

**DISEÑO DE UN EQUIPO PARA SECADO MECÁNICO DE CAFÉ Y SU
EVALUACIÓN A PARTIR DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA**

1:5

LUIS ADOLFO PERDOMO CENTENO

LUIS ENRIQUE CUELLAR PÉREZ

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AGRÍCOLA

NEIVA

2009

**DISEÑO DE UN EQUIPO PARA SECADO MECÁNICO DE CAFÉ Y SU
EVALUACIÓN A PARTIR DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA**

1:5

**LUIS ADOLFO PERDOMO CENTENO
LUIS ENRIQUE CUELLAR PÉREZ**

Proyecto de grado presentado como requisito, para optar al título de:

INGENIERO AGRÍCOLA

Director

Ph.D. JOSE DUBAN HENAO CUELLAR

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AGRÍCOLA**

NEIVA

2009

Nota de aceptación:

Director del trabajo

Jurado

Jurado

Neiva, Noviembre de 2009

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan sus agradecimientos:

Inicialmente a Dios por darnos la sabiduría, paciencia y entendimiento en la realización de este proyecto, que permitió concluir el proceso de formación como profesionales en el área de la Ingeniería Agrícola.

Al Ph.D José Duban Henao Cuellar, docente de la Universidad Surcolombiana y director del presente trabajo de grado, por su paciencia y colaboración desinteresada y oportuna, durante todas las etapas de este proyecto.

A todos los docentes de la Universidad Surcolombiana, que de una u otra forma nos brindaron su conocimiento, apoyo y disponibilidad a través de todo el ciclo de formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería, programa Ingeniería Agrícola y la Universidad Surcolombiana.

A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la culminación de nuestra carrera profesional y realización del presente trabajo.

¡GRACIAS!

DEDICATORIA

Luis Adolfo Perdomo Centeno dedica el presente trabajo a:

Este trabajo se lo dedico a mis padres, María Eugenia Centeno y Jairo Perdomo Galindo, a mis hermanos, Alexander, Andrés y Edwin Alfonso, a Angel Ancizar Medina Peña, quienes con todo su amor y comprensión fueron mi apoyo y compañía en los momentos buenos y difíciles que se presentaron durante el proceso de mi formación profesional, permitiendo que todas las metas propuestas se cumplieran. Ellos hacen parte de mi gran sentimiento de admiración y respeto. También está dedicado a los compañeros Felipe Losada, Hernán Montealegre, Iván Trujillo, Yeseider Mayorga, Sebastián Rincón, Jorge Peñaloza y a mi compañero de trabajo Enrique Cuellar, con quienes compartí esta importante etapa de mi vida.

Luis Enrique Cuellar Pérez dedica el presente trabajo a:

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Ana María Pérez y Luis Enrique Cuellar, a mis hermanos Heiber, Maryeni, Robinson, a mis sobrinos Maira, Andrés y Camila, quienes con todo su amor y comprensión fueron mi apoyo y compañía en los momentos buenos y difíciles que se presentaron durante el proceso de mi formación profesional, permitiendo que todas las metas propuestas se cumplieran. Ellos hacen parte de mi gran sentimiento de admiración y respeto. También está dedicado a los compañeros Felipe Losada, Iván Trujillo, Hernán Montealegre, Sebastián Rincón, Yeseider Mayorga, Albert Salcedo, Jennifer Castro, Damaris Perdomo, Diana Cabrera, y a mi compañero de trabajo Luis Perdomo, con quienes compartí esta importante etapa de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 EL SECADO Y SU IMPORTANCIA	18
1.2 TEORIA DEL SECADO EN PRODUCTOS AGRÍCOLAS	18
1.2.1 Secado en capas profundas	18
1.2.2 Principio del movimiento de la humedad	19
1.2.3 Consideraciones psicrométricas del secado	19
1.2.4 Periodos de secamiento	20
1.2.5 Variables que intervienen en el secado	21
1.2.5.1 Temperatura del aire de secado	21
1.2.5.2 Humedad relativa	22
1.2.5.3 Isotermas de sorción y adsorción	23
1.2.5.4 Calor específico	24
1.2.5.5 Humedad del grano	25
1.2.5.6 Peso final del grano	26
1.2.5.7 Humedad inicial	27
1.2.5.8 Humedad final	27
1.2.5.9 Humedad de equilibrio	28
1.2.5.10 Cambios de presión	28
1.2.5.11 Flujo de aire	28
1.2.5.12 Inversión de la dirección del flujo de aire	29
1.2.5.13 Movimiento del aire	29
1.3 TIPOS DE SECADO	34
1.4 ALGUNOS SECADORES MECÁNICOS UTILIZADOS EN COLOMBIA	37
1.4.1 Secadores mecánicos rotativos o guardiolas	37
1.4.2 Secadores verticales	38

