2$

$W$  = Densidad del materia almacenado en el silo en  $\text{Kg/m}^3$

$R = A/U$  = Radio hidráulico medio de la sección en m.

$u' = \text{Tg } \theta$   $\theta$  ángulo de rozamiento interno mínimo oscila  $20 - 25^\circ$

$A$  = Área de la sección recta en  $\text{m}^2$

$U$  = Perímetro de la sección.

$h$  = Altura del nivel del grano.

$K$  = Relación entre presión horizontal y presión vertical, también se puede determinar cómo:

$$K = \frac{1 - \text{sen } \theta}{1 + \text{sen } \theta}$$

$\theta$  = Ángulo de rozamiento interno del producto, el cual para silos metálicos oscila entre  $0.30 - 0.35$ .

Desarrollando la metodología para determinar la presión vertical se tiene que:

$$K = \frac{1 - \text{sen } \theta}{1 + \text{sen } \theta}$$

$\theta$  = El ángulo de rozamiento para silos metálicos es de  $31^\circ$  (Motta y Repizo, 1982)

$$K = \frac{1 - \text{sen } 31^\circ}{1 + \text{sen } 31^\circ}$$

$$K = 0.3201$$

$$R = A/U$$

$$R = (9\text{m}^2)/(3\text{m} \times 4)$$

$$R = 0.75 \text{ m}$$

$$u' = Tg \theta$$

$\theta = \text{Ángulo de rozamiento mínimo es de } 21^\circ.$

(Motta y Repizo, 1982)

$$u' = Tg 21^\circ$$

$$u' = 0.39$$

Entonces la presión vertical es igual a:

$$P_v = \frac{W \times R}{u' \times K} \left( 1 - e^{\frac{-u' \times K}{R \times h}} \right)$$

$$P_v = \frac{650 \times 0.75}{0.39 \times 0.3201} \left( 1 - e^{\frac{-0.390 \times 3201}{0.75 \times 0.4}} \right)$$

$$P_v = 1329,65 \text{ kg/m}^2$$

**Cálculo de la presión horizontal:** Para el cálculo de la presión horizontal se utiliza la siguiente ecuación determinada por H. Janssen:

$$P_h = \frac{W \times R}{u'} \left( 1 - e^{\frac{-u' \times K}{R \times h}} \right)$$

Donde:

$P_h = \text{Presión horizontal en Kg/m}^2$

Entonces la presión horizontal es igual a:

$$Ph = \frac{650 \times 0.75}{0.39} \left( 1 - e^{\frac{-0.390 \times 3201}{0.75 \times 0.4}} \right)$$

$$Ph = 492,10 \text{ kg/m}^2$$

**Cálculo de esfuerzos:** Para el cálculo de los esfuerzos horizontales y verticales se utilizan las siguientes ecuaciones:

Esfuerzos verticales:

$$Ny = Ph \times r \qquad r = \text{radio}$$

$$r = \text{perímetro} / 2\pi$$

$$r = 12\text{m} / 2\pi$$

$$r = 1.90\text{m}$$

$$Ny = 491,10 \times 1,9$$

$$Ny = 933.09 \text{ kg/m}$$

Esfuerzos horizontales:

$$Nx = u' \left( \frac{Pv}{B} - A h \right)$$

Donde:

$$A = \frac{W \times R}{u'} = \frac{750 \times 0.75}{0.39}$$

$$A = 1422,30 \text{ kg/m}$$

$$B = \frac{k \times u'}{R} = \frac{0.3201 \times 0.39}{0.75}$$

$$B = 0.166/\text{m}$$

Entonces:

$$N_x = 0.39 \left( \frac{491,1}{0,166} - (1422,3 \times 0.4) \right)$$

$$N_x = 924,63 \text{ kg/m}$$

#### 3.5.1.4 Cálculo de espesor de la lámina

El cálculo del espesor se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$e = \frac{N_x}{f's}$$

Donde:

e = Espesor de lámina se calcula el crítico

f's =  $f_s \times 0.4$  (tomado de singer R.F, 1991)

$f_s = 3700 \text{ lb/pul}^2$  (límite de fluencia del acero)

$f_s = 3700 \text{ lb/pul}^2 \times 1 \text{ pul}^2 / 2(2,54\text{cm})^2 \times (100\text{cm})^2 / 1\text{m}^2 \times 1\text{kg} / 2.2\text{lb} = 2606823,3 \text{ kg/m}^2$

$f's = 2606823.3 \text{ kg/m}^2 \times 0.4$

$f's = 1042729,395 \text{ kg/m}^2$

Luego el espesor es de

$$e = \frac{924,63 \text{ kg/m}}{1042729,39 \text{ kg/m}^2}$$

$$e = 0.000894 \text{ m} = 0.89 \text{ mm}$$

Para lo cual se determina que el espesor de lámina requerido para el silo es de una lámina calibre 20 que tiene un espesor de 0.9mm mayor al requerido por las presiones del grano el cual es de 0.89mm.

### 3.5.1.5 Cálculo de tornillos para las uniones

La siguiente metodología se utiliza para hallar el número de tornillos en las uniones de cada una de las secciones del silo, al igual que el número de tornillos necesarios para asegurar la malla.

**Cálculo de tornillos para las uniones de las láminas:** Para el cálculo de las uniones de las láminas se va a trabajar con un perno de alta resistencia de diámetro de 1/4 de pulgada o de 0,635 cm, el cual tiene una resistencia de 120kpsi o 8454,56kg/cm<sup>2</sup> para el cual se va a calcular la cantidad de tornillos y el espaciamiento.

$$P^0 = D \times e \times n \times s$$

Donde:

$P^0$  = Esfuerzo a calcular de la lámina.

D = Diámetro del tornillo

e = Espesor de la lámina

s = Esfuerzo permisible al corte del perno, donde  $s = f_v = 0.4 \times f_y$

$f_v$  = Esfuerzo cortante del perno

$f_y$  = Esfuerzo de fluencia del perno

$n$  = Número de caras sometidas al corte para el tornillos

$$P^0 = 0.635\text{cm} \times 0.09\text{cm} \times 1 \times 8454,56\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$P^0 = 485,46\text{kg}.$$

Esfuerzo a calcular del tornillo

$$P' = \left( \frac{\pi \times D^2 \times s \times n}{4} \right)$$

$P'$  = esfuerzo a calcular del tornillo kg

$$P' = \left( \frac{\pi \times (0.635\text{cm})^2 \times 8454,56\text{kg}/\text{cm}^2 \times 1}{4} \right)$$

$$P' = 2677.49 \text{ kg}.$$

**Número de tornillos:**

$$L' = \frac{Ph \times A}{P^0}$$

Donde:

$Ph$  = Presión horizontal

A = Área de la lámina sin tener en cuenta el traslape entre lámina.

P<sup>0</sup> = Esfuerzo de la lámina a calcular

$$L' = \frac{492,1 \text{ kg/m}^2 \times 3 \text{ m}^2}{485,46 \text{ kg}}$$

$$L' = 3,03 \approx 4 \text{ tornillos}$$

**Distancia entre tornillo:**

$$D' = \frac{h}{L'}$$

Donde:

h = altura de la lámina

L' = número de tornillos

D' = distancia entre tornillos

$$D' = \frac{100 \text{ cm}}{4}$$

$$D' = 25 \text{ cm}$$

Para asegurar la lámina se requiere de 4 pernos de alta resistencia tipo 5 y se distancia a 25 centímetros cada uno a lo largo de la lámina (1m).



**FIGURA 5. Disposición de tornillos para uniones de la lámina**

**Cálculo de tornillería para asegurar la malla:** Se utiliza el mismo tornillo para la malla (1/4") y se sigue la misma metodología para determinación de los esfuerzos de la lámina ( $P^0$ ) y esfuerzo del tornillo ( $P'$ ), obteniendo los siguientes valores:

$$P^0 = 0.635\text{cm} \times 0.09\text{cm} \times 1 \times 8454,56\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$P^0 = 485,46\text{kg.}$$

$$P' = \left( \frac{\pi \times (0.635\text{cm})^2 \times 8454,56\text{kg}/\text{cm}^2 \times 1}{4} \right)$$

$$P' = 2677,49 \text{ kg.}$$

El número de tornillo se determina de la siguiente manera:

$$L' = \frac{P_v \times A}{P^0}$$

Donde:

$P_v$  = Presión horizontal

$A$  = Área de la lámina sin tener en cuenta el área traslapo

$P^0$  = Esfuerzo de la lámina a calcular

$L'$  = Número de tornillos

$$L' = \frac{1329,65 \text{ kg/m}^2 \times 3 \text{ m}^2}{485,46 \text{ kg}}$$

$$L' = 9,21 \approx 10 \text{ tornillos}$$

**Distancia entre tornillo:**

$$D = \frac{h}{L'}$$

Donde:

$h$  = Altura de la lámina

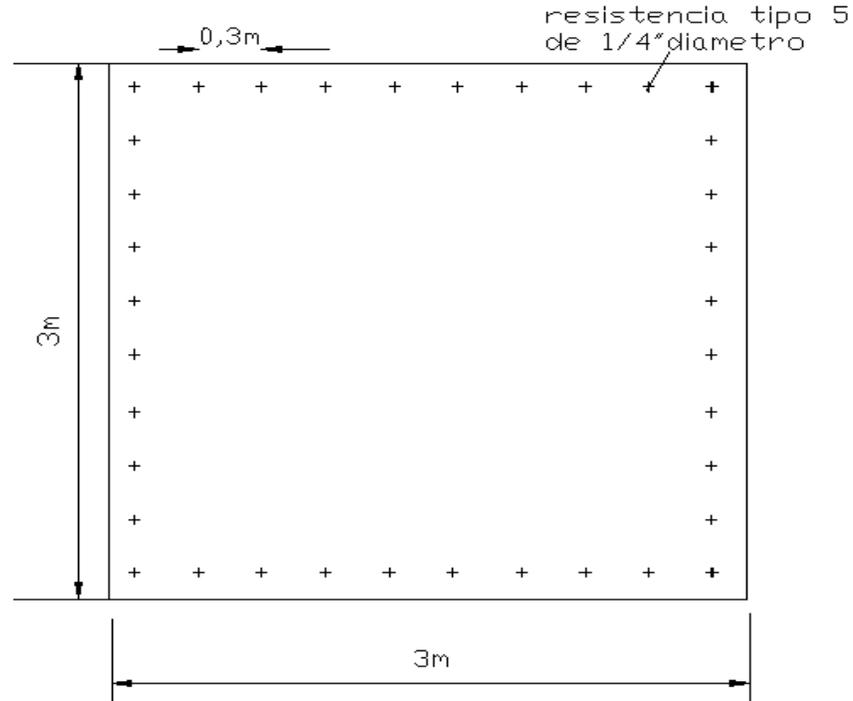
$L'$  = Número de tornillos

$D$  = Distancia entre tornillos

$$D = \frac{300 \text{ cm}}{10}$$

$$D = 30 \text{ cm}$$

Para asegurar la lámina troquelada utilizada para piso de cada una de las cámaras se requieren de 10 pernos de alta resistencia tipo 5 y se distancia a 30 centímetros cada uno a lo largo de la lámina (3m).



**FIGURA 6. Disposición de tornillos para asegurar lámina perforada**

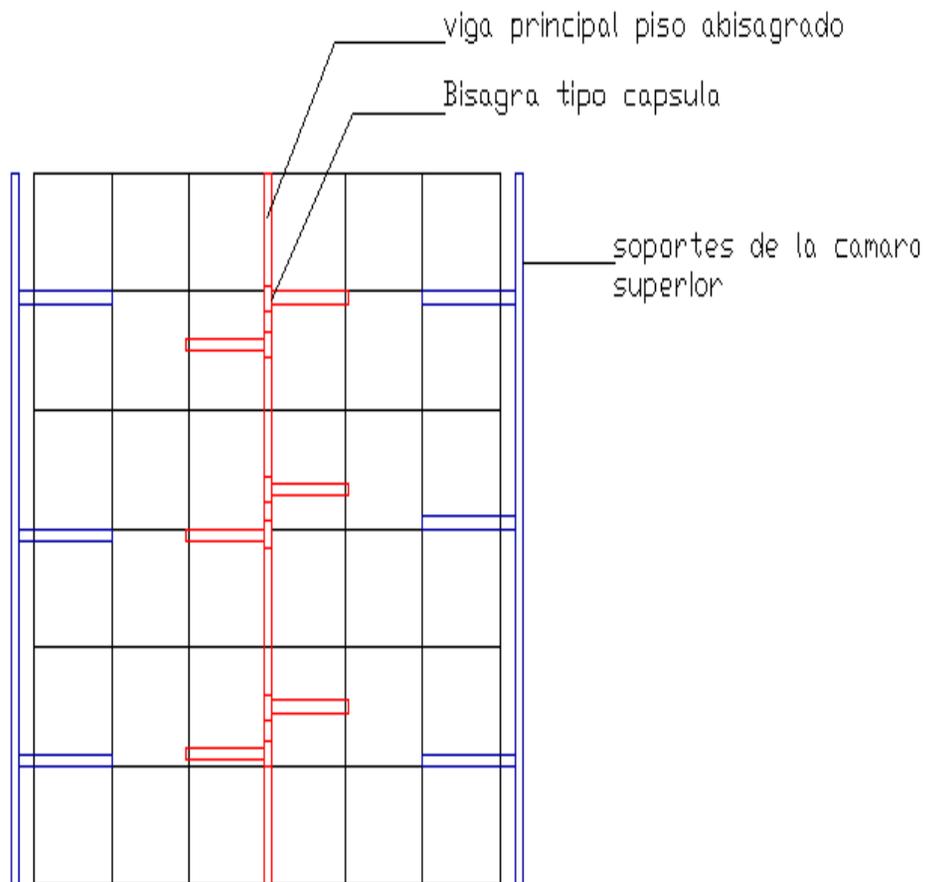
### 3.5.2 Cámara de secado

La cámara superior debe tener una altura de aproximadamente 1.0m, comprendida entre el cielo raso y la lámina perforada donde reposa la masa de café, ya que esta altura debe permitir la circulación del aire y el manejo del café dentro del cuarto ( Ver figura N° 8 ).

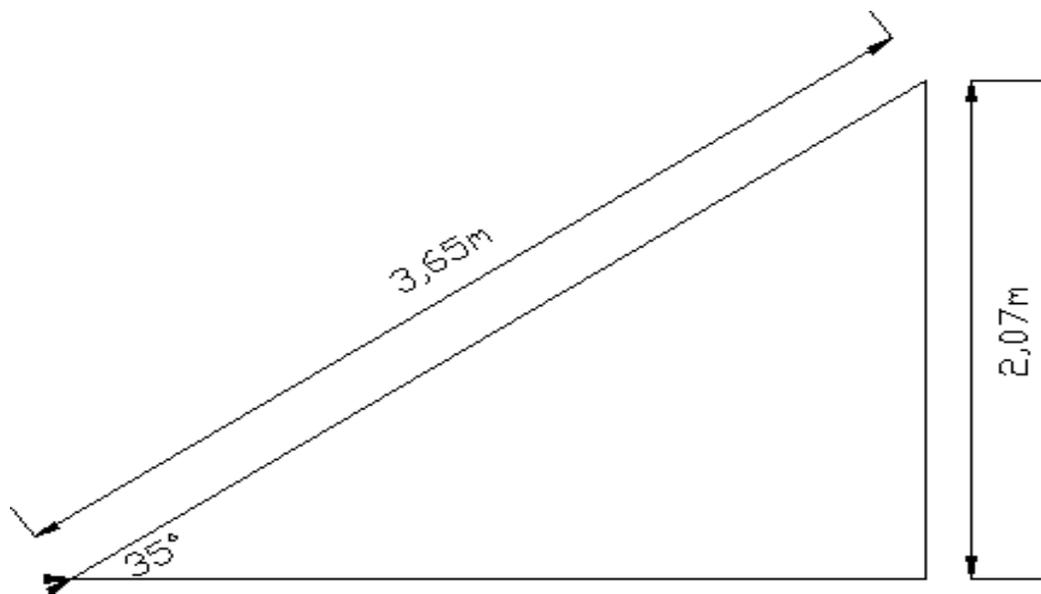
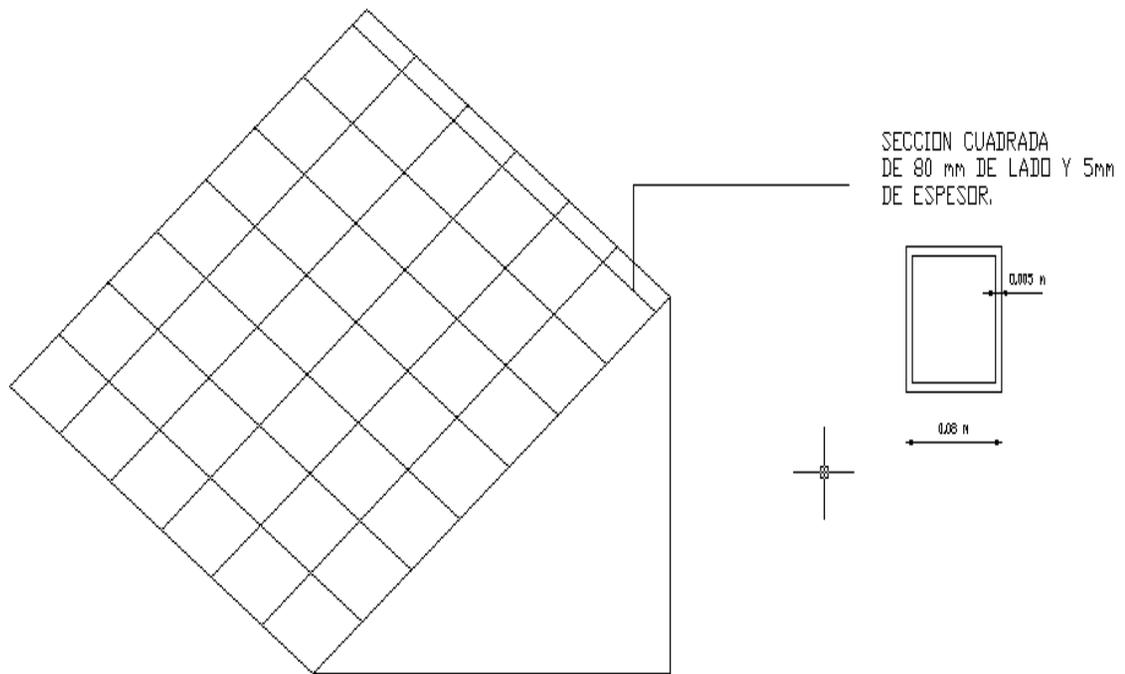
El piso de este cuarto consta de lámina troquelada galvanizada que sirve como base al depósito del grano, la cual se encuentra abisagrada en el centro, esto con el fin de facilitar el sistema de descargue.