1.4.3	Secadores quindianos	38
1.4.4	Cuartos secadores o silos	39
1.5	EFICIENCIA DE SILOS SECADORES	42
1.6	SELECCIÓN DEL VENTILADOR	43
1.6.1	Cálculo del caudal de aire del ventilador	43
1.6.2	Potencia motor del ventilador	44
1.7	FUENTES DE CALOR PARA CALENTAMIENTO DEL AIRE	44
1.8	CONSUMO DE COMBUSTIBLE	45
1.9	CRITERIOS DE DISEÑO PARA SILOS METÁLICOS	46
1.9.1	Determinación de presiones y esfuerzos método de H.A. Janssen	47
1.9.2	Selección de tornillos	49
1.9.3	Predimensionamiento de vigas	54
2.	METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL SILO SECADOR	57
2.1	PARÁMETROS DE DISEÑO	57
2.2	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO Y SU FUNCIONAMIENTO	60
2.3	CAPACIDAD POTENCIAL DEL SILO SECADOR	61
2.4	DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES DEL SILO	61
2.4.1	Cuerpo de secado	61
2.4.1.1	Dimensiones del silo secador	61
2.4.1.2	Capacidad de las camas de secado	62
2.4.1.3	Cálculo de presiones sobre el piso y las paredes	64
2.4.1.4	Cálculo del espesor de la lámina	66
2.4.1.5	Cálculo de tornillos	66
2.4.1.6	Puertas para cargue y descargue del grano	69
2.4.1.7	Cámara de secado	70
2.4.1.8	Cálculo estructural del soporte para la lámina perforada	73
2.4.1.9	Compuertas de entrada y salida del aire de secado	81
2.4.2	Procedimiento para seleccionar el ventilador	82
2.4.2.1	Flujo o caudal de aire del ventilador	82
2.4.2.2	Determinación de pérdidas de presión en el sistema	83
2.4.2.3	Potencia del motor del ventilador	89

2.4.2.4	Selección del ventilador	90
2.4.2.5	Intercambiador de calor para el silo secador	92
2.5	CÁLCULO DEL CALOR REQUERIDO PARA EL SECADO	95
2.5.1	Consumo teórico de combustible	96
3.	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO A ESCALA 1:5	97
3.1	METODOLOGÍA DE CONTRUCCIÓN	97
3.2	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN	99
3.2.1	Determinación de humedad inicial del café	99
3.2.2	Prueba de secado en el silo secador	99
4.	RESULTADOS	100
4.1	COSTO DEL EQUIPO VS. OTRAS ALTERNATIVAS	100
4.2	FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	100
4.3	EVALUACION EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO	102
4.3.1	Humedad inicial del café	103
4.3.2	Proceso de secado en el prototipo silo secador	103
4.3.3	Eficiencia del silo secador	105
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	106
6.	CONCLUSIONES	110
7.	RECOMENDACIONES	112
8.	BIBLIOGRAFÍA	113
	ANEXOS	116

INDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Curva de secado de granos	21
Figura 2. Curva contenido de humedad de equilibrio del café pergamino	24
Figura 3. Esquema de un secador estacionario con inversión del flujo	35
Figura 4. Esquema de un secador de flujo cruzado	36
Figura 5. Esquema de un secador de flujo concurrente en el mismo sentido	36
Figura 6. Esquema de un secador de flujo concurrente en sentido contrario	37
Figura 7. Secadores rotativos	38
Figura 8. Esquema de un secador intermitente de flujos concurrentes	39
Figura 9. Esquema de un silo secador con inversión del flujo - cámaras de secado y presecado	41
Figura 10. Silo secador con quemador de biomasa	41
Figura 11. Silo secador con quemador de gas	42
Figura 12. Esquema vista frontal del silo secador	58
Figura 13. Esquema vista lateral del silo secador	59
Figura 14. Esquema corte lateral del silo secador	59
Figura 15. Esquema recorrido del flujo de aire a través del silo secador	60
Figura 16. Disposición del grano en la cama de secado	63
Figura 17. Disposición de tornillos en la unión de las láminas	67
Figura 18. Disposición de tornillos para fijar la malla perforada	69
Figura 19. Detalles de las puertas de cargue y descargue	70

Figura 20. Detalle disposición de las mallas y marco estructural de las camas de secado	72
Figura 21. Detalle marco estructural camas de secado	73
Figura 22. Área de influencia de la viga	74
Figura 23. Diagrama de carga distribuida a través de la viga	77
Figura 24. Diagrama de momento máximo de la viga	77
Figura 25. Sección de la viga	78
Figura 26. Sección del ángulo	80
Figura 27. Compuerta al interior de la expansión gradual	81
Figura 28. Diagrama de Moody	87
Figura 29. Ventilador centrifugo de alabes inclinados hacia atrás	90
Figura 30. Curva característica del ventilador	91
Figura 31. Dimensiones de la unidad de ventilación	92
Figura 32. Esquema estructura del intercambiador de calor recomendado	93
Figura 33. Intercambiadores de calor	94
Figura 34. Interruptor para ajuste de la temperatura	98
Figura 35. Esquema de distribución del aire de secado del silo secador	101
Figura 36. Esquema sistema de descargue del grano	102
Figura 37. Comportamiento de la humedad durante el proceso de secado	105
Figura 38. Curva de secado según modelación (ecuación de Roa)	107
Figura 39. Comparación curva de secado experimental Vs. Modelación	107
Figura 40. Comportamiento de la humedad relativa durante el proceso	109

INDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros ecuación de humedad de equilibrio del café pergamino	24
Tabla 2. Poder calorífico de algunos combustibles utilizados en Colombia	46
Tabla 3. Dimensiones del silo	62
Tabla 4. Pérdidas totales en el sistema	89
Tabla 5. Características finales del ventilador (flujo de aire y presión estática)	92
Tabla 6. Dimensiones del prototipo	97

INDICE DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tensión en tornillos	50
Cuadro 2. Resistencia de tornillos	51
Cuadro 3. Flechas admisibles para vigas de acero	56
Cuadro 4. Coeficientes de pérdida para cambios de área	88
Cuadro 5. Dimensiones del ventilador	92
Cuadro 6. Determinación de Hbh y Hbs del producto	103
Cuadro 7. Comportamiento del secado en el prototipo	104

INDICE DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Vista frontal del prototipo silo secador	116
ANEXO B. Vista lateral y posterior del silo secador	117
ANEXO C. Vista lateral del silo secador cargado con grano húmedo	118
ANEXO D. Vista en planta del silo secador	119
ANEXO E. Apertura de compuertas de descargue del silo secador	120
ANEXO F. Descripción presupuesto del silo secador a Septiembre de 2009	121
ANEXO G. Plano1. Silo Secador	122
ANEXO H. Plano 2. Silo Secador	123