La cámara inferior (secado) consta de un piso en lámina troquelada galvanizada, el cual se encuentra inclinado a  $35^{\circ}$  , respecto a la horizontal, esto con el objetivo de realizar la descarga del grano por gravedad aprovechando el ángulo de reposo del café (Ver figura N° 9).

Esta cámara debe estar ubicada a una altura mínima de 0.5m entre el plenúm y el piso del silo, debe tener el piso removible para efectuar limpiezas periódicas. Con el objetivo de evitar problemas en la uniformidad de secado, se recomienda revolver los granos a intervalos regulares de 3 horas, de manera que al final del proceso su contenido de humedad sea uniforme.



**FIGURA 7. Detalle cámara Superior (Presecado)**



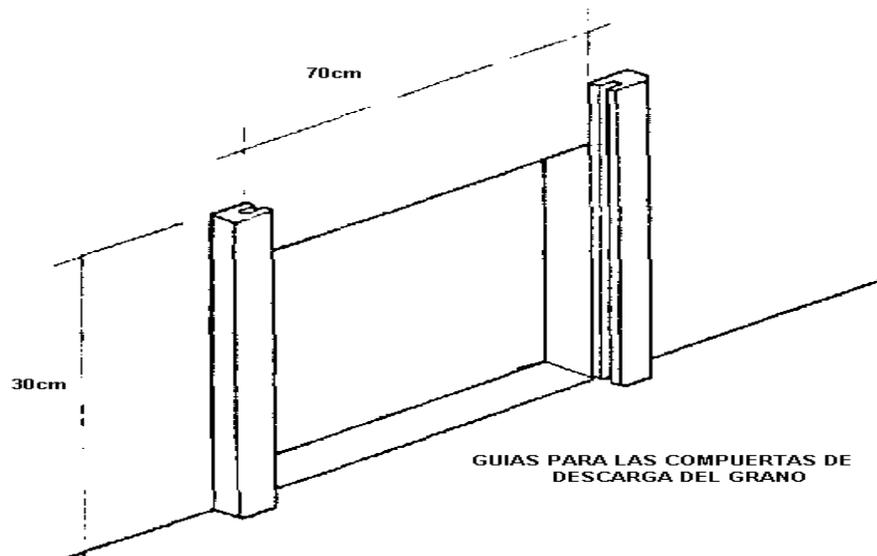
**FIGURA 8. Detalle cámara inferior (Secado)**

### 3.5.3 Puertas de cargue y descargue del grano

En la parte superior del silo se localiza la zona de cargue, la cual se encuentra totalmente abierta, por donde se carga de grano el cual puede ser llenado por gravedad, ubicando el silo en una parte baja, manualmente mediante el traslado del grano haciendo uso de escaleras anexas o mecánicamente por elevador de cangilones o poleas ubicadas en la parte superior del silo.

Para pasar el café de la cámara superior (presecado) a la cámara inferior (secado) se utiliza un sistema de piso abisagrado con soportes en cada extremo dispuesto en la cámara de presecado, con el objetivo de realizar la descarga por gravedad; la cámara de secado que se encuentra en la parte inferior del silo, tiene una inclinación de  $35^\circ$  con el fin de facilitar la descarga final de grano utilizando.

En la parte inferior del silo se encuentran dispuestas tres puertas de dimensiones  $0.70 \times 0.30\text{m}$ , distancias  $0.3\text{m}$  entre sí, para el descargue de la cámara de secado por gravedad con el fin de que se faciliten las labores de manejo del café.



**FIGURA 9. Compuerta de descarga de grano.**

Todas las puertas del silo deben mantener sus empaquetaduras en buen estado. Deben colocarse en la parte inferior y superior de cada cuarto o compartimiento y quedar distribuidas uniformemente.

#### **3.5.4 Piso de fondo perforado:**

El piso falso consta de lámina galvanizada calibre 20, tamaño 3 \* 1 m, espesor: de 0.90 mm con perforaciones de 4mm de diámetro que permiten el paso del flujo del aire.

La lámina requiere de una estructura metálica conformada por vigas de acero de sección cuadrada hueca de (40X25) mm por 4mm de espesor, distribuidas en forma de cuadrícula cada 50 cm, la cual permite soportar el peso de la masa de grano de café, evitando con esto que falle la estructura.

El piso perforado en la cámara superior (presecado) abisagrado en el centro con el objetivo de realizar la descarga de manera más fácil y práctica, ya que al remover los soportes que sostienen el piso, los cuales se encuentran ubicados en la parte superior de las paredes del silo, el piso abisagrado cae por efecto del propio peso del grano realizando de esta manera la descarga a la cámara inferior.

En la cámara inferior se encuentra soportado por un marco estructural, que a su vez descansa sobre ángulos estructurales en L de acero de 40mm \* 25mm \* 4mm, con el objetivo de soportar el peso del grano de café y de la estructura metálica como tal.

A continuación se muestra el cálculo de la viga crítica de la estructura metálica que soporta dicho peso

##### **3.5.4.1 Cálculo estructural de soporte para la lámina perforada**

Para el cálculo de estructural de soportes para la lámina perforada de cada una de las cámaras se toman las vigas más críticas, se determinan las secciones a utilizar para ser aplicado en los demás soportes. El soporte para la lámina se encuentra

en forma de cuadrícula de 50cm entre viguetas, esto con el fin de impedir la deformación crítica en la lámina perforada ocasionada por el peso del grano y el peso propio de la estructura.

**Cálculo para el marco de soporte para cámara de presecado:** El piso de la cámara de presecado se encuentra dividido en dos partes quedando secciones de 1,5m ancho por 3 m de largo, de igual forma este soporte va en forma de cuadrícula de 50cm entre soporte; si la carga distribuida que se encuentra sobre el soporte el cual es igual a la sumatoria de las cargas de la estructura (lámina troquelada), cargas por producto y cargas vivas, esta carga distribuida neta es multiplicado por un factor de seguridad del 60% obteniendo la carga distribuida (q).

$$W_{\text{producto}} = \rho \times V$$

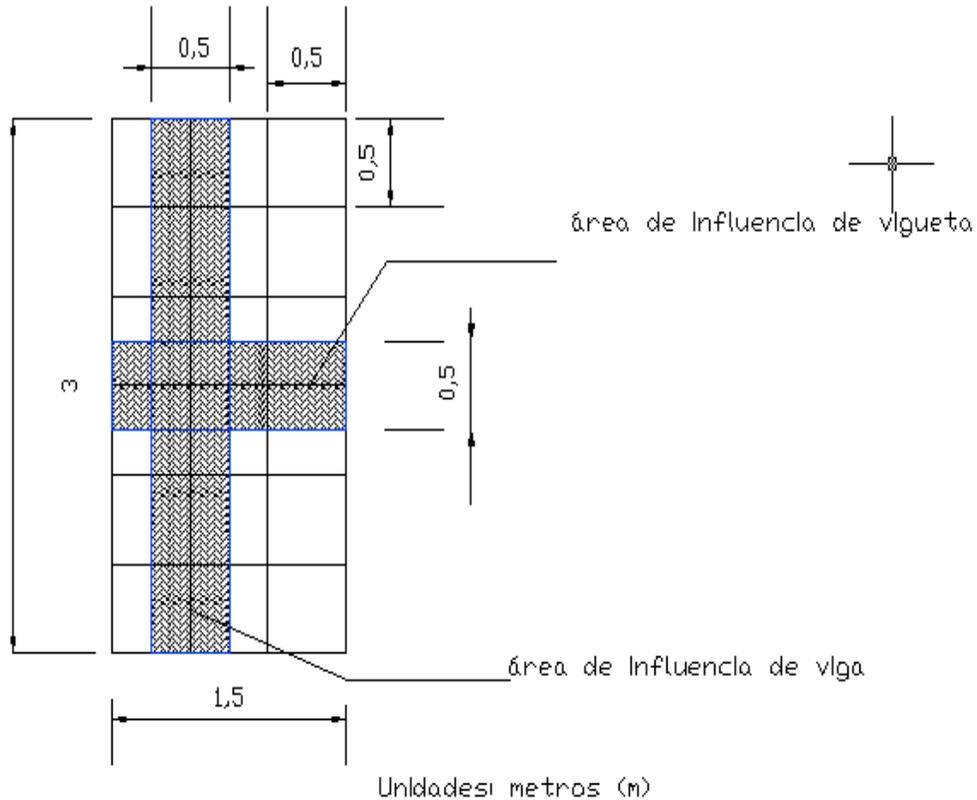
Donde:

V = volumen del grano a contener ( $\text{m}^3$ )

$\rho$  = Densidad del café ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), tomando como referencia que la densidad inicial con la que ingresa el grano al silo es de  $650 \text{ kg}/\text{m}^3$ , el peso de la sección a utilizar es de  $3,24\text{Kg}/\text{m}$

$$W_{\text{producto}} = 650 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 1,8 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{producto}} = 1170\text{kg}.$$



**FIGURA 10. Marco estructural de soporte para cámara de presecado**

**Determinación de las cargas:**

Para determinar el peso de la estructura solo se toma el peso de la lámina troquelada de 4mm de diámetro calibre 20 la cual va a soportar el peso del grano, al igual que el peso del perfil (3.24 kg/m) y de la tornillería (0.025 kg por cada tornillo)

$$W_{\text{Estructura}} = W_{\text{Lámina}} + W_{\text{Perfil}} + W_{\text{Tornillos}}$$

$$W_{\text{lámina}} = \text{Peso de la lámina calibre 20 que es de } 8\text{kg/m}^2$$

$$W_{\text{lámina}} = 8 \text{ kg/m}^2 \times (1,5 \times 3) \text{m}^2$$

$$W_{\text{lámina}} = 36 \text{ kg.}$$

$$W_{\text{perfil}} = 3,24 \text{ kg/m} \times 1,5\text{m}$$

$$W_{\text{perfil}} = 4,86 \text{ kg}$$

$$W_{\text{Tornillos}} = \text{Peso del tornillo} \times \text{No de tornillos}$$

$$W_{\text{Tornillos}} = 0,025\text{Kg} \times 40$$

$$W_{\text{Tornillos}} = 1\text{Kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = 36\text{kg} + 4,86\text{kg} + 1\text{kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = 41,86\text{kg}$$

La carga viva se asume con un peso de 200 kg, esto para efectos de mantenimiento del silo.

$$W_{\text{total}} = W_{\text{estructura}} + W_{\text{producto}} + W_{\text{viva}}$$

$$W_{\text{total}} = 41,86\text{kg} + 1170\text{kg} + 200\text{kg}$$

$$W_{\text{total}} = 1411,86\text{kg}$$

Se divide la carga total en el área del piso para determinar la carga distribuida y luego se le aplica el factor de seguridad:

$$q = \frac{W_{\text{total}}}{4,5} \times fs \qquad fs = 1,6$$

$$q = 313,75 \text{ kg/m} \times 1,6$$

$$q_{\text{neta}} = 502 \text{ kg/m}^2$$

Se calculan las estructuras más críticas las cuales son las que tienen una mayor área de influencia de la carga distribuida.

Se toma la vigueta crítica la cual tiene una longitud de 1,5 m

$$Q_{\text{viga}} = q_{\text{neta}} \times L$$

Donde:

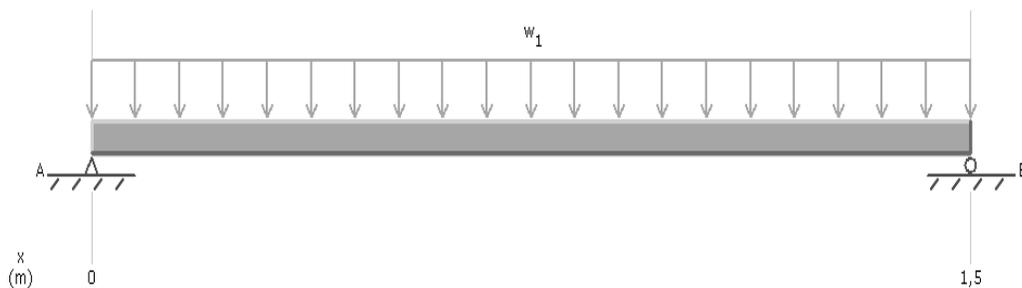
$q_{\text{neta}}$  = carga distribuida neta

$L$  = influencia de la viga

Entonces la distribuida es:

$$q_{\text{neta}} = 502 \text{ kg/m}^2 \times 0.5\text{m}$$

$$q_{\text{neta}} = 251 \text{ kg/m}$$



**FIGURA 11. Carga distribuida a través de la viga cámara de presecado.**

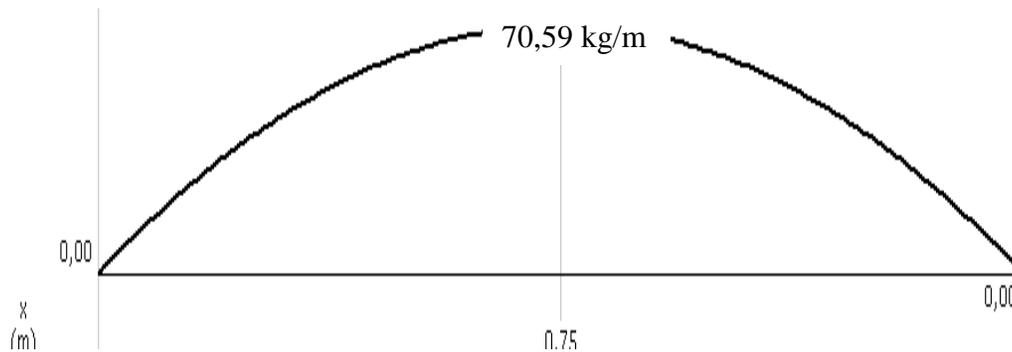
Se determina el momento máximo el cual se toma como una viga biapoyada.

$$M_{\text{max}} = \frac{q \times l^2}{8}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{251 \times 1,5^2}{8}$$

$$M_{\text{max}} = 70,59 \text{ kg.m}$$

Ese momento máximo se presenta a 0.75 m de la vigueta.



**FIGURA 12. Diagrama de momento máximo en la viga de la cámara de presecado**

Una vez determinado el momento máximo se procede a determinar el momento de inercia mediante la siguiente fórmula:

$$I_x = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E}$$

Dónde:

$q$  = Carga ponderada (kg/cm) =  $q / 1,5$

$l$  = Longitud de la viga (cm)

$E$  = Módulo de elasticidad del acero ( $2,1 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>)

$$q = 251 / 1,5$$

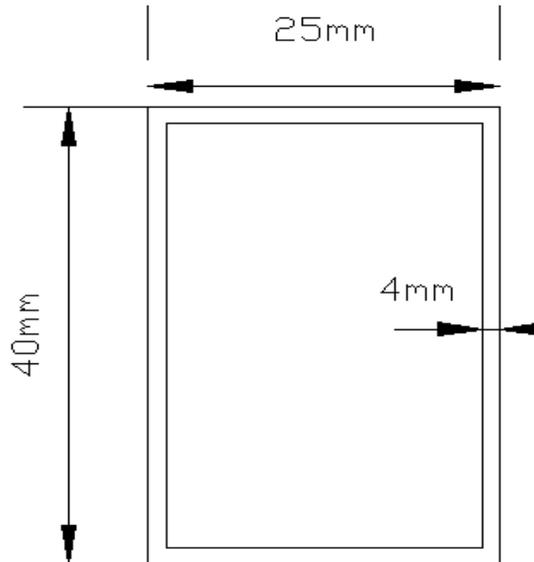
$$q = 167,33 \text{ kg/m} = 1,6733 \text{ kg/cm}$$

Entonces:

$$I_x = \frac{5 \times 1,2497 \times 150^4}{384 \times 2,1 \times 10^6}$$

$$I_x = 5,25 \text{ cm}^4$$

Teniendo la inercia se puede utilizar un perfil rectangular de 40mm de altura y 25 mm de base el cual tiene 4 mm de espesor el cual tiene una  $I_x$  de  $7,3 \text{ cm}^4$  mayor al requerido, dicho perfil tiene un peso de  $3,24\text{kg/m}$ .