RESUMEN

Con el fin de mejorar el proceso de secado del café, se diseñó un equipo mecánico tipo silo, el cual tiene ventajas como: menor requerimiento de espacio para secar, es desarmable, reduce la mano de obra, disminuye el tiempo de secado y conserva la calidad del producto. El silo consta de dos cámaras de secado y el flujo de aire puede circular a través de estas realizando secado ó presecado dependiendo de la dirección del flujo empleada (sistema de compuertas), con lo cual se logra homogeneidad en la humedad final del grano. Además presenta un mecanismo práctico para el descargue del grano seco, utilizando una inclinación en las camas de secado de 38°. El dimensionamiento del silo secador obtenido fue: Capacidad total = 2340 Kg., volumen de aire = 4540.61 CFM, pérdidas de presión (ΔP) = 2.066 pulg. c.a., motor eléctrico monofásico de 2.5 HP. La construcción y evaluación de un prototipo a escala 1:5 del silo secador, sirvió como parámetro para obtener la siguiente información sobre la cinética del secado: humedad inicial (50.61%), humedad final (10.09%), temperatura promedio del aire de secado (46.67 °C), caudal ($Q = 0.08\text{m}^3/\text{seg.}$) y tiempo de secado (28 horas). Además permitió corroborar las condiciones de operación del sistema.

Palabras clave: Silo, flujo de aire, secado de café, tiempo de secado, contenido de humedad.

SUMMARY

In order to get better the process of drying the coffee, it was designed a mechanic equipment like a silo which has some advantages such as: less necessity of space to dry; it is dismantled, it reduce the labor, drying duration and it keeps the product quality. The silo is constituted by two drying chambers and the airflow can go through them carrying out drying and pre-drying depending on the flow direction used (gates system) which let homogeneity in the final humidity of the grain. Moreover, it presents a practical mechanism to download the drying grains using an inclination in the drying beds of 38°. The measurement of the drying silo obtained was: total capacity = 2340 Kg., air volume = 4540.61 CFM, pressure loss (ΔP) = 2.066 inches. w.c., motor single-phase electrical of 2.5 HP. The construction and evaluation of a prototype to scale 1:5 of the drying silo serves as a parameter to get the following information about the kinetics of the drying: initial moisture (50.61%), final moisture (10.09%), average temperature of drying airflow (46.67 °C), volume of flow ($Q = 0.08\text{m}^3/\text{seg.}$) and time of drying (28 hours). Besides, it allowed to corroborate the operation conditions of the system.

Key words: Silo, airflow, drying coffee grain, drying time, content of humidity.

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las zonas cafeteras, el secado se realiza de forma natural utilizando energía solar como fuente de calor, lo que genera varios inconvenientes que dificultan dicha tarea. Entre estas se encuentran la falta de infraestructura adecuada, condiciones climáticas adversas que habitualmente coinciden con los periodos críticos de lluvia y pocas horas de brillo solar durante la cosecha, impidiendo que los patios de secado tengan buenos rendimientos y permitan el secado eficaz y eficiente. De esta manera suelen acumularse grandes cantidades de café que no pueden ser ubicadas en los patios de secado. Cuando el café pergamino después de cosechado se deja por tiempos prolongados con su contenido inicial de humedad 52 al 56% bh, por retraso en el proceso de secado, o cuando este se almacena con contenidos de humedad superiores al 12% bh debido a un proceso de secado deficiente, el riesgo de ser atacado por hongos y de ser contaminado con micotoxinas es muy alto. La contaminación del grano hace que éste pierda su calidad, ocasionando su rechazo en los mercados nacionales e internacionales, lo cual afecta drásticamente los ingresos de los caficultores y del país.

Con el avance tecnológico cada día aumentan proporcionalmente los sistemas de secado mecánico, por razones de disminución de riesgos, costos y mejor control de la producción. Si se desea que los sistemas de secado de café, o de cualquier grano, sean eficientes, se debe conocer la manera de operarlos adecuadamente para preservar las características físicas, químicas y sensoriales de los productos agrícolas, especialmente las del café, se ha encontrado que la manera más efectiva de lograrlo es mediante el secado. Con la implementación de un equipo para el secado mecánico de café se presenta una alternativa de secado a pequeños y medianos productores, con los cuales se puede obtener ventajas como menor requerimiento de espacio para secar, el equipo es desarmable por lo

cual puede ser transportado de un lugar a otro con facilidad, es económico en cuanto consumo de combustible ya que funciona con residuos de cosecha (cisco de café), reducción de la mano de obra, se puede obtener mayor volumen de grano seco, no depende de las condiciones climáticas, es operable las 24 horas del día, disminución del tiempo de secado y conservación de la calidad, de tal manera que permita obtener con menos riesgo café tipo exportación que cumpla con los estándares de calidad exigidos por los mercados internacionales.