**FIGURA 13. Sección de la viga (presecado).**

Flecha admisible y máxima para la vigueta:

La flecha admisible ( $f_{adm}$ ):  $L/500$

$L$  = longitud en mm

$$f_{adm} = 1500/300$$

$$f_{adm} = 5\text{mm}$$

La flecha máxima

$$f_{max} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I}$$

$$f_{\max} = \frac{5 \times 251 \text{ k/m} \times (1,5\text{m})^4}{384 \times 2,1\text{E}^{10} \text{ k/m}^2 \times 7,3\text{E}^{-12} \text{ m}^4}$$

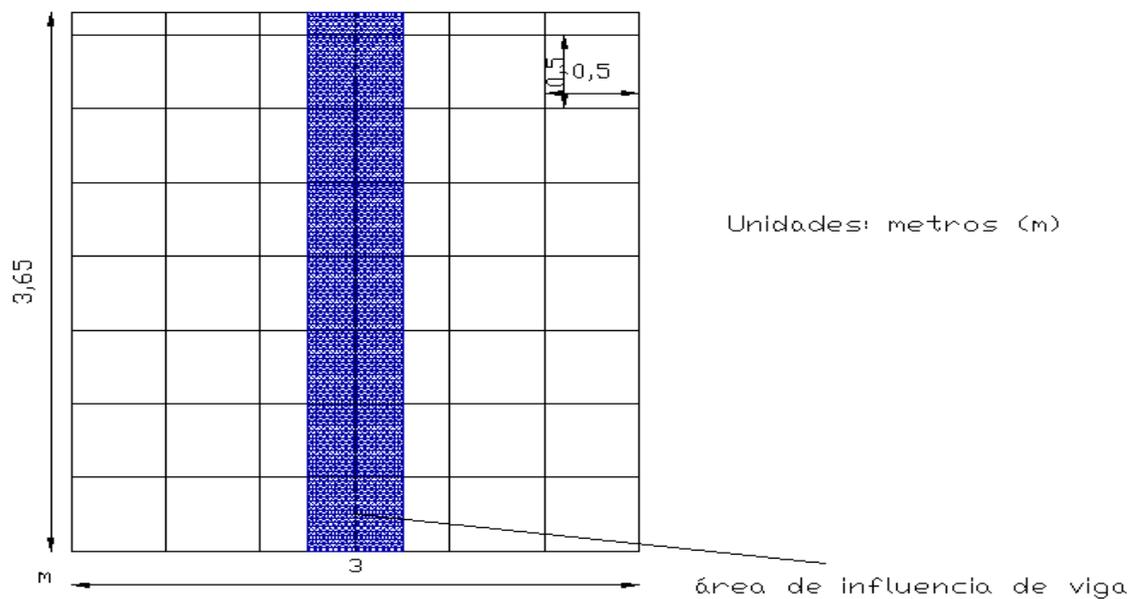
$$f_{\max} = 0,0022\text{m} = 2,2\text{mm}$$

$$f_{\max} = 2,2\text{mm} < f_{\text{adm}} \text{ O.K.}$$

Como la flecha máxima es menor que la admisible se puede decir el chequeo por flechas está bien.

#### Cálculo para el marco de soporte para cámara de secado:

Se realiza el mismo procedimiento anterior, solo teniendo en cuenta que las dimensiones de las vigas varían debido a la inclinación de  $35^\circ$  que tiene el piso para facilitar la descarga del grano.



**FIGURA 14. Marco estructural de soporte para cámara de secado**

**Determinación de las cargas:**

$$W_{\text{producto}} = \rho \times V$$

$$W_{\text{producto}} = 650 \text{ kg/m}^3 \times 4,38 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{producto}} = 2847 \text{ kg.}$$

$$W_{\text{estructura}} = W_{\text{lámina}} + W_{\text{perfil}} + W_{\text{Tornillos}}$$

$$W_{\text{lámina}} = \text{peso de la lámina calibre 20 que es de } 8 \text{ kg/m}^2$$

$$W_{\text{lámina}} = 8 \text{ kg/m}^2 \times (3,65 \times 3) \text{ m}^2$$

$$W_{\text{lámina}} = 87,6 \text{ kg.}$$

$$W_{\text{perfil}} = 11,1 \text{ kg/m} \times 3,65 \text{ m}$$

$$W_{\text{perfil}} = 40,515 \text{ kg}$$

$$W_{\text{Tornillos}} = 0,025 \text{ Kg} \times 40$$

$$W_{\text{Tornillos}} = 1 \text{ Kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = 87,8 \text{ kg} + 40,515 \text{ kg} + 1 \text{ kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = 129,315 \text{ kg}$$

La carga viva se asume con un peso de 200 kg, esto para efectos de mantenimiento del silo.

$$W_{\text{total}} = W_{\text{estructura}} + W_{\text{producto}} + W_{\text{viva}}$$

$$W_{\text{total}} = 129,315\text{kg} + 200\text{kg} + 1170\text{kg}$$

$$W_{\text{total}} = 1499.86 \text{ kg}$$

$$q = \frac{W_{\text{total}}}{9} \times fs \qquad fs = 1.6$$

$$q = 166,65 \text{ kg/m}^2 \times 1,6$$

$$q_{\text{neta}} = 266,64 \text{ kg/m}^2$$

Se calculan las estructuras más críticas las cuales son las que tienen una mayor área de influencia de la carga distribuida.

Se toma la viga crítica la cual tiene una longitud de 1,5 m

$$q_{\text{viga}} = q_{\text{neta}} \times L$$

Donde:

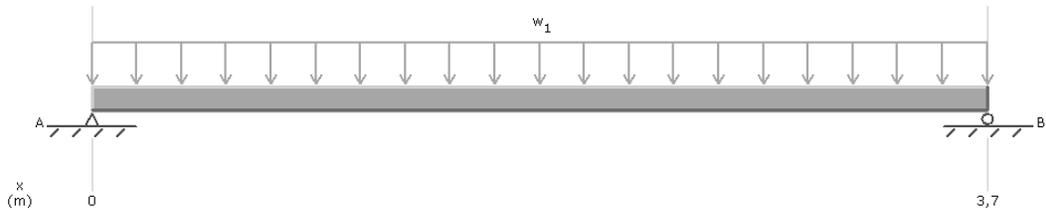
$q_{\text{neta}}$  = carga distribuida neta

$L$  = influencia de la viga

Entonces la distribuida es:

$$q_{\text{viga}} = 266,64 \text{ kg/m}^2 \times 0,5\text{m}$$

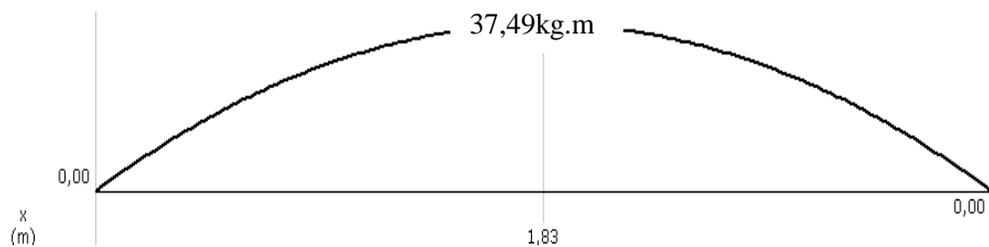
$$q_{\text{viga}} = 133,32 \text{ kg/m}$$



$$M_{\text{max}} = \frac{q \times l^2}{8}$$

$$M_{\text{max}} = 37,49 \text{ kg.m}$$

Ese momento máximo se presenta a 1,83 m de la viga.



$$I_x = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E}$$

Dónde:

$q$  = Carga ponderada (kg/cm) =  $q / 1,5$

$l$  = Longitud de la viga (cm)

$E = \text{Módulo de elasticidad del acero } (2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2)$

$q = 133,32 / 1,5$

$q = 88,88 \text{ kg/m} = 0,8888 \text{ kg/cm}$

Entonces:

$I_x = 3 \text{ cm}^4$

Para el cálculo de las dimensiones de los soportes de la lámina inferior se efectúa el mismo procedimiento teniendo en cuenta que las vigas tienen una longitud de 3,65m, obteniendo que para las vigas de una inercia hallada de  $3 \text{ cm}^4$ , para lo cual se requiere una sección rectangular hueca de 40mm de altura y 25mm de base con un espesor de 4mm ya que esta posee una inercia de  $3,89 \text{ cm}^4$  mayor a la requerida; dicha sección tiene un peso de 3,86 kg/m.

Flecha admisible y máxima para la vigueta:

La flecha admisible ( $f_{adm}$ ):  $L/500$

$L = \text{longitud en mm}$

$f_{adm} = 3650/300$

$f_{adm} = 12,1 \text{ mm}$

La flecha máxima

$$f_{max} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I}$$

$$f_{\max} = \frac{5 \times 133,32 \text{ k/m} \times (1,5\text{m})^4}{384 \times 2,1\text{E}^{10} \text{ k/m}^2 \times 3,89\text{E}^{-8} \text{ m}^4}$$

$$f_{\max} = 0.01075\text{m} = 10,75 \text{ mm}$$

$$f_{\max} < f_{\text{adm}} \text{ O.K.}$$

Como la flecha máxima es menor que la admisible se puede decir el chequeo por flechas está bien.

**Determinación del ángulo que soporta la lámina y su estructura metálica:** De acuerdo con las cargas axiales ejercidas por el peso del grano, peso de la lámina y el propio peso de la estructura o marco de soporte sobre el silo obtenido, se procede a determinar el tipo y/o clase de ángulo necesario para reforzar la estructura del silo con sus respectivas propiedades y/o características.

Para ello se toma el valor de las cargas obtenidas, la longitud efectiva de cada ángulo estructural y el área de influencia de éstos, con el objetivo de seleccionar mediante catalogo de ángulos estructurales, el más indicado para éste caso:

$$W_{\text{(grano + lámina + vivo)}} = 2700 \text{ kg}$$

$$W_{\text{marco estructural}} = 514 \text{ kg.}$$

$$W_{\text{total}} = 2700 \text{ kg} + 514.37 \text{ kg}$$

$$W_{\text{total}} = 3214.37 \text{ kg}$$

$$q = W / \text{Area}$$

$$q = 3214.37 / 9.0 \text{ m}^2$$

$$q = 357.15 \text{ kg/m}^2 * 1.5\text{m}$$

$$q = 535.73 \text{ kg/m}$$

Se procede a determinar el momento máximo:

$$M_{\max} = \frac{q \times l^2}{8}$$

$$M_{\max} = \frac{535,73\text{kg/m} \times (3\text{m})^2}{8}$$

$$M_{\max} = 602 \text{ kg-m}$$

De acuerdo a esto se determina la inercia:

$$I = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E}$$

$$I = \frac{5 \times 535,73\text{kg/m} \times (3\text{m})^4}{384 \times 2,1 \text{ exp}^{10}\text{kg/m}^2}$$

$$I = 2.7 \text{ cm}^4$$

Se ubica la inercia en el catalogo (propiedades para diseño de ángulos estructurales) y se comprueba la inercia admisible con la calculada para seleccionar de esta manera el ángulo más apto:

$$I_x = 3.45 \text{ cm}^4 \text{ (tomado de catalogo ángulos)} \geq 2.7 \text{ cm}^4 \text{ OK}$$

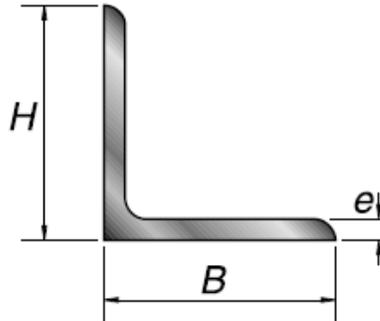
Para lo cual se determinó un ángulo estructural acero calidad A42-27ES de 2,42 kg/m.

L1 1/2\*1 1/2\*3/16"

H = 1 1/2 "

B = 1 1/2 "

e = 3/16 "



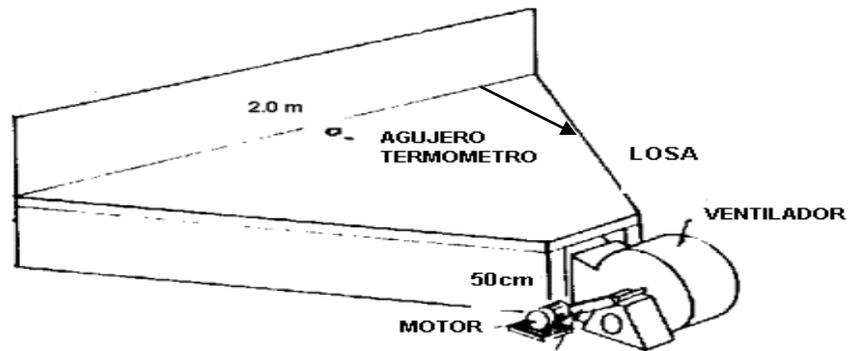
### 3.5.5 Puertas de entrada y salida del aire de secado

Estas puertas permiten la entrada y salida del aire de secado. Se encuentran ubicadas en la parte inferior y superior del silo de la siguiente manera:

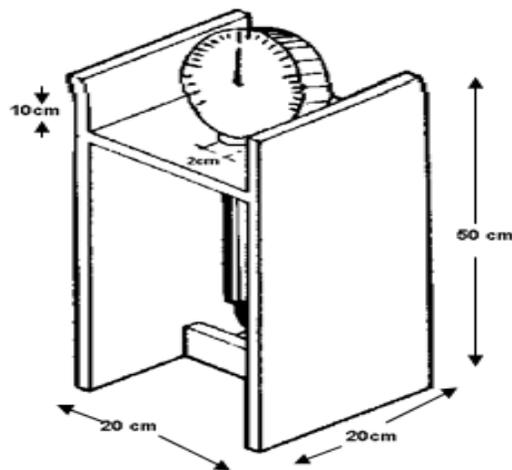
En la parte inferior se encuentra la compuerta de entrada de aire la cual debe tener unas dimensiones de 2.0 \* 0.60m y debe estar localizada a 30 cm de la base del silo de secado, este sistema de entrada del aire se encuentra dotado de una expansión gradual, la cual conecta el ventilador con la cámara de distribución del aire y cuya principal función es reducir la velocidad del aire que sale del ventilador, para evitar pérdidas de la presión del ventilador y facilitar la distribución del aire en la masa de granos.

Mientras la parte superior del silo se encuentra totalmente abierta, para la evacuación del aire de secado, esto obedeciendo a que mientras sea posible cada una de las puertas de salida debe tener un área igual o mayor que la salida del ventilador para evitar desperfectos en el secado y facilitar el monitoreo de la cámara superior.

El termómetro y/o el termostato se deben instalar en la salida del aire del ventilador, pero sin hacer contacto con la lámina, o en la entrada del aire al plenum del silo (Expansión gradual).ver figura N° 16.



**FIGURA 15. Expansión gradual para entrada del aire**

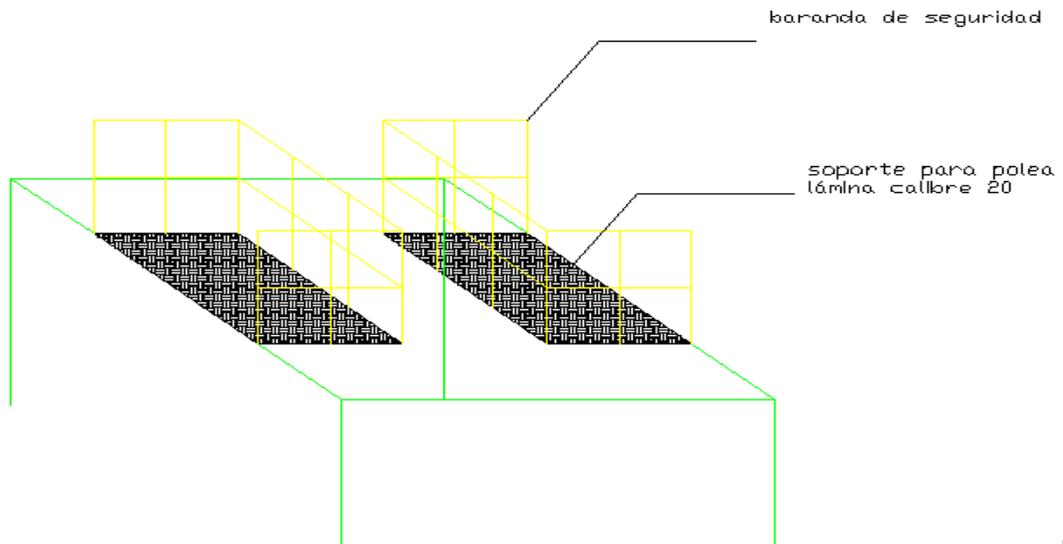


**FIGURA 16. Instalación del termómetro**

### **3.5.6 Mecanismo de poleas para recoger el piso de la cámara superior**

Este mecanismo consta de un sistema de poleas simples ubicadas en la parte superior del silo sobre una lámina calibre 20 de dimensiones 1,5m largo y de 1m

de ancho, soportada por un marco estructural igualmente en cuadrícula de 0,50m x 0.50m, la cual se encuentra finalmente atornillada a las paredes laterales del silo.



**FIGURA 17. Soporte para localización de poleas.**

Este mecanismo de poleas simples tiene como función recoger el piso abisagrado de la cámara superior (presecado) y se describe así: es básicamente, una polea que está unida a la lámina perforada de la cámara superior a través del propio eje. Acompañada de un soporte y un eje. El soporte es el que sostiene todo el conjunto y lo mantiene en una posición fija en el espacio. Forma parte del otro operador al que se quiere mantener unida la polea, en este caso a la lámina perforada; El eje cumple una doble función: eje de giro de la polea y sistema de fijación de la polea al soporte.

Para el presente diseño se consideró la carga o peso que debe elevar el sistema de poleas, el cual obedece al peso propio de la lámina y su marco estructural que la soporta, que es de aproximadamente de 50 kg, con esto se asume una polea

con un diámetro de 203 mm (8pulg), fabricada en acero, con una cuerda o cable de 5/8 pulgadas (16mm), la cual está diseñada para una resistencia de 22KN.

### **Cálculo para el marco de soporte de las poleas:**

Se realizan los mismos pasos para el cálculo del marco de soporte del piso de las cámaras de secado y presecado; el marco del soporte de las poleas en forma de cuadrícula de 0,5x0,5 metros.

### **Determinación de las cargas:**

El peso de la polea se estable en 20kg.

$$W_{\text{estructura}} = W_{\text{lámina}} + W_{\text{perfil}} + W_{\text{Tornillos}} + W_{\text{polea}}$$

$$W_{\text{lámina}} = \text{peso de la lámina calibre 20 que es de } 8\text{kg/m}^2$$

$$W_{\text{lámina}} = 8 \text{ kg/m}^2 \times (2 \times 1) \text{ m}^2$$

$$W_{\text{lámina}} = 16 \text{ kg.}$$

$$W_{\text{perfil}} = 11,1 \text{ kg/m} \times 12\text{m}$$

$$W_{\text{perfil}} = 133,32 \text{ kg}$$

$$W_{\text{Tornillos}} = 0,025\text{Kg} \times 20$$

$$W_{\text{Tornillos}} = 0,5\text{Kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = 16\text{kg} + 133,32\text{kg} + 0,5\text{kg} + 20\text{kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = 169,82\text{kg}$$

La carga viva se asume con un peso de 200 kg, esto para efectos de mantenimiento y de operación del silo, al igual que se asume una carga extra equivalente a 125kg o a una carga de café, ya que esta base puede ser utilizada igualmente para cargue del silo de manera manual o mecánica.

$$W_{\text{total}} = W_{\text{estructura}} + W_{\text{producto}} + W_{\text{viva}}$$

$$W_{\text{total}} = 169,82\text{kg} + 325\text{kg} +$$

$$W_{\text{total}} = 494,82 \text{ kg}$$

$$q = \frac{W_{\text{total}}}{2} \times fs \qquad fs = 1.6$$

$$q = 247,41\text{kg/m}^2 \times 1,6$$

$$q_{\text{neta}} = 249,1 \text{ kg/m}^2$$

Se calculan las estructuras más críticas las cuales son las que tienes una mayor área de influencia de la carga distribuida.

Se toma la vigueta crítica la cual tiene una longitud de 2 m

$$q_{\text{viga}} = q_{\text{neta}} \times L$$

Donde:

$$q_{\text{neta}} = \text{carga distribuida neta}$$

L = influencia de la viga

Entonces la distribuida es:

$$q_{\text{viga}} = 249,1 \text{ kg/m}^2 \times 0,5\text{m}$$

$$q_{\text{viga}} = 124,55 \text{ kg/m}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{q \times l^2}{8}$$

$$M_{\text{max}} = 62,27 \text{ kg.m}$$

Ese momento máximo se presenta a 1 m de la viga.

$$I_x = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E}$$

Dónde:

q = Carga ponderada (kg/cm) = q / 1,5

l = Longitud de la viga (cm)

E = Módulo de elasticidad del acero ( $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ )

$$q = 124,55 / 1,5$$

$$q = 83,033 \text{ kg/m} = 0,8303 \text{ kg/cm}$$

Entonces:

$$I_x = 8,24 \text{ cm}^4$$

Para el cálculo de las dimensiones de los soportes de la lámina inferior se efectúa el mismo procedimiento teniendo en cuenta que las vigas tienen una longitud de 2,0m, obteniendo que para las vigas de una inercia hallada de  $8,24 \text{ cm}^4$ , para lo cual se requiere una sección rectangular hueca de 40mm de altura y 25mm de base con un espesor de 3mm ya que esta posee una inercia de  $9 \text{ cm}^4$  mayor a la requerida.

Flecha admisible y máxima para la vigueta:

La flecha admisible ( $f_{adm}$ ):  $L/500$

$L$  = longitud en mm

$$f_{adm} = 2000/300$$

$$f_{adm} = 6,66\text{mm}$$

La flecha máxima

$$f_{max} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I}$$

$$f_{max} = \frac{5 \times 124,55 \text{ k/m} \times (2\text{m})^4}{384 \times 2,1 \times 10^{10} \text{ k/m}^2 \times 9 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$f_{max} = 0.005075\text{m} = 5,075 \text{ mm}$$

$$f_{max} < f_{adm} \text{ O.K.}$$

Como la flecha máxima es menor que la admisible se puede decir el chequeo por flechas está bien.

### 3.5.7. Sistema de apoyos para soporte de la cámara superior

Este sistema consta de un perfil hueco redondo de 50mm de diámetro y 2 mm de espesor con una longitud de 3m, con un mecanismo de tres apoyos empotrados, distanciados entre si 1.0m, ubicados en los costados de la cámara superior del silo, con el objetivo de soportar el peso de la lámina y el grano que ésta contiene. Este mecanismo esta accionado por un sistema de tornillo sinfín, el cual facilita el movimiento de éste, ya que los apoyos entran y salen para permitir la descarga del grano.

#### 3.5.7.1 Dimensionamiento de los soportes

Los soportes laterales de la cámara de presecado se encuentran distanciados a 1m entre ellos empezando a 0.50m de las esquinas de silo, esto con el fin que sean equidistantes y el peso se pueda repartir equitativamente.

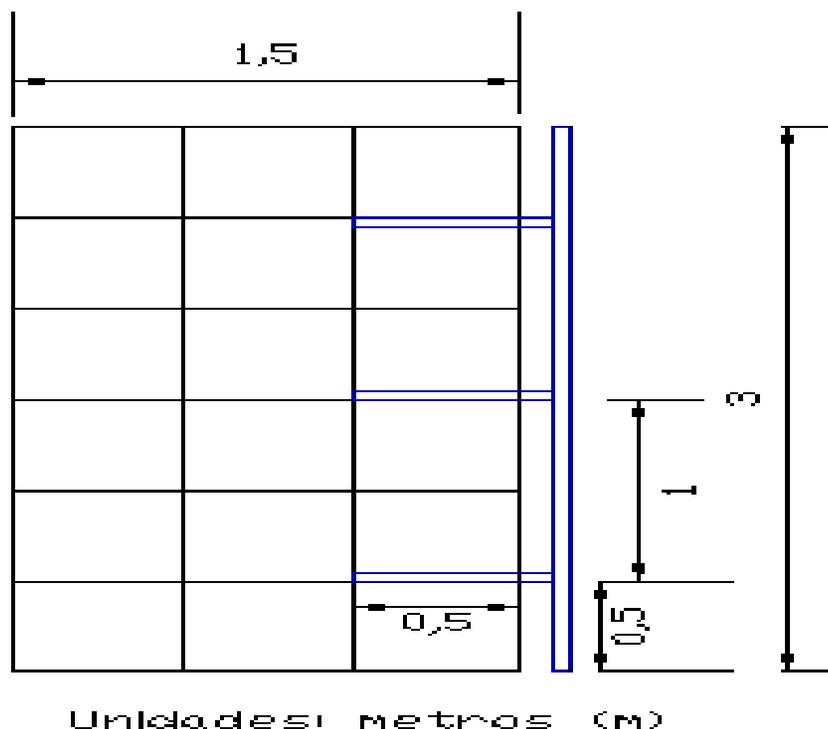


FIGURA 18. Disposición de soportes de cámara de secado.

**Determinación de las cargas:** Si la carga distribuida que se encuentra sobre los apoyos el cual es la sumatoria de las cargas de la estructura (lámina troquelada soporte de la lámina), cargas por producto y cargas vivas, esta carga distribuida neta es multiplicada por un factor de seguridad del 60% obteniendo la carga distribuida (q).

$$W_{\text{producto}} = \rho \times V$$

Donde:

V = volumen del grano a contener (m<sup>3</sup>)

$\rho$  = densidad del producto (kg/m<sup>3</sup>)

$$W_{\text{producto}} = 650 \text{ kg/m}^3 \times 1,8 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{producto}} = 1170 \text{ kg.}$$

Para determinar el peso de la estructura solo se tomaría el peso de la lámina y del soporte.

Lámina troquelada con orificios de 4mm de diámetro calibre 20 la cual va a soportar el peso del grano.

$$W_{\text{estructura}} = W_{\text{lámina}} \times A$$

$W_{\text{propio}}$  = peso de la lámina calibre 20 que es de 8kg/m<sup>3</sup>

A = área de la lámina.

$$W_{\text{lámina}} = 8 \text{ kg/m}^2 \times (1,5 \times 3) \text{ m}^2$$

$$W_{\text{lámina}} = 36 \text{ kg.}$$

Peso del soporte del piso está determinado por los perfiles que se van a usar, teniendo en cuenta perfil rectangular hueco de 40mm de altura y 25 mm de base el cual tiene 4 mm de espesor el cual un peso de 3,24kg/m. y para las vigas se utiliza perfil rectangular hueca de 40mm de altura y 25mm de base con un espesor de 6mm dicha sección tiene un peso de 3,86 kg/m.

Para las viguetas se van a usar 7 viguetas con una longitud de 1,5m, dando una longitud total de 10,5m

$$W_{\text{vigüeta}} = W_{\text{perfil}} \times L$$

$$W_{\text{vigüeta}} = 3,24 \times 10,5$$

$$W_{\text{vigüeta}} = 34,02 \text{ kg.}$$

Para las vigas se van a usar 4 vigas con una longitud de 3m, dando una longitud total de 12m.

$$W_{\text{viga}} = W_{\text{perfil}} \times L$$

$$W_{\text{viga}} = 3,86 \times 12$$

$$W_{\text{viga}} = 43,62 \text{ kg.}$$

Entonces el Peso de la estructura es:

$$W_{\text{estructura}} = W_{\text{lámina}} + W_{\text{vigüeta}} + W_{\text{viga}}$$

$$W_{\text{estructura}} = 113,64 \text{ kg}$$

La carga viva se asume con un peso de 200 kg, esto para efectos de mantenimiento del silo.

$$W_{\text{total}} = W_{\text{estructura}} + W_{\text{producto}} + W_{\text{viva}}$$

$$W_{\text{total}} = 113,64\text{kg} + 200 \text{ kg} + 1170\text{kg}$$

$$W_{\text{total}} = 1483,64 \text{ kg}$$

Se divide la carga total en el área del piso para determinar la carga distribuida y luego se le aplica el factor de seguridad:

$$q = \frac{W_{\text{total}}}{4,5} \times fs \qquad fs = 1,6$$

$$q = 329,7\text{kg/m} \times 1,6$$

$$q_{\text{neta}} = 527,516 \text{ kg/m}^2$$

Se calculan las estructuras más críticas las cuales son las que tienen una mayor área de influencia de la carga distribuida.

$$q_{\text{viga}} = q_{\text{neta}} \times L$$

Donde:

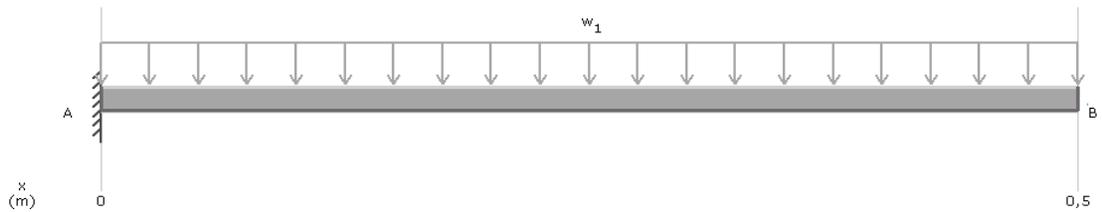
$q_{\text{neta}}$  = carga distribuida neta

$L$  = influencia de la viga

Entonces la distribuida es:

$$q_{\text{viga}} = 527,516 \text{ kg/m}^2 \times 1 \text{ m}$$

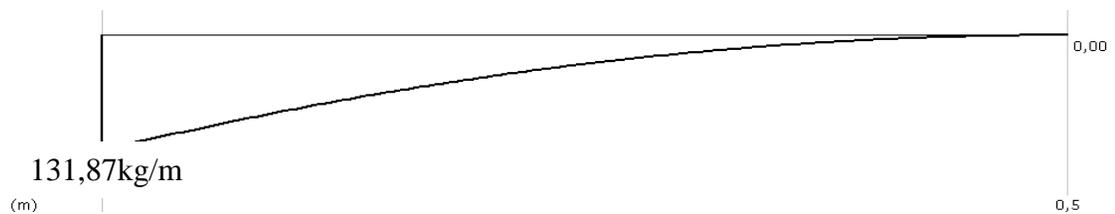
$$q_{\text{viga}} = 527,516 \text{ kg/m}$$



Se determina el momento máximo el cual se toma como una viga empotrada en un extremo y libre en el otro.

$$M_{\text{max}} = q \times L/2$$

$$M_{\text{max}} = 131,87 \text{ kg.m}$$



Una vez determinado el momento máximo se procede a determinar el momento de inercia mediante la siguiente fórmula:

$$I_x = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E}$$

Dónde:

$q$  = Carga ponderada (kg/cm) =  $q / 1,5$

$l$  = Longitud de la viga (cm)

$E = \text{Módulo de elasticidad del acero } (2,1 \times 10^6 \text{ kg/m}^2)$

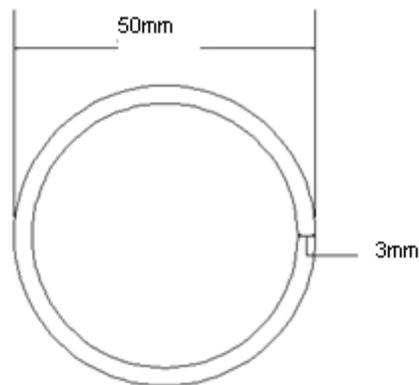
$$q = 527,516 / 1,5$$

$$q = 351,67 \text{ kg/m} = 3,5167 \text{ kg/cm}$$

Entonces:

$$I_x = 13,6 \text{ cm}^4$$

Teniendo la inercia se puede utilizar un perfil redondo hueco de 50mm de lado y 3 mm de espesor el cual tiene una  $I_x$  de 15,4 mayor al requerido, dicho perfil tiene un peso de 3,47kg/m.



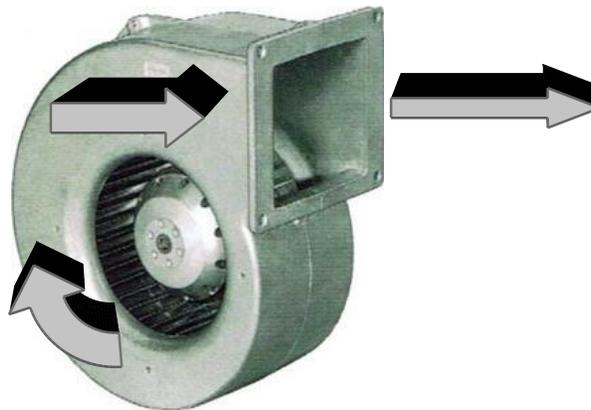
**FIGURA 19. Sección de soportes de cámara de presecado.**

### 3.5.8 Ventilador

El ventilador es uno de los elementos que más influye en el diseño y funcionamiento del silo secador. La función del ventilador es hacer pasar, a través de todo el sistema, el caudal de aire determinado o calculado, venciendo la resistencia opuesta por los componentes (ductos, lecho de café y malla perforada)

El ventilador es centrífugo, de alabes inclinados hacia atrás ya que estos tienen la característica de no sobrecargarse, aún quitando todas las restricciones al flujo del aire, además de ser más eficientes y silenciosos. Con una capacidad para el flujo de aire de 9080 pies cúbicos por minuto y una rotación de 750 revoluciones por minuto, con una presión estática (SP) de 2.3 pulgadas columna de agua. Este ventilador es accionado por un motor eléctrico trifásico de 5 caballos de fuerza.

En este tipo de ventiladores centrífugos, el máximo de eficiencia es del 70%, y se utilizan alabes aerodinámicos con el fin de aumentar la eficiencia hasta el 76% y minimizar el ruido.



**FIGURA 20. Ventilador centrífugo de alabes inclinados hacia atrás**

**Tabla 10. Características ventilador (flujo de aire y presión estática)**

VENTILADOR				
Espesor máximo de la capa de granos (m)	Flujo del aire (m <sup>3</sup> /min *m <sup>3</sup> de grano)	Flujo total del aire (m <sup>3</sup> /min)	Presión estática (pulg. de columna de agua)	Potencia del motor eléctrico (Hp)
0.4	25	257	2.3	5

**3.5.8.1 Flujo o caudal de aire del ventilador (q):** Para la realización de los cálculos del caudal del ventilador se utilizaron varios métodos con el objetivo de considerar todos factores necesarios a tener en cuenta.

De acuerdo con esto se realizó el cálculo teniendo en cuenta la velocidad del aire de secado dentro del silo recomendada por CENICAFÉ (1988), y por otra parte se realizó el cálculo teniendo en cuenta el caudal ya recomendado por Cenicafé mas adelante y mediante el número de Bushels.