En el presente documento se muestra de manera clara y detallada el diseño de un silo secador de café y la evaluación a partir de la construcción de un modelo a escala 1:5. Este consta de dos cámaras de secado, sobre las cuales el flujo de aire puede circular en dos sentidos haciendo secado y presecado sobre la capa de grano, con el objetivo de garantizar un secado más homogéneo. Este sistema de silo mecánico cuenta con un medio sencillo de compuertas para permitir la inversión de sentido del flujo de aire y de igual manera presenta un mecanismo práctico para el descargue del grano seco, disminuyendo costos en personal para realizar esta labor.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar, construir y evaluar a partir de un modelo a escala, un equipo de secado mecánico, tipo silo, asequible a pequeños y medianos caficultores.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un diseño que permita una operación sencilla y facilite el sistema de descargue del grano.
- Construir un prototipo del diseño, a escala 1:5, para simular el funcionamiento del silo secador.
- Evaluar el prototipo.
- Brindar a los pequeños y medianos caficultores una alternativa de secado de granos económica y técnicamente viable.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 EL SECADO Y SU IMPORTANCIA

De acuerdo a Solano (2001), el proceso de secado sucede en el momento que se presenta transferencia de calor y masa, como son la humedad interna ó vapor dentro del sólido y líquido evaporado de las superficies húmedas del mismo. Existen diferentes mecanismos que controlan el libre movimiento de la humedad en la parte interna como es su difusión como líquido ó vapor, la acción capilar, el encogimiento y los gradientes de presión, gravedad y vaporización de la humedad.

Además de disminuir el porcentaje de humedad de un producto agrícola, el secado permite garantizar la calidad, al evitar cambios internos ó daños por microorganismos, dejándolo en condiciones de bajo riesgo, permitiendo cuando sea requerido su almacenamiento por tiempo prolongado.

1.2 TEORIA DEL SECADO EN PRODUCTOS AGRÍCOLAS

1.2.1 Secado en capas profundas. Según BROOKER (1975), el secado en capas profundas es uno de los sistemas más usados para el secado de productos biológicos dadas las características y necesidades del mismo. Para espesores de capa de grano iguales o inferiores a 0.45 metros, se recomienda una temperatura del aire de secado superior a 43 °C. En la medida que aumenta el espesor de capa de grano, se incrementa el sobresecamiento del producto que recibe el aire con mayor temperatura.

1.2.2 Principio del movimiento de la humedad. Según SOLANO (2001), de acuerdo a la diferencia de presión de vapor, la humedad se desplaza de un lugar a otro. Esto indica que la resistencia al desplazamiento de humedad en la superficie de los productos, es distinta a la resistencia en su interior y que su presión de vapor depende de las temperaturas y grados de humedad existentes. A medida que la temperatura del producto aumenta mientras el contenido de humedad permanece constante, la presión de vapor dentro del producto aumenta.

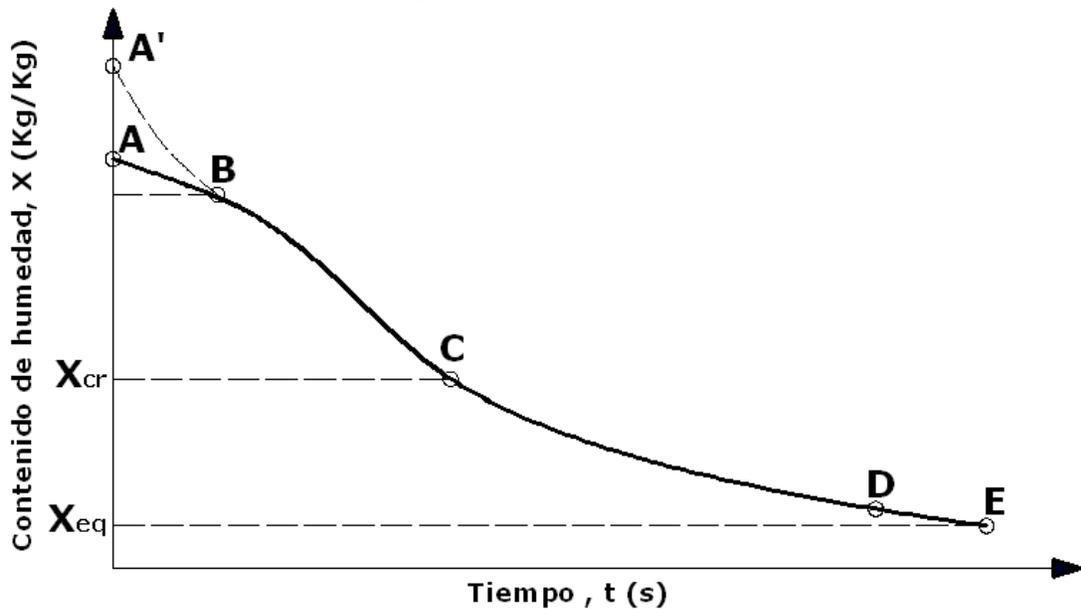
El fenómeno de migración de humedad a través de sólidos ocurre por circulación capilar, donde el agua libre se mueve por procesos físicos de gravedad y capilaridad, siempre y cuando existan rutas por donde el agua pueda circular libremente; difusión de vapor, donde el vapor se mueve por difusión a través del sólido siempre y cuando se establezca un gradiente de temperatura que genere un gradiente de vapor y difusión del líquido, donde el líquido que está por debajo del punto de saturación se mueve por difusión.

1.2.3 Consideraciones psicrométricas del secado. De acuerdo a GUTIERREZ y MUÑOZ (1991), la psicrometría es el estudio de las temperaturas de bulbo húmedo y seco, que permiten determinar las variaciones en la humedad del aire. La importancia de la psicrometría radica en la determinación de los contenidos de vapor de agua presentes en el aire de secado; para lo cual se hace necesario conocer sus propiedades termodinámicas tales como: temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, punto de rocío, humedad relativa, humedad absoluta, volumen específico y entalpía. Todas estas propiedades pueden estar representadas en una carta psicrométrica.

1.2.4 Periodos de secamiento. Según CONTRERAS (1995), existen cuatro periodos en el proceso de secado de granos, los cuales se representan en la Figura 1, 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 (X_{cr}) 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. Donde E es el punto de humedad de equilibrio (X_{eq}).

Figura 1. Curva de secado de granos



Fuente: CONTRERAS (1995)

1.2.5 Variables que intervienen en el secado

1.2.5.1 Temperatura del aire de secado. De acuerdo con SOLANO (2001), la temperatura del aire de secado puede variar desde los 42 °C hasta 83 °C dependiendo del sistema de secado empleado y de la fase en que se encuentre el proceso. Por ejemplo en sistemas de bastante espesor en la capa de grano, la temperatura debe ser baja (40-45 °C), en cambio, para sistemas de flujo continuo, se emplean temperaturas más elevadas.

Existen tres tipos de temperatura a tener en cuenta en el proceso de secado:

a. Temperatura de bulbo seco (T_{bs}): es la temperatura del aire o producto indicada por un termómetro corriente, el cual no está afectado por el vapor de agua contenido en el aire (°C).

b. Temperatura de bulbo húmedo (Tbh): es la temperatura indicada por un termómetro que tiene su bulbo humedecido e inmerso en una corriente de aire (°C).

c. Temperatura de punto de rocío (Tr): es la temperatura a la cual la mezcla aire-vapor se condensa cuando es enfriada a presión atmosférica y humedad constante (°C).