**a. Mediante la velocidad del aire de secado:** La velocidad del aire de secado dentro del silo se ha fijado en 28.5 m/min (Tomado de CENICAFE, 1988).

$$\text{Velocidad del aire} = 28.5 \text{ m/min} \times \frac{1 \text{ pie}}{0,3048 \text{ m}^3}$$

$$\text{Velocidad del aire} = 93.5 \text{ pie/min}$$

$$\text{Caudal (Q)} = \text{Velocidad} * \text{Área de un cuarto}$$

$$\text{Caudal (Q)} = 28.5 \text{ m/min} * 9.0 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal (Q)} = 257 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{Caudal calculado} = 257 * 35.31$$

$$\text{Caudal calculado} = 9080 \text{ CFM.}$$

**b. Mediante caudal recomendado por Cenicafé:** Utilizando el caudal recomendado por Cenicafé, el cual dice que para el secado de café pergamino en

capa estática es de 25 m<sup>3</sup>/min por m<sup>3</sup> de café depositado en el secador (tomado de Gonzalo Roa-Mejia, 2000).

$$\text{Caudal calculado (Q)} = 25 \text{ m}^3/\text{min} * 7.2 \text{ m}^3$$

$$\text{Caudal calculado (Q)} = 180 \text{ m}^3/\text{min} * \frac{1\text{pie}}{0,3048\text{m}^3}$$

$$\text{Caudal calculado (Q)} = 6356 \text{ CFM}$$

Con el objetivo de conseguir precisión en el momento de adquirir el ventilador más apropiado, se calcula el caudal nominal del ventilador de acuerdo a la eficiencia de éste, que para este caso es del 70%, la cual obedece a ventiladores de aletas rectas inclinadas hacia atrás.

$$Q_{\text{Nominal del ventilador}} = \frac{6356 \times 100}{70}$$

$$Q_{\text{Nominal del ventilador}} = 9080 \text{ CFM}$$

**c. Mediante número de Bushels:** De acuerdo al número de bushels, el caudal calculado es igual al anterior, así:

$$\text{Dosis de aire recomendado} = 25\text{m}^3/\text{min} = 31.25 \text{ CFM/bu}$$

$$\text{Volumen del grano total} = \frac{4680\text{kg}}{650\text{kg}/\text{m}^3}$$

$$\text{Volumen del grano total} = 7.2 \text{ m}^3 \times \frac{1 \text{ pie}^3}{(0,3048\text{m})^3}$$

$$\text{Volumen del grano total} = 254.26 \text{ pie}^3$$

$$\text{Nº Bushels} = \frac{254,26 \text{ pie}^3}{1,25 \text{ btu}}$$

$$\text{Nº Bushels} = 203.41$$

$$\text{Caudal(Q)} = \text{Dosis de aire} \times \text{Nº Bushels}$$

$$\text{Caudal(Q)} = 31.25 \text{ CFM} \times 203.41$$

$$\text{Caudal(Q)} = \frac{6356 \text{ CFM} \times 100}{80}$$

$$\text{Caudal(Q)} = 9080 \text{ CFM}$$

### **3.5.8.3 Determinación de pérdidas de presión en el sistema**

Teniendo en cuenta que en el sistema se presentan pérdidas de presión estática en las cámaras, compuertas, lámina perforada, capa de granos, expansión gradual se deben determinar éstas con el objetivo de obtener la curva característica del ventilador.

A continuación se presenta una muestra de cálculos para determinar pérdidas de presión en el sistema

**a. Resistencia del grano al flujo de aire:** Según Brooker (1974), las pérdidas ocasionadas por la resistencia del grano al flujo de aire, se determinan de la siguiente manera:

$$\Delta P \text{ grano} = \frac{A * Q_b^2}{\ln (1+B*Q_b)}$$

Donde:

(A y B son constantes de la ecuación para caída de presión en granos)

$$A = 0.00065$$

$$B = 0.156$$

$\Delta P$  = Pérdidas de presión estática (pulg. ca)

$$Q_b = \text{CFM}/\text{pies}^2$$

$$Q_b = \frac{\text{caudal (Q)}}{\text{area de inl (AI)}}$$

$$\text{Area Infl. (AI)} = 18.0 \text{ m}^2 \times \frac{1 \text{ pie}}{0.3048 \text{ m}^2}$$

$$\text{Area Infl. (AI)} = 193.75 \text{ m}^2$$

$$Q_b = \frac{9080 \text{ CFM}}{193,75 \text{ m}^2} = 46,86 \text{ CFM}/\text{Pie}^2$$

$$\Delta P_{\text{grano}} = \frac{0,00065 \times (46,86 \text{CFM}/\text{pie}^2)}{\ln(1 + 0,15 \times 46,86 \text{CFM}/\text{pie}^2)}$$

$$\Delta P_{\text{grano}} = 0.67 \text{ pulg.ca} / \text{pie} * 1.31 \text{ pie (capa de grano)}$$

$$\Delta P_{\text{grano}} = 0.88 \text{ pulg.ca}$$

$$\Delta P_{\text{grano Total}} = \Delta P_{\text{grano}} + (60\% * \Delta P_{\text{grano}}) \longrightarrow \text{Debido a compactación del grano}$$

$$\Delta P_{\text{grano Total}} = 0.88 \text{ pulg.ca} + (0.88 \text{ pulg.ca} * 0.6)$$

$$\Delta P_{\text{grano Total}} = 1.41 \text{ pulg. Ca}$$

**b. Resistencia del piso perforado al paso del aire:** Según Brooker (1995), la caída de presión a través de la lámina perforada, cuando se encuentra cubierta por grano, se puede determinar por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta P_{\text{lámina}} = (10^{-6} / 9) \times (Qa/E * Of)^2$$

Donde:

$\Delta P$  = Caída de presión total, pulgadas columna de agua.

Of = Porcentaje de abertura, decimal.

E = Porcentaje de vacíos en el grano; decimal

$$\Delta P_{\text{lámina}} = (10^{-6} / 9) * (46,86 \text{CFM}/\text{pie}^2 / 0.2 * 0.4)^2$$

$$\Delta P_{\text{lámina}} = 0.00081 \text{ pulg. ca}$$

**C. Pérdida de presión debido a ensanchamiento abrupto:** Ésta pérdida de cabeza se produce al pasar el caudal del ventilador que es de menor diámetro, al túnel de aire, y se determina de la siguiente manera:

$$\Delta P_{\text{ens.}} = C_1 * (V_1 / 4005)^2$$

Donde:

$C_1$  = Constante en función de la relación entre el área menor y mayor.

$V_1$  = Velocidad en la sección menor (ventilador, pie/min)

$$\text{Como } Q_1 = Q_2 \longrightarrow A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

$$V_1 = \frac{(A_2 * V_2)}{A_1}$$

Donde:

$A_1$  = Área de la sección del ventilador, pies<sup>2</sup>

$A_2$  = Área de la sección del túnel de aire, pies<sup>2</sup>

$V_2$  = Velocidad del flujo de aire en el túnel

$$\text{Área del ventilador} = (0.5 \times 0.5 \text{ m}) = 0.25 \text{ m}^2 = 2.69 \text{ pie}^2$$

$$\text{Área de sección del túnel} = 37.5 \text{ pie}^2$$

Velocidad en el túnel = caudal (CFM) / Área de sección del túnel

$$\text{Velocidad en el túnel} = 9080 \text{ CFM} / 37.5 \text{ pie}^2$$

$$\text{Velocidad en el túnel} = 242,7 \text{ pie/min}$$

$$V_1 = (37.5 \text{ pie}^2 \times 242.13 \text{ pie/min}) / 2.69 \text{ pie}^2$$

$$V_1 = 3375.42 \text{ pie/min}$$

$$A_1 / A_2 = 2.69 \text{ pie}^2 / 37.5 \text{ pie}^2 = 0.07$$

Con el dato de la relación  $A_1 / A_2$ , y se determina  $C_1 = 0.81$ .

Entonces:

$$\Delta P \text{ ens.} = 0.81 * (3375.42 \text{ pie/min} / 4005)^2$$

$$\Delta P \text{ ens.} = 0.57 \text{ pulg. ca}$$

**d. Pérdidas de presión por orificio:** Según Brooker (1995), la caída de presión por orificios, se puede determinar por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta P \text{ orificio} = 0.5 * PV$$

Donde:

PV = Presión de velocidad en pulgadas de columna de agua

$$PV = (V / 4009)^2$$

$$PV = (3345.42 \text{ pie/min} / 4009)^2$$

$$PV = 0.7 \text{ pulg. ca}$$

$$\Delta P \text{ orificio} = (0.5 * 0.7 \text{ pulg. ca})$$

$$\Delta P \text{ orificio} = 0.348 \text{ pulg. ca}$$

Por consiguiente:

$$\Delta P \text{ Total} = \Delta P \text{ grano} + \Delta P \text{ lámina} + \Delta P \text{ ensanchar} + \Delta P \text{ orificio}$$

$$\Delta P \text{ Total} = (1.41 + 0.0081 + 0.57 + 0.348) \text{ pulg.ca}$$

$$\Delta P \text{ Total} = 2.3 \text{ pulg.ca}$$

#### **3.5.8.4 Potencia del motor del ventilador (HP):**

$$HP = \frac{Q \times \Delta P}{6356 \times \eta}$$

Donde:

$\Delta P$  = Pérdidas totales ( $\Delta P$  grano +  $\Delta P$  malla +  $\Delta P$  otras)

$\eta$  = Eficiencia del ventilador (70%)

- Se determina con esto entonces la potencia del motor del ventilador (HP):

$$HP = ((9080 \text{ CFM} * 2.3 \text{ pulg-ca}) / (6356 * 0.7))$$

$$HP = 5.0$$

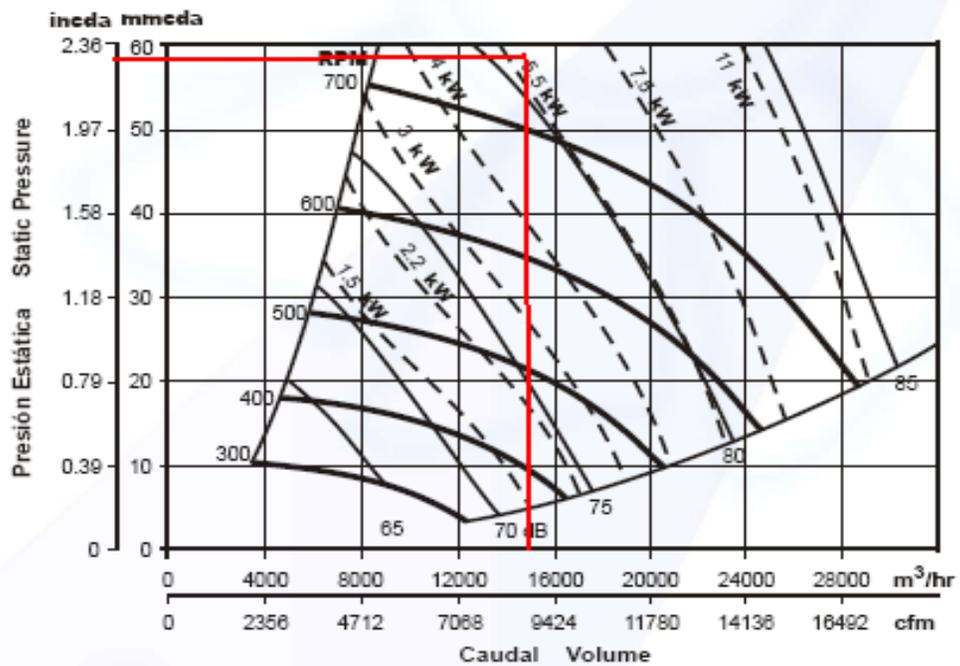
#### **3.5.8.5 Selección del ventilador**

Una vez conocido el caudal, la presión estática y/o cabeza estática del ventilador se procede a estimar para la especificación, selección y operación del ventilador los conceptos establecidos según Hincapié (1996), para la determinación de las curvas de comportamiento de un ventilador centrífugo a partir de datos de catálogo y de laboratorio.

Nos situamos en el eje de abscisas (horizontal) con el caudal de 9080 CFM y en el eje de ordenadas (vertical) con la presión estática de 1.75 pulg.ca

De esta manera obtenemos la siguiente curva característica del ventilador seleccionado.

## C/DAB 22/22



Fuente: Ventilación Y Representaciones Industriales, octubre 2008

FIGURA 21. Curva característica del ventilador

Con estas condiciones se encuentra en la curva característica, las siguientes especificaciones:

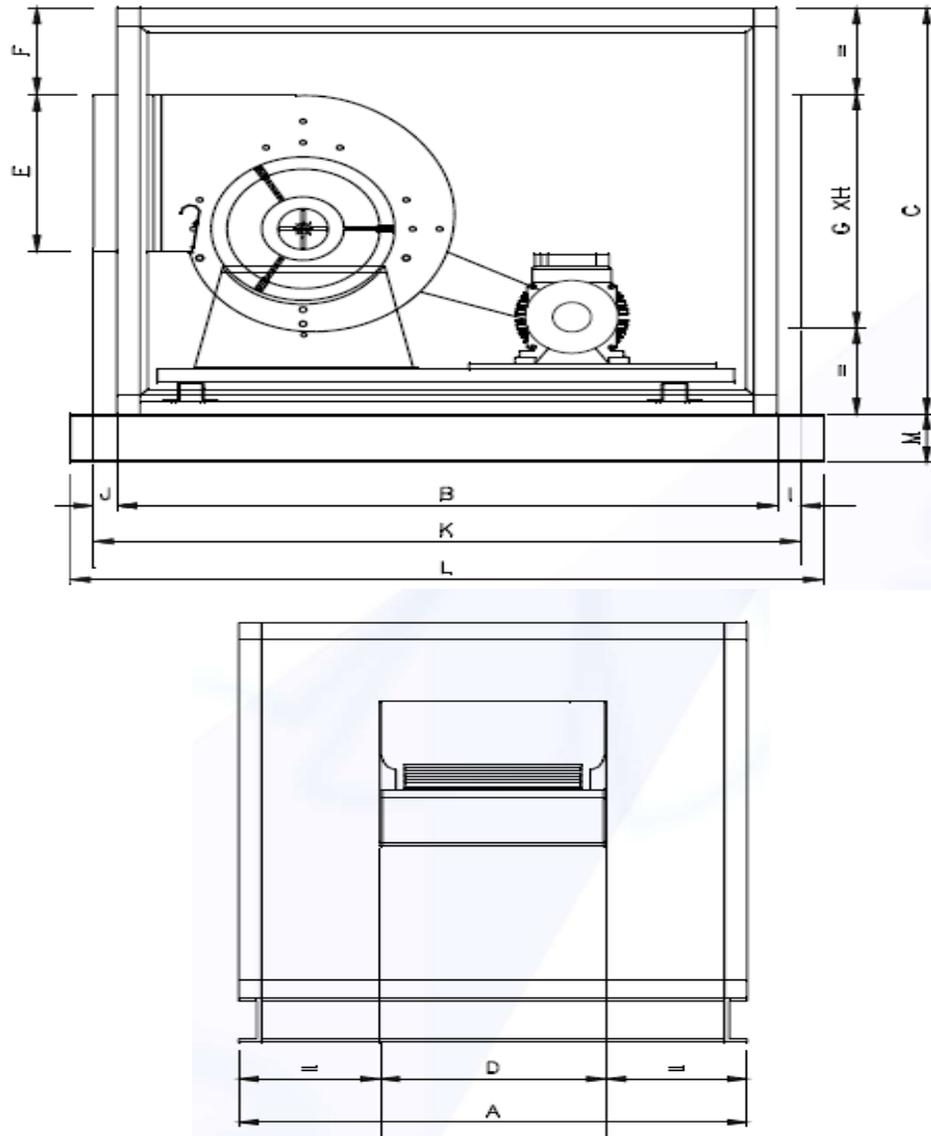
Ventilador C/DAB 22/22 – 5.5 kW

Potencia motor: 5.5 kW

Revoluciones del ventilador: 750 RPM

Presión sonora a 1 metro: 81.0 dB

**3.5.8.6 Dimensiones del ventilador:** a continuación se especifican las dimensiones del ventilador seleccionado según sus condiciones de diseño:



**Tabla 11. Dimensiones del ventilado**

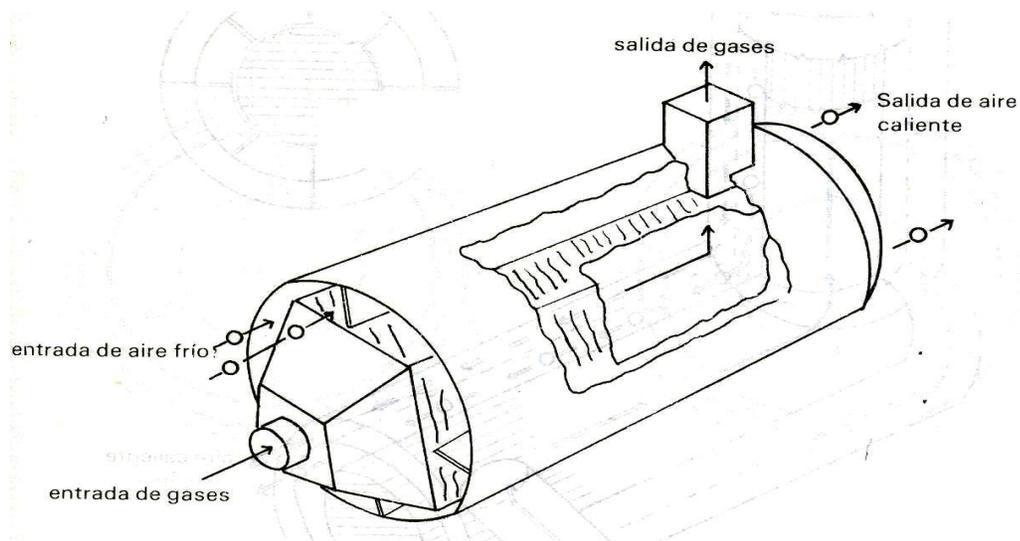
VENTILADOR	DIMENSIONES (mm)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
<b>C/DAB 18/18</b>	1018	1250	900	556	479	82	700	700	40	30	1320	1510

### **3.5.9 Intercambiador de calor**

Se requiere para el calentamiento del aire y la eliminación de los gases de la combustión. El aire de secado no debe estar en contacto con el medio calentador. Con ello se consigue evitar la contaminación de los granos de café por compuestos químicos peligrosos, lo cual afectaría la calidad de la bebida.

El intercambiador está conformado por dos cilindros concéntricos; En el cilindro central se inyectan los gases de combustión provenientes del quemador, el aire de secado pasa a través del espacio comprendido entre el cilindro externo y el cilindro interno o cámara de combustión. Para mejorar la transferencia de calor se colocan láminas metálicas entre los dos cilindros. El cilindro externo tiene un diámetro aproximadamente igual al de la boca del ventilador (479 mm). Para aumentar la eficiencia se puede construir el cilindro externo de doble pared y cubrir externamente con lana de vidrio.

Los gases de combustión salen al exterior por la chimenea, sin ponerse en contacto con el aire de secamiento. La chimenea se debe construir preferiblemente recta y vertical, y es necesario limpiarla con alguna frecuencia.

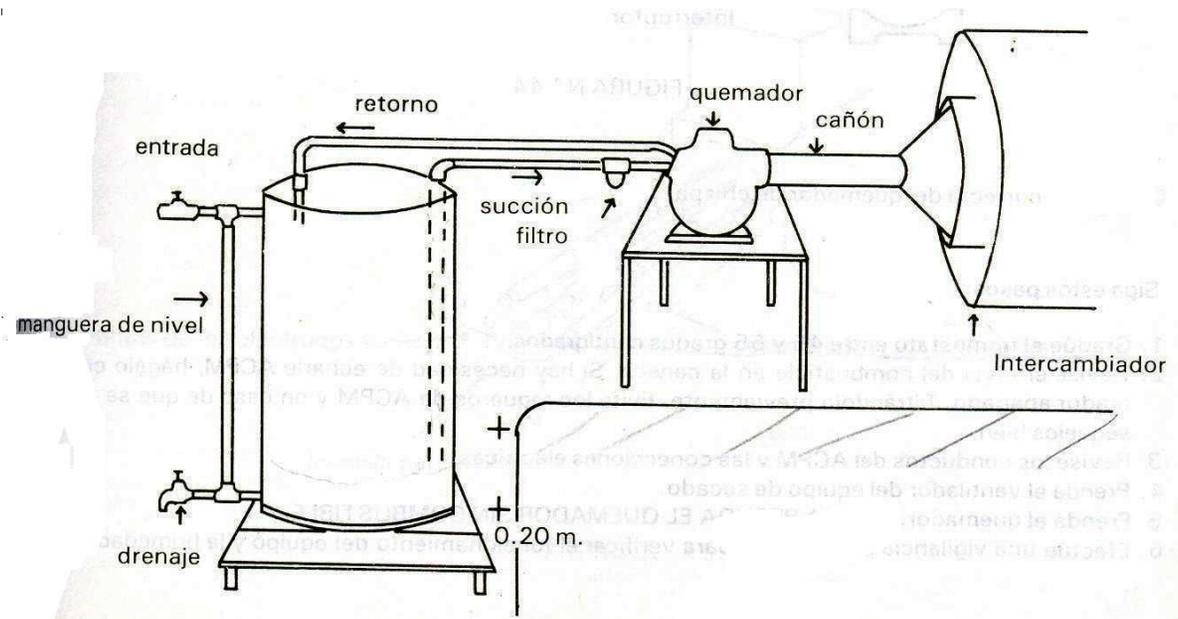


**FIGURA 22. Intercambiador de Calor.**

### **3.5.10. Quemador de ACPM (eléctrico de chispa)**

El quemador cuya finalidad es proporcionar el calor suplementario, produciendo calentamiento en las láminas del intercambiador, el cual a su vez calienta el aire que entra al silo, está diseñado para utilizar como fuente de energía el suministro de ACPM.

Para la instalación de éste se debe tener en cuenta que el quemador debe quedar más alto que la caneca o depósito del combustible, esto con el objetivo de evitar fugas de ACPM, de acuerdo como lo muestra la figura N° 24.



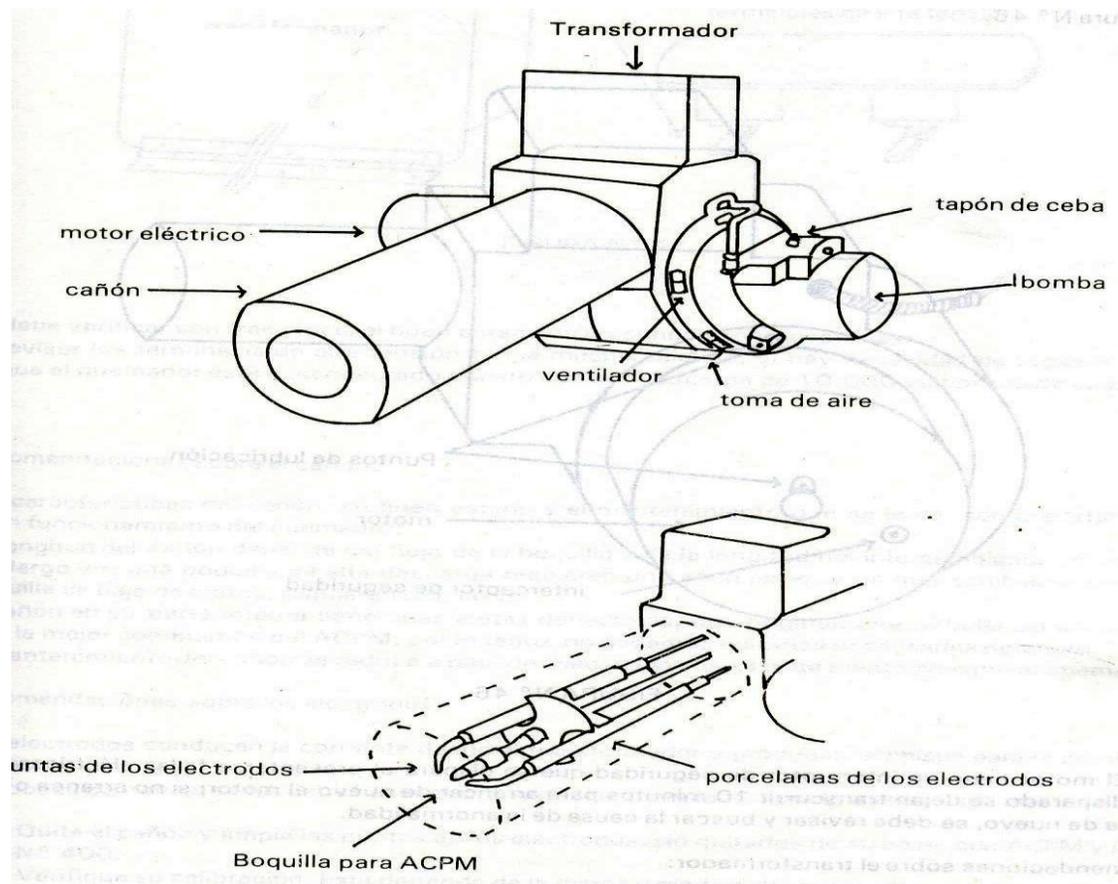
**FIGURA 23. Instalación del quemador**

La succión de ACPM no se debe hacer desde el fondo del depósito, sino a 20 centímetros, con el objetivo de evitar el arrastre de agua y sedimentos, además se coloca un filtro a la entrada de la bomba del quemador.

Las mangueras de succión y retorno del ACPM deben ser de  $\frac{1}{4}$  de pulgada y transparentes para poder observar el flujo de combustible

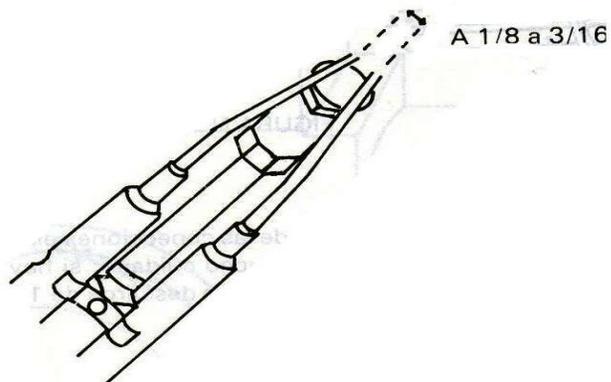
El cañón del quemador debe quedar 3 cm dentro del intercambiador, y debe quedar conectado correctamente con el termostato, (el cual debe estar graduado entre  $45^{\circ}\text{c} - 55^{\circ}\text{c}$ ) y el motor del ventilador del silo.

Este quemador eléctrico de ACPM consta de las siguientes partes: transformador, cañón, electrodos, bomba, boquilla y ventilador, de acuerdo a la figura N° 25.

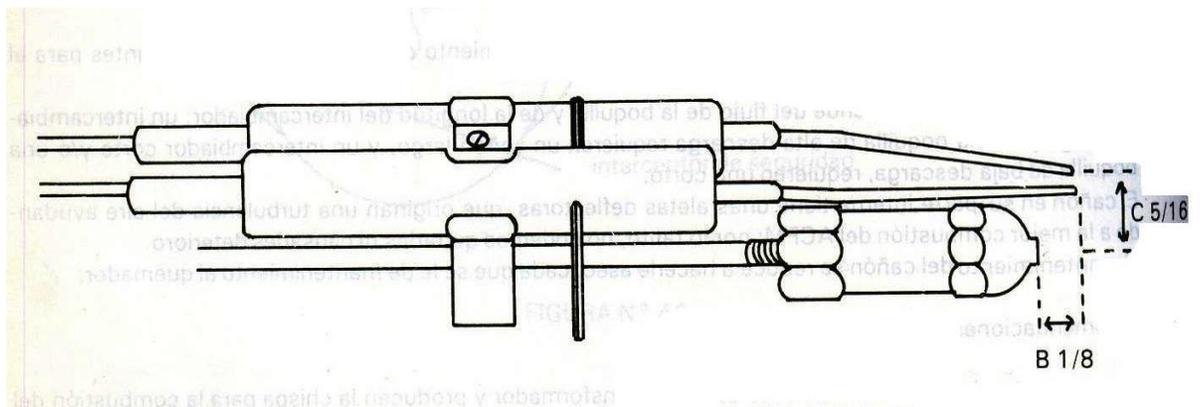


**FIGURA 24. Componentes del quemador**

Por otra parte el transformador del quemador debe elevar el voltaje de 110 a 10000 voltios, con el objetivo de producir o generar entre los electrodos la chispa que encienda el ACPM. La distancia entre las puntas de dichos electrodos varía entre  $1/8$  y  $3/16$  de pulgada, ósea entre 3.17 y 4.76 mm. (Letra A, figura N° 26). La distancia horizontal entre la punta de la boquilla y las puntas de los electrodos (Letra B Figura N° 9), es de  $1/8$  de pulgada, ósea 3.17 mm. La distancia vertical entre la proyección del orificio de la boquilla y la punta de los electrodos (Letra C Figura N° 27), varía entre  $5/16$  y  $1/2$  pulgada, ósea 7.94mm y 12.7 mm.



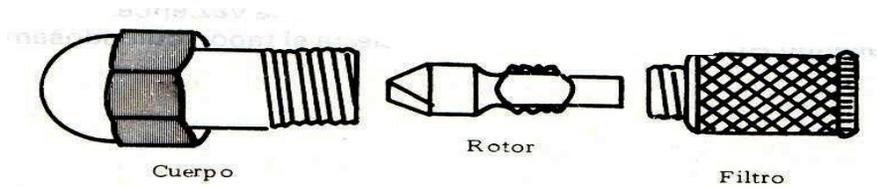
**FIGURA 25. Electrodo del quemador**



**FIGURA 26. Proyección Electrodo – Boquilla quemador**

En cuanto a la boquilla de descarga de ACPM, se tiene que ésta presenta una descarga de 3 galones por hora y el ángulo del cono entre 60 y 90 grados.

La boquilla se encuentra conformada por tres partes: cuerpo, rotor y filtro. (Ver Figura N° 28).



**FIGURA 27. Boquilla de descarga**

### **3.6 CÁLCULO DE CANTIDAD DE CALOR NECESARIO PARA EL SECADO**

Los cálculos se realizarán con base en la capacidad que posee el silo secador en cada una de sus cámaras, estas con capacidad de 2.34 Ton. El café pergamino llega a la cámara de secado con un contenido de humedad del 55% Hbh, y para poder almacenarlo de forma exitosa sin que se produzca daños en el grano, es necesario reducir su humedad al 12% Hbh.

Se determinará el agua que se debe retirar y el peso del producto final por unidad de silo.

♦ **Masa del agua inicial :**

$$Hbh = \frac{W_{\text{agua}}}{W_{\text{Total}}}$$

$$W_{\text{agua}} = 0.55 * 2340 \text{ Kg.} = 1287 \text{ Kg.}$$

$$W_{\text{ms}} = (2340 - 1287) \text{ Kg.} = 1053 \text{ Kg}$$

♦ **Masa de agua final :**

$$H_{bhf} = \frac{W_{aguaf}}{W_{Total f}}$$

$$0.12 = \frac{W_{final}}{W_{ms} + W_{agf}}$$

$$W_{aguaf} = 0.12 * (1053\text{kg} + W_{aguaf})$$

$$W_{aguaf} = 126.36\text{kg} + 0.12 * W_{aguaf}$$

$$126.36 \text{ Kg} = W_{aguaf} - 0.12 W_{aguaf}$$

$$126.36 \text{ Kg} = W_{aguaf} * (1 - 0.12)$$

$$W_{aguaf} = \frac{126,36\text{kg}}{(1-0,12)}$$

$$W_{aguaf} = 143.6 \text{ kg}$$

♦ **Masa de agua a retirar :**

$$W_{aguaRetirada} = W_{aguai} - W_{aguaf}$$

$$W_{agRetirada} = 1287 \text{ Kg.} - 143.6 \text{ Kg}$$

$$W_{aguaRetirada} = 1143.4 \text{ kg}$$

♦ **Masa final del producto :**

$$W_{f_{\text{café}}} = W_{\text{ms}} - W_{\text{agua}}$$

$$W_{f_{\text{café}}} = 2340 \text{ Kg} - 1143.4 \text{ Kg}$$

$$W_{f_{\text{café}}} = 1196.6 \text{ kg}$$

### 3.6.1 Cálculo del secado por aire caliente

Según el IDEAM las condiciones ambientales de la región de Almorzadero, municipio de Teruel para las cuales se diseñó el silo secador, son las siguientes:

♦ **Condiciones Ambientales:**

$$T_{\text{bs}} = 27^{\circ}\text{C}$$

$$\text{HR} = 55\%$$

- Temperatura de secado =  $50^{\circ}\text{C}$

- Dimensiones del silo (Ancho, Largo, Altura) =  $(3.0 * 3.0 * 5.0) \text{ m}$

- Volumen en cada cámara del silo =  $3.6 \text{ m}^3$

De acuerdo a las propiedades físicas del aire, mediante la utilización de la tabla o gráfico psicrométrico se obtienen los siguientes datos (para una altura de 910 m.s.n.m.):

**Condición N° 1. Ambiente**

Entrada Aire Ventilador:  
 $T_{\text{bs}} = 27^{\circ}\text{C}$

**Condición N° 2. Aire de secado**

Intercambiador de Calor  
 $T_{\text{bs}} = 50^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} H_r &= 55\% \\ H &= 0.012 \text{ Kg. V/Kg. AS} \\ h &= 57.5 \text{ KJ / Kg AS} \\ v &= 0.865 \text{ m}^3 / \text{Kg. AS} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_R &= 16\% \\ H &= 0.012 \text{ Kg. V/Kg. AS} \\ h &= 82.5 \text{ KJ/kg AS} \\ v &= 0.935 \text{ m}^3 / \text{kg AS} \end{aligned}$$

$$\text{Caudal recomendado} = 180 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$m = \frac{180 \text{ m}^3/\text{min}}{0.865 \text{ m}^3/\text{kg.AS}} = 208,09 \text{ Kg/min AS}$$

$${}_1Q_2 = m * (h_2 * h_1)$$

$${}_1Q_2 = 208,09 \text{ Kg. AS/min} \times (82.5 - 57.5) \text{ KJ. V/Kg. AS}$$

$${}_1Q_2 = 5202 \text{ KJ/min}$$

### Para una Eficiencia del 60%

$$\Delta H = (0.0218 - 0.012) \text{ Kg.Vp/Kg. AS} = 0.0098 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$\begin{array}{ccc} 0.0098 & \longrightarrow & 100\% \\ \Delta H & \longrightarrow & 60\% \end{array}$$

$$\Delta H = 0.0059 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$H_{\text{salida}} = (0.012 + 0.0058) \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$H_{\text{salida}} = 0.0178 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

### Condición N° 3. Entrada a la cámara de presecado

$$\begin{aligned} T_{bs} &= 36^\circ\text{C} \\ H_r &= 50\% \end{aligned}$$

$$H = 0.0178 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$v = 0.90 \text{ m}^3 / \text{Kg. AS}$$

Una vez el aire proveniente de la cámara de secado atraviesa la capa de grano de presecado se obtiene la diferencia entre la razón de Humedad (H) entre la salida y entrada de esta.

#### **Para una Eficiencia del 60%**

$$\Delta H = (0.0218 - 0.0178) \text{ Kg.Vp/Kg. AS} = 0.004 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$\begin{array}{ccc} 0.004 & \longrightarrow & 100\% \\ \Delta H & \longrightarrow & 60\% \end{array}$$

$$\Delta H = 0.0024 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$H_{\text{salida}} = (0.0178 + 0.0024) \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$H_{\text{salida}} = 0.0202 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

#### **Condición No 4. Salida del aire exhausto de la cámara de presecado**

$$T_{\text{bs}} = 29^{\circ}\text{C}$$

$$H_r = 80\%$$

$$H = 0.0202 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$v = 0.885 \text{ m}^3 / \text{Kg. AS}$$

#### **3.6.2 Tiempo de secado:**

$$\Delta H = 0.0058 \text{ Kg.Vp/Kg. AS}$$

$$m \cdot \Delta H = (297,1 \text{ Kg/min AS}) \times (0.0058 \text{ Kg.Vp/Kg. AS})$$

$$m \cdot \Delta H = 1.72 \frac{\text{kg agua}}{\text{min}}$$

$$\begin{array}{l} 1 \text{ min} \longrightarrow 1.72 \text{ Kg agua / min} \\ \text{T.S} \longrightarrow 1143.4 \text{ kg} \end{array}$$

$$T_s = 664 \text{ min} = 11 \text{ Horas}$$

### 3.6.3 Requerimiento energético:

$$\text{Energía requerida en el aire} = 5202.31 \text{ KJ/min}$$

$$\text{Energía Total} = 5202.31 \text{ KJ/min} * 664 \text{ min}$$

$$\text{Energía Total} = 3454333,84 \text{ KJ}$$

Se supone una eficiencia del 70% en el I.C

$$Q_{\text{Total I.C}} = 5872367,52 \text{ KJ}$$

- Se utilizará Diesel como combustible que tiene un poder calorífico de 146000 KJ

$$\begin{array}{l} 1 \text{ Gal} \longrightarrow 146000 \text{ KJ} \\ X \longrightarrow 5872367,528 \text{ KJ} \end{array}$$

$$\text{Consumo de Diesel} = 41 \text{ gal}$$

### **3.7 METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO:**

Una vez se determinan las dimensiones del silo secador, se procedió a construir un prototipo a escala 1:10 con la finalidad de ilustrar el funcionamiento y de evaluar la eficiencia del secado.