1.2.5.2 Humedad relativa. De acuerdo a CABRERA Y MORA (2009), La relación entre la humedad de una masa de aire y la humedad de saturación de la misma masa de aire a la misma temperatura se conoce como humedad relativa. El objetivo del secado, es permitir que disminuya el efecto de la humedad relativa, ya que cuando esta es muy elevada aumenta el tiempo de secado. Por tal razón es calentado el aire para que la humedad relativa disminuya y así generar un ambiente de secado favorable donde los gradientes de concentración de humedad favorezcan la migración de humedad desde el interior del producto.

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:

$$\Delta PV = PV2 - PV1 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

ΔPV = Déficit de presión de vapor, milímetros columna de agua (mm. c.a)

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

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

Esto ocurre debido a la aplicación de calor al grano, aumentando su presión de vapor, permitiendo que ceda humedad al medio secante y deteniéndose en el momento que ambas presiones sean iguales.

1.2.5.3 Isotermas de sorción y adsorción. Según GUZMAN (1990), cuando un producto es colocado en un ambiente y este cede humedad hasta el equilibrio, se produce desorción; si el proceso se da en sentido contrario, el producto recibe humedad, se produce adsorción. En los procesos físicos a las mismas condiciones de humedad relativa y temperatura, para un producto determinado, se ocasionan diferentes valores de humedad de equilibrio, esta diferencia entre adsorción y desorción isoterma es llamada efecto de histéresis.

De acuerdo con ROA M., et al. (1999), con la ecuación de isotermas de sorción y secado del café, se establecen las variables para la determinación de humedad de equilibrio del café pergamino (ver Tabla 1 y Figura 2).

$$M_{eq} = [61.03085\phi - 108.37\phi^2 + 74.46\phi^3] e^{[-0.03705\phi + 0.0701\phi^2 - 0.03518\phi^3 \times T]} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

M_{eq} = Contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, (% b.s.)

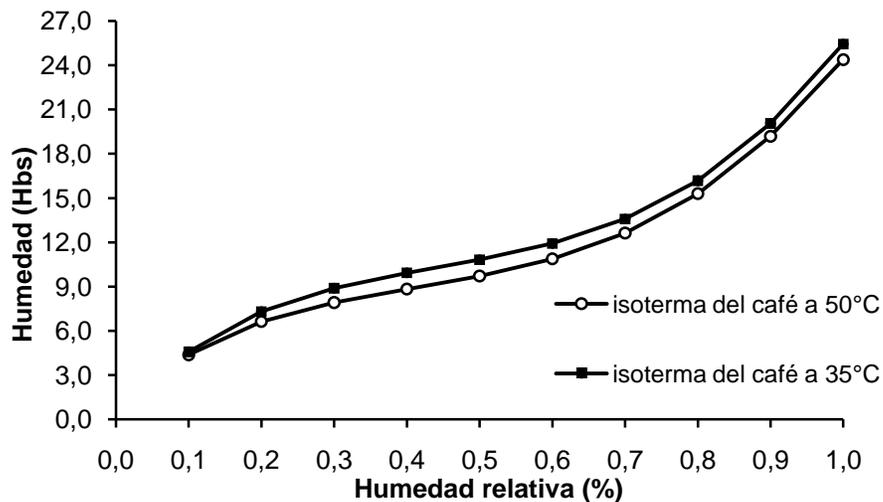
ϕ = Humedad relativa (decimal)

T = Temperatura del aire (°C)

Tabla 1. Parámetros ecuación de humedad de equilibrio del café pergamino

HR	T(°c)	Me	E	HR	T(°c)	Me	E
0,10	50,00	4,37573256	0,8590	0,10	35,00	4,57982894	0,8991
0,20	50,00	6,63136165	0,7832	0,20	35,00	7,13578139	0,8428
0,30	50,00	7,92390222	0,7499	0,30	35,00	8,63843722	0,8175
0,40	50,00	8,83382135	0,7462	0,40	35,00	9,64481524	0,8147
0,50	50,00	9,71936024	0,7635	0,50	35,00	10,53899616	0,8279
0,60	50,00	10,87998087	0,7948	0,60	35,00	11,65596054	0,8515
0,70	50,00	12,62941134	0,8331	0,70	35,00	13,34069886	0,8800
0,80	50,00	15,30228473	0,8699	0,80	35,00	15,95583425	0,9070
0,90	50,00	19,18738524	0,8954	0,90	35,00	19,83417271	0,9256
1,00	50,00	24,38096743	0,8990	1,00	35,00	25,17251702	0,9282