El prototipo se construyó teniendo en cuenta los materiales en los cuales se encuentra diseñado el silo secador con el fin de simular el secado de café; las paredes y la base del prototipo se encuentran compuestas por lámina cold roll calibre 20, para el piso de la cámara de secado y presecado se utilizó lámina cold roll calibre 20 la cual tiene perforaciones de 4mm de diámetro, la tortillería para el amarre de las paredes del silo se utilizó tortillería de 3/8" distanciados cada 10cm perimetralmente, los soportes de la cámara de presecado están compuestos por varilla de 3/8", para simular el ángulo de amarre perimetral de la cámara de secado están se utilizaron ángulo 3/4x1/8".

En la elaboración del prototipo se tuvo en cuenta los detalles constructivos de las cámaras como es la inclinación de la cámara de secado, la cual en el prototipo tiene un ángulo de inclinación de 35°; para simular la descarga de la cámara de presecado se utilizaron bisagras de 3" las cuales están solidarias al eje de soporte principal de la cámara de presecado. Las puertas de descarga final del grano tienen una dimensión de 7x3cm.

Para simular el intercambiador de calor y el ventilador se utilizó dos resistencias de 1000 Watt con las cuales se logra alcanzar la temperatura de secado del café, dichas resistencias se encuentran ubicadas en la expansión gradual; para el ventilador se utilizó dos ventiladores axiales de 24 voltios los cuales se encuentran ubicados en la parte inicial del ducto de entrada del aire de secado.

## **4 RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1 COSTO DEL EQUIPO V.S OTRAS ALTERNATIVAS:**

En el diseño del presente silo secador se obtuvo como resultado un equipo de costo menor al de los equipos que se encuentran en la actualidad, ya que este tiene un costo de aproximadamente \$11`306.256 para una capacidad de 2340kg por cámara (ver anexo F), el cual comparado con otros equipos de secado como lo es el CE 1500-Cisco de 750kg por cámara tiene un costo de \$12`626.000, esta diferencia tanto en capacidad másica del silo como en precio lo convierte en un equipo que puede ser adquiridos por pequeños, medianos y grupos asociativos de caficultores; A demás el silo se encuentra diseñado para ser construido totalmente en lamina cold roll, por lo que se convierte en una buena alternativa debido a que se disminuyen costos de mantenimiento y funcionamiento frente a otras alternativas de secado como son los silos secadores de mampostería, ya que al ser construido en lámina permite que el silo sea desarmable lo que hace del secador un sistema muy versátil; al ser metálico en su totalidad permite que en el momento en que se da fin a su vida útil pueda ser desarmado y reciclado evitando de esta manera costos en demoliciones y contaminación del medio ambiente.

### **4.2 FUNCIONAMIENTO:**

En cuanto al funcionamiento del equipo de secado se obtuvo como resultado un equipo versátil ya que se diseño totalmente desarmable debido a que está conformado por lámina cold roll unida a través de tornillos de alta resistencia de 1/4 y con ángulos estructurales de amarre de 1 ½ x 3/16”, por lo que puede ser transportado de un lugar a otro con mucha facilidad.

Además en el manejo y funcionamiento de éste tenemos que su sistema de descarga es práctico debido a que utiliza el ángulo de reposo del grano y la fuerza de gravedad como medio de transporte del grano de una cámara a otra.

### **4.3 EVALUACION EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO A ESCALA DEL SILO**

Con este análisis se pretende encontrar las condiciones de funcionamiento del silo secador para lo cual se toma como referencia las siguientes variables:

#### **♦ Datos del producto**

Contenido de humedad inicial del café: 55,0% bh

Temperatura inicial del café: 26,0°C

Contenido de humedad promedio al final del secado: 12,0% bh

Cantidad de grano a secar: 2340 gr.

#### **♦ Datos del lugar**

Altitud: 440 m.s.n.m.

Temperatura ambiente promedio: 26.0°C.

Humedad relativa ambiente: 58%

#### **♦ Datos del sistema**

Sección transversal del silo-secador: 0.09 m<sup>2</sup>.

Espesor de la capa de grano en cada cámara: 0.04m

Caudal: 0.1m<sup>3</sup>/seg.

#### **♦ Datos del aire de secado**

Temperatura entrada: 50°C.

Temperatura salida: 32°C.

#### **4.3.1 Determinación de humedad inicial del café**

Para la determinación del contenido inicial de la humedad del café se aplicó el método de la estufa.

Se tomaron 50 gramos en una balanza eléctrica con sensibilidad del 0.01; estos 50 gramos se llevaron a la estufa donde se sometió a secado a una temperatura de 130°C, realizando el control de peso de la muestra cada 15 minutos hasta la estabilización final del peso. Para determinar el contenido de humedad se utilizó la siguiente fórmula:

Humedad bulbo húmedo

$$Hbh = ((PI - PF)/PI) * 100$$

Humedad bulbo seco

$$Hbs = ((PI - PF)/PI) * 100$$

Donde:

Hbh: humedad de bulbo húmedo

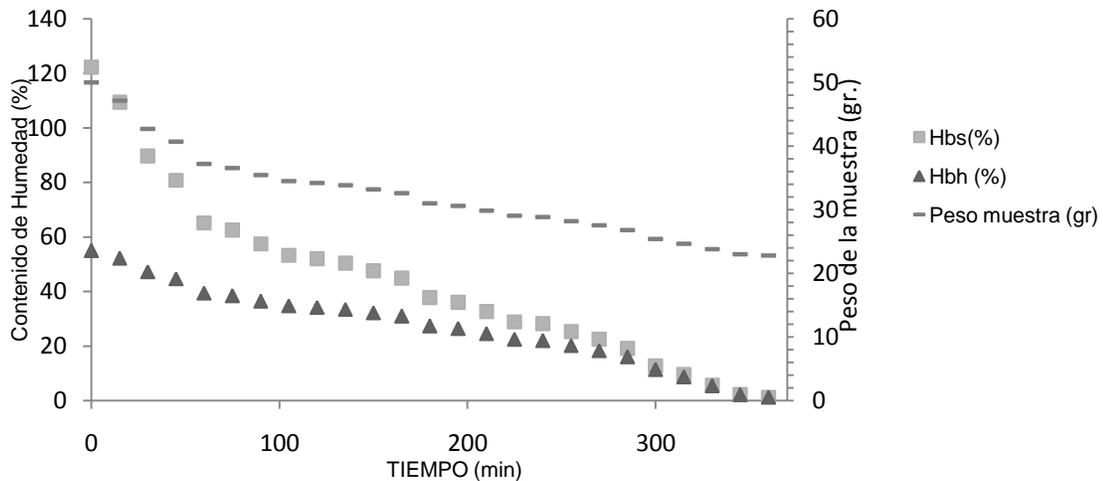
Hbs: Humedad bulbo seco

PI: peso inicial de la muestra (gr)

PF: peso final de la muestra

**Tabla 12. Contenido de Hbh y Hbs durante el secado en el horno.**

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>TEMP. HORNO (°C)</b>	<b>PESO MUESTRA (gr)</b>	<b>H.b.h (%)</b>	<b>H.b.s (%)</b>
0	130	50,00	55,00	122,22
15	130	47,12	52,25	109,42
30	130	42,68	47,28	89,69
45	130	40,70	44,72	80,89
60	130	37,18	39,48	65,24
75	130	36,56	38,46	62,49
90	130	35,45	36,53	57,56
105	130	34,50	34,78	53,33
120	130	34,20	34,21	52,00
135	130	33,84	33,51	50,40
150	130	33,20	32,23	47,56
165	130	32,60	30,98	44,89
180	130	31,00	27,42	37,78
195	130	30,60	26,47	36,00
210	130	29,85	24,62	32,67
225	130	29,02	22,47	28,98
240	130	28,85	22,01	28,22
255	130	28,20	20,21	25,33
270	130	27,56	18,36	22,49
285	130	26,80	16,04	19,11
300	130	25,40	11,42	12,89
315	130	24,65	8,72	9,56
330	130	23,80	5,46	5,78
345	130	23,00	2,17	2,22
360	130	22,80	1,32	1,33
375	130	22,50	0,00	0,00
390	130	22,50	0,00	0,00



**FIGURA 28. Comportamiento de secado del café en el horno a 130°C**

Con los datos obtenidos en el secado en el horno se determina la humedad inicial con la que se empieza a realizar el proceso de secado en el silo, igualmente se conocerá la humedad final del producto.

#### 4.3.2 Isoterma de sorción y secado del café

Utilizando la ecuación de isotermas de sorción y secado del café de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia se establecen las variables para la determinación de humedad de equilibrio para café pergamino seco haciendo uso de la siguiente ecuación:

#### Ecuación de la Federación de Cafeteros

$$X_e = [61.03085 \leftarrow - 108.37 \leftarrow^{-2} + 74.46 \leftarrow^{-3}] e^{[(- 0.03705 \leftarrow + 0.0701 \leftarrow^{-2} - 0.03518 \leftarrow^{-3} * T )]}$$

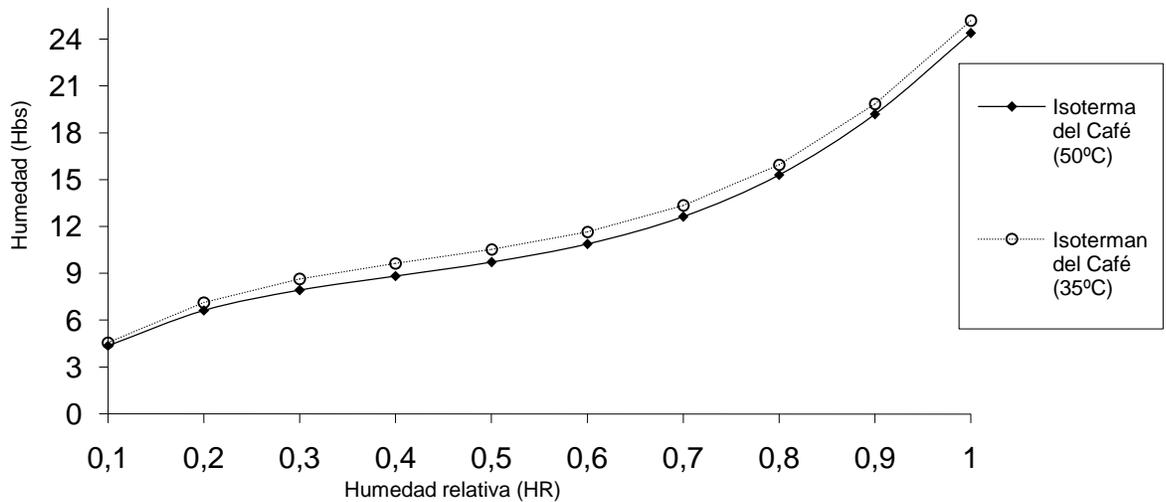
← = Humedad relativa ambiente (decimal)

T = Temperatura de secado (°C)

**Tabla 13. Parámetros la ecuación de la Federación de Cafeteros**

<b>HR</b>	<b>T(°c)</b>	<b>Xe</b>	<b>E</b>
0,1	50	4,37561286	0,859
0,2	50	6,63139356	0,7832
0,3	50	7,92372461	0,7499
0,4	50	8,83276454	0,7461
0,5	50	9,71967949	0,7635
0,6	50	10,8797549	0,7948
0,7	50	12,6283425	0,833
0,8	50	15,3009997	0,8698
0,9	50	19,1857463	0,8953
1	50	24,3789321	0,8989

<b>HR</b>	<b>T(°c)</b>	<b>Xe</b>	<b>e</b>
0,1	35	4,5798	0,8991
0,2	35	7,1358	0,8428
0,3	35	8,6384	0,8175
0,4	35	9,6448	0,8147
0,5	35	10,5390	0,8279
0,6	35	11,6560	0,8515
0,7	35	13,3407	0,8800
0,8	35	15,9558	0,9070
0,9	35	19,8342	0,9256
1	35	25,1725	0,9282



**FIGURA 29. Humedad Relativa Vs Humedad (Hbs) del Café (50 y 35°C)**

### 4.3.3 Prueba de secado en el silo

Se realizó la prueba de secado en el silo secador con el objetivo de obtener los datos de secado del café y de evaluar la eficiencia del secado de café.

En las figuras N°31 y 32 se puede observar el comportamiento del café durante el proceso de secado en el secador a temperatura constante de 50°C. Con el fin de determinar cuál es el tiempo necesario para que el grano de café alcance el contenido de humedad requerido que para condiciones ambientales y de secado que obedece al 11%, el cual se determina mediante la fórmula de balance de materia seca en la cual al haber obtenido previamente el contenido de humedad inicial del grano y el contenido de humedad al que queremos llegar, se determina el peso final del grano:

$$W_1(100-H_1) = W_2(100-H_2)$$

Donde:

$W_1$  = Peso inicial de la muestra

$H_1$  = Humedad inicial del grano (%)

$W_2$  = Peso final de la muestra

$H_2$  = Humedad final del grano

Para los ensayos se utilizó una muestra de grano de 2340gr. Con un contenido de humedad inicial de 55%, teniendo en cuenta que el contenido final debe ser de aproximadamente del 11% para las condiciones de ambientales, se determina el peso final de la muestra.

$$W_1(100-H_1) = W_2(100-H_2)$$

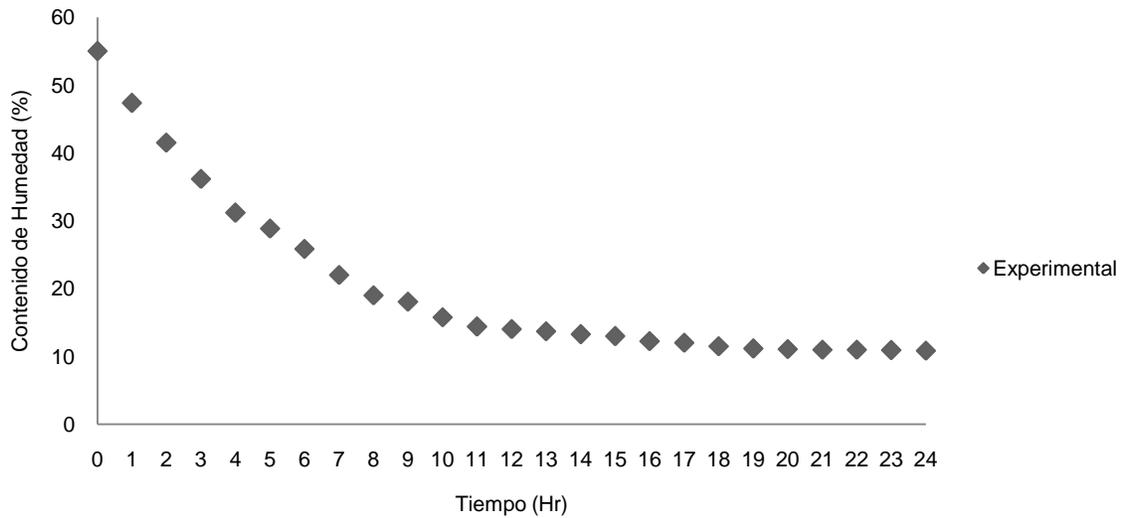
$$W_2 = ((W_1 (100+H_1)) / (100-H_2))$$

$$W_2 = ((2340\text{gr} * (100-55\%)) / (100 -11))$$

$$W_2 = 1183 \text{ gr.}$$

**Tabla 14. Comportamiento de secado en el silo secador**

<b>Tiempo Min.</b>	<b>Hora</b>	<b>Wi (gr.)</b>	<b>Hramb %</b>	<b>TbsA(°C)</b>	<b>Tbsh(°C)</b>	<b>% H</b>
0	0,00	2340	66	28	50	55,00
60	1,00	2158	59	27	49,5	51,20
120	2,00	1950	57	27	50	46,00
180	3,00	1874	55	32	49	43,81
240	4,00	1750	60	34	50	39,83
300	5,00	1695	60	35	49	37,88
360	6,00	1600	57	35	50	34,19
420	7,00	1543	60	34	49,5	31,76
480	8,00	1465	58	34	50	28,12
540	9,00	1400	59	30	49	24,79
600	10,00	1390	55	27	49,5	24,24
660	11,00	1340	56	26	50	21,42
720	12,00	1300	57	26	49	19,00
780	13,00	1295	56	25	50	18,69
840	14,00	1257	56	25	49	16,23
900	15,00	1233	57	26	50	14,60
960	16,00	1200	58	26	48	12,25
1020	17,00	1197	55	26	49	12,03
1080	18,00	1190	55	25	50	11,51
1140	19,00	1187	58	24	49	11,29
1200	20,00	1186	57	25	49,5	11,21
1260	21,00	1180	56	26	49	10,76
1320	22,00	1180	58	25	48	10,76
1380	23,00	1178	60	25	48	10,61
1440	24,00	1177	65	24	48	10,54
1320	25,00	1176	65	26	48	10,46
1380	26,00	1175	65	26	49	10,38
1440	27,00	1174	66	27	50	10,31
1500	28,00	1174	66	27	50	10,31
Promedio		1412,55	59,03	27,69	49,28	22,39
Desv.estandar		324,22	3,70	3,52	0,73	14,08
Varianza		18,01	1,92	1,88	0,85	3,75
CV		1,27	3,26	6,77	1,73	16,76



**FIGURA 30. Comportamiento de la humedad en el secado del café**

#### **4.3.4 Comparación de curva de secado experimental vs. modelación matemática de secado de café pergamino**

Para la modelación matemática de secado de Café pergamino se utiliza la ecuación de Roa y Macedo, con el objetivo de realizar la comparación y evaluación del secado del café en el prototipo construido.

♦ Ecuación de Roa y Macedo:

$$MR = (CH(t) - Che) / (Chi - Che)$$

$$MR = e \{ -m * (Pvs - Pv)^n * t^q \}$$

Donde:

m,n,q: Parámetros de la ecuación que dependen del producto

t: Tiempo de secado

Pvs: Presión de vapor de saturación

Pv: Presión parcial de vapor

T= 50°C

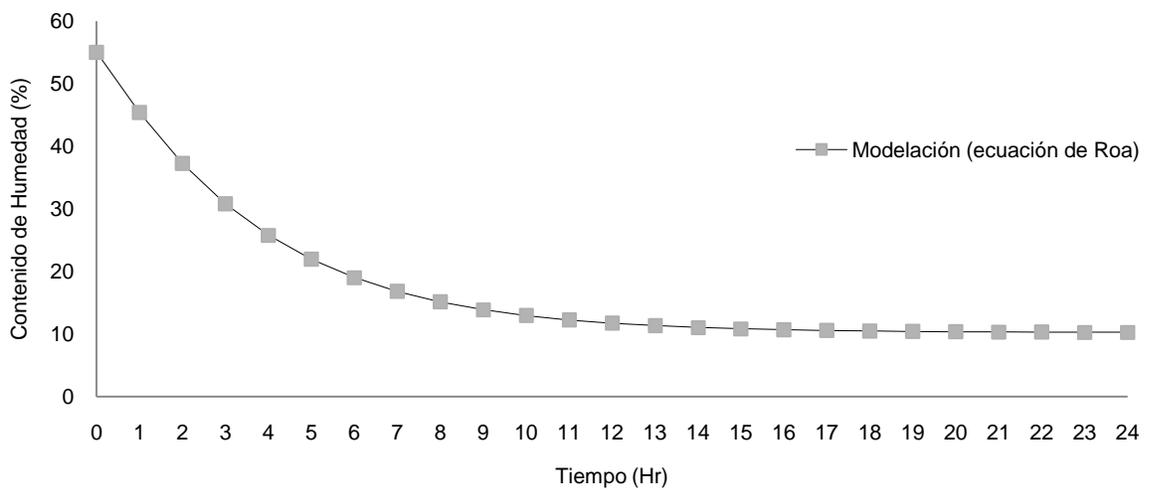
T= 122°F

HR= 50%

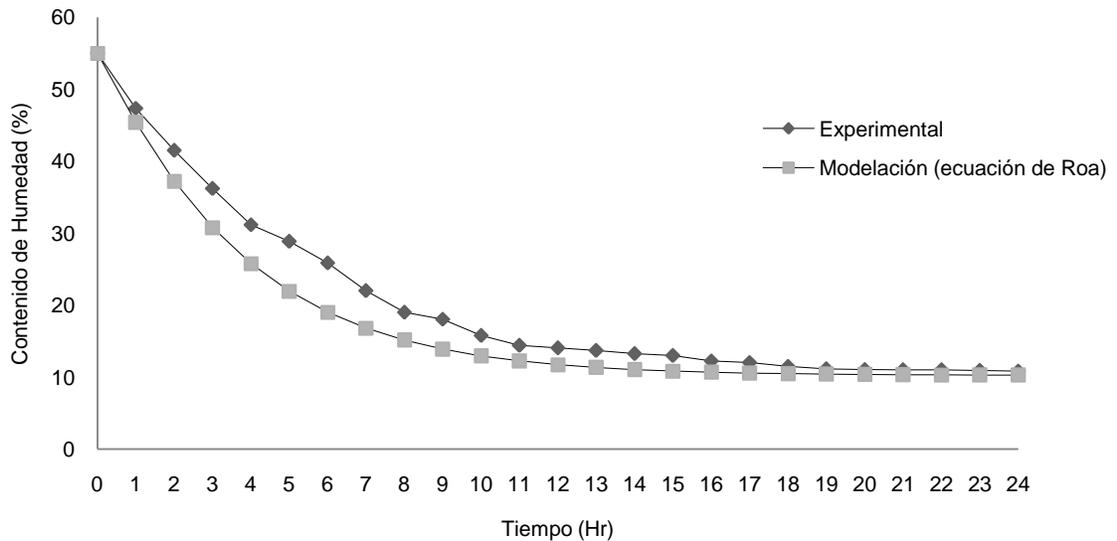
He= 0.10241

Pvs = 1248.48Kg/ m<sup>2</sup>

Pv = 0.5 \* 1248.48Kg/ m<sup>2</sup> = 624.24Kg/ m<sup>2</sup>



**FIGURA 31. Curva de secado según modelación (ecuación de Roa)**



**FIGURA 32. Comparación Curva de secado experimental v.s modelación**

En las pruebas efectuadas en el prototipo de escala 1:10, se logró determinar que durante las primeras nueve (9) horas de secado el porcentaje de pérdida de humedad del grano en el interior del silo se lleva acabo de una manera rápida lo cual es característico de la curva de secado del café.

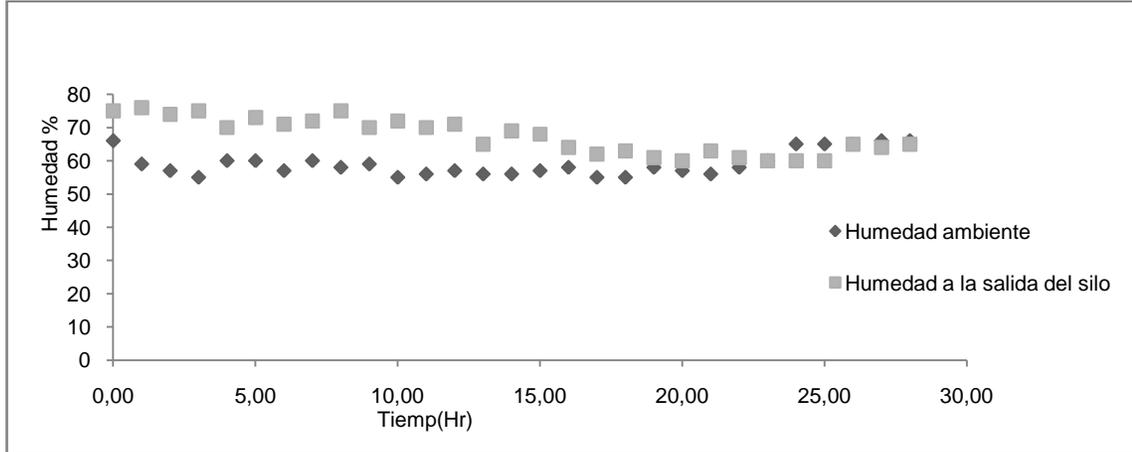
Los resultados obtenidos del tiempo de secado fueron satisfactorios ya que los tiempos de secado obtenidos durante el ensayo se aproxima a la curva de modelación de secado de Roa la cual predice el tiempo de secado para las condiciones de trabajo (temperatura de 50°C y una capa de grano de 0,40m) es de 19 horas,

Al igual comparando este resultado con estudios de evaluación y modelación de Coronado, Mejía, Tascón (2008), los cuales realizaron ensayos comparando el secado experimental de silos, conformados por cámara de secado y presecado, con modelaciones matemáticas encontraron que el tiempo de secado para llevar la humedad del 50 al 12% es necesario un

tiempo de secado de 23 horas en secado y 32 horas; de igual manera en el avance técnico 282 de CENICAFÉ (2000), establece que para una temperatura de secado de 50°C y un espesor de capa de café entre 0,1 y 0,4m se obtienen tiempos de secados totales entre 20 y 24 horas cuanto el contenido de humedad del café 11 y 16%.

**Tabla 15. Comportamiento de las humedades relativas durante el proceso de secado**

Tiempo Min.	Hora	HR. Ambiente%	HR. Salida del sistema (silo)%
0	0,00	66	75
60	1,00	59	76
120	2,00	57	74
180	3,00	55	75
240	4,00	60	70
300	5,00	60	73
360	6,00	57	71
420	7,00	60	72
480	8,00	58	75
540	9,00	59	70
600	10,00	55	72
660	11,00	56	70
720	12,00	57	71
780	13,00	56	65
840	14,00	56	69
900	15,00	57	68
960	16,00	58	64
1020	17,00	55	62
1080	18,00	55	63
1140	19,00	58	61
1200	20,00	57	60
1260	21,00	56	63
1320	22,00	58	61
1380	23,00	60	60
1440	24,00	65	60
1320	25,00	65	60
1380	26,00	65	64
1440	27,00	66	64
1500	28,00	66	64



**FIGURA 33. Comportamiento de las humedades relativas durante el proceso**

En la figura No33 se hace notorio que durante las primeras 15 horas del proceso de secado la humedad relativa a la salida de la cámara de presecado permanece muy por encima a la humedad relativa ambiente, esto debido a la gran cantidad de agua que es retirada de grano por el paso del aire; posteriormente estas humedades tienden hacerse semejantes sobre el final del proceso de secado.

#### 4.3.5 Eficiencia del silo secador:

Para determinar la eficiencia con que está trabajando el silo secador se miden las temperaturas del aire de secado, del aire usado y del aire ambiente (Aguilar and Boyce, 1966), aplicando la siguiente fórmula fórmula:

$$\frac{T_{as}-T_{au}}{T_{as}-T_{aa}} \times 100 = \text{Eficiencia (\%)}$$

Donde:

Tas: Temperatura del aire de secado

Tau: Temperatura del aire usado

Taa: Temperatura del aire ambiente

$$\text{Eficiencia (\%)} = ((50 - 35) / (50 - 27.8)) * 100$$

$$\text{Eficiencia (\%)} = 67$$

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ♦ Las características finales del silo secador vertical de dos cámaras diseñado, son las siguientes:
  - Capacidad volumétrica =  $7,2 \text{ m}^3$  de grano (3,6 en secado y 3,6 en presecado)
  - Capacidad másica = 4,68 Ton de café pergamino húmedo (2,34 en secado y 2,34 en presecado)
  - Temperatura de secado =  $50^{\circ}\text{C}$
  - Espesor de capa de grano = 40 cm
  - Caudal de aire = 9080 CFM
  - Presión estática = 2,3 pulg. Ca
  - Potencia estimada del motor = 5 HP
  - El equipo de secado presenta un sistema de descarga práctico con ángulo de reposo del grano de  $35^{\circ}$  y la fuerza de gravedad como medio de transporte de una cámara a otra.

- Facilidad en el transporte de éste ya que se encuentra diseñado en lámina cold roll calibre 20 unidas entre sí utilizando pernos de 1/4" y ángulos L de amarre perimetral de 1 ½ x 1 ½ x 3/16, permitiendo que sea desarmable.
- ◆ El prototipo del silo secador de escala 1:10 construido permite la obtención de datos a nivel experimental para la evaluación de la cinética de secado.

Como recomendaciones se deben considerar:

- ◆ Respecto al mecanismo de descargue del grano de la cámara de presecado se debe evitar los movimientos bruscos que ocasionen daños mecánicos y estructurales en el equipo, al igual se debe verificar la no presencia de personal en la cámara de presecado para evitar accidentes laborales
- ◆ Para disminuir las pérdidas de calor es aconsejable revestir el trayecto del ducto de entrada del aire al silo a la cámara o plenum con un material de baja conductividad térmica.
- ◆ En caso que se tenga que abrir orificios en el silo o en los ductos se debe tener en cuenta recubrirlo para evitar pérdidas en el transporte del aire debido a las fugas.
- ◆ Se debe programar un mantenimiento periódico de todas las partes del sistema de silo secador con el fin garantizar su correcto funcionamiento.

## BIBLIOGRAFIA

- ◆ BAUTISTA Juan. Utilización de la Tecnología de Gasificado para el Secado de Café (Artículo de Internet). [www.icafe.go.cr/café/circulares\\_sector/circulares\\_2003/2003-08-25%20Circular%201199.pdf](http://www.icafe.go.cr/café/circulares_sector/circulares_2003/2003-08-25%20Circular%201199.pdf), (Consulta: 15 de septiembre de 2008). 45p.
- ◆ BAYONA MARTINEZ, José Alonso, Determinación de algunas propiedades fisico-mecánicas del café beneficiado, Tesis ingeniería agrícola, universidad Nacional, Bogota-Colombia, 1985, 141p.
- ◆ BROOKER Donald B, Fred W. Drying Cereal Grains. Ediciones The avi publishing company, Estados Unidos, 1975. 247p.
- ◆ CASTILLO Niño, Álvaro. Almacenamiento y secamiento de granos Ed. Bogotá, agrosintesis, 1978, 95p.
- ◆ CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ (CENICAFE), Tecnología del cultivo del Café: Secado mecánico del café. Manizales- caldas, Enero de 1988, Segunda Edición. P 311-340. 404p.
- ◆ DE DIOS Carlos Alberto. Sistemas de secado (Artículo de Internet), [www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S08.htm](http://www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S08.htm) (Consulta: 01 de septiembre de 2008).

- ◆ FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Post-cosecha y Beneficio: El secado (Artículo de Internet). [www.cafedecolombia.com/caficultura/secado.html](http://www.cafedecolombia.com/caficultura/secado.html). (Consulta: 10 de agosto de 2008). 30p.
- ◆ GARCIMARTIN Miguel Ángel, Edificación agroindustrial: Estructuras metálicas, ediciones Mundi-Prensa, Madrid-España, 1998, 90p.
- ◆ MADARIAGA, 1995  
<http://www.monografias.com/trabajos15/operacion-secado/operacion-secado.shtml>, 1995, consulta 16 octubre 2008.
- ◆ MARQUES Pereira José Antonio, Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural, secado de los granos (Artículo Internet), <http://www.fao.org/docrep/x5027s/x5027S05.HTM>, (consulta 10 de septiembre de 2008).47p.
- ◆ MONROY Vega Jaime, Norman C. Y Citelly, Francisco. Humedad de equilibrio de los granos. Conferencia. Ing. Agrícola. Feb./marzo, 1974 Pág. 1-2
- ◆ MOTTA Luis y REPIZO Orlando, Diseño y construcción de un secadero para granos, Tesis ing. Agrícola, Neiva, Universidad Surcolombiana, 1982, 132p.
- ◆ OROZCO Hincapie, Carlos A. Determinación de las curvas de comportamiento de un ventilador centrífugo a partir de datos de catálogo y de laboratorio, revista Scientia et Technica N° 16, Pereira, Colombia: UTP, Abril de 1996, 117p.

- ◆ PAZMIÑO Leo saltaren, Gallego, Antonio E. y Cabal Rojas, Orlando. Metodología para evaluación de un sistema de secado. Tesis ing. Agrícola, Cali, universidad del valle, 1978.
- ◆ POT Alcaldía del Municipio de Teruel, Departamento del Huila-Colombia, Teruel: Febrero de 2000. 288p.
- ◆ PUERTA Quintero Gloria Inés, Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado, Cenicafé, avance técnico 371, Chinchiná, mayo de 2008. 8p.
- ◆ ROA Mejia Gonzalo, Secado mecánico del café, Cenicafé, avance técnico 282, Chinchiná, Diciembre de 2000. 8p
- ◆ RUIZ Muñoz, Silvio Antonio. Diseño de una Planta de Secado de Café y Evaluación del Sistema de Guardiola, Neiva: 1998, Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería. 99 p.
- ◆ SINGER Ferdinand L, Resistencia de materiales, Edimac S.A. México D.F, 1999, 583p.
- ◆ VENTILACION Y REPRESENTACIONES INDUSTRIALES, <http://mayoreodeaire.com/productos/sandp/dafv.pdf>, (artículo Internet), consulta 10 de octubre de 2008.

# ANEXOS

**ANEXO A. Vista en planta de la cámara de presecado del prototipo.**



**ANEXO B. Vista frontal del prototipo.**



**ANEXO C. Vista lateral del prototipo.**



**ANEXO D. Evaluación del prototipo secador.**



**ANEXO E. Prototipo en funcionamiento.**



**ANEXO F. Descripción presupuesto silo.**

<b>DESCRIPCION PRESUPUESTO SILO SECADOR</b>		
<b>ITEM</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO</b>
Lamina galvanizada calibre 20	23m	1956150
Perfil rectangular acero 40*25*3mm	87m	224750
Angulo estructural L1 ½ * 3/16"	44m	264000
Tornillos acero alta resistencia ¼ * 1"	250	112500
Polea 8" * 1/2"	2	80000
Ventilador centrifugo (5HP, 2"c.a)	1	3200000
Motor monofásico 5 HP	1	1150000
Bisagra capsula 2"	3 pares	75000
lamina troquelada calibre 20 orificio 4"	7m	454650
Quemador ACPM	1	700000
Intercambiador de calor	1	900000
perfil circular hueco 2"	9m	111000
baranda tubo galvanizado 1 1/2"	16m	193830
<b>TOTAL PARCIAL</b>		<b>9421880</b>
Administración, imprevisto	20%	1884376
<b>TOTAL</b>		<b>11.306.256</b>