Figura 2. Curva contenido de humedad de equilibrio del café pergamino



1.2.5.4 Calor específico. Es la capacidad calorífica que tiene un cuerpo por unidad de peso, para aumentar un grado de temperatura. De acuerdo a GUZMAN (1990), la ecuación que cuantifica el calor específico para el café es la siguiente:

$$C_p = 0.323 + 0.559M \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

C = Calor específico del producto, Kcal/Kg°C

M = Contenido de humedad del producto, % (Hbs)

1.2.5.5 Humedad del grano. CASTILLO (1978), expresa que en los granos el agua está presente de las siguientes formas:

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

$$\text{Materia seca} = W_i \times \left(\frac{100 - H_i}{100} \right) \quad (\text{Ec. 4})$$

En el grano seco:

$$\text{Materia seca} = W_f \times \left(\frac{100 - H_f}{100} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

W_i = Peso inicial del grano

W_f = Peso final del grano

H_i = Humedad inicial del grano, porcentaje

H_f = Humedad final del grano, porcentaje

Finalmente y de acuerdo con CABRERA Y MORA (2009), el contenido de humedad es igual a:

$$\text{Humedad base húmeda (Hbh)} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Humedad base seca (Hbs)} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_f} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

Hbh: humedad base húmeda

Hbs: Humedad base seca

P_i : peso inicial de la muestra (gr)

P_f : peso final de la muestra (gr)

1.2.5.6 Peso final del grano. CABRERA Y MORA (2009), expresan que teóricamente se puede obtener el peso final del grano de la siguiente forma:

$$W_i * (100 - H_{bhi}) = W_f * (100 - H_{bhf}) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

Wi = Peso inicial del grano

Wf = Peso final del grano

Hbhi = Humedad inicial base húmeda

Hbhf = Humedad final base húmeda

1.2.5.7 Humedad inicial. Según lo expresado por MOTTA y REPIZO (1982), es el contenido de humedad que tiene el grano cuando es cosechado y llevado a la planta procesadora. La humedad inicial es un factor que influye en la tasa de secado, ya que entre mayor sea su contenido, mayor será la remoción por unidad de energía aplicada; esto se explica teniendo en cuenta que 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. Para el café el rango de humedad inicial puede estar entre el 50 y 55% en base húmeda.

1.2.5.8 Humedad final. Es la humedad que se desea tener en el grano, luego de someterlo al proceso de secado. Es importante saber hasta dónde ha de llevarse el contenido de humedad, ya que de acuerdo al uso y tiempo de almacenamiento del producto, se debe tomar esta decisión y obtener humedades finales seguras que eviten el deterioro del producto por la acción de hongos. El contenido de humedad final del grano tiene influencia en el proceso de secado, en la medida en que permite determinar las condiciones de entrada del aire que garantice 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 y 12%.

1.2.5.9 Humedad de equilibrio. Es un parámetro que depende de la humedad relativa y la temperatura del aire secante y se define como el contenido de humedad (base húmeda o seca) que el producto logra luego estar sometido durante un tiempo suficiente a condiciones controladas de temperatura y humedad del aire. Esto implica que el producto no intercambia humedad con el aire que lo rodea, debido a que la presión de vapor de agua del grano, es igual a la presión de vapor de agua del aire.

1.2.5.10 Cambios de presión. Al realizar el secado de productos biológicos por medio de convección forzada, la presión de vapor varía en las distintas etapas de calentamiento y secado. La presión del producto es incrementada al aumentar la temperatura con un contenido de humedad. El secado del producto es notable sólo hasta cuando este alcanza una temperatura similar a la del aire caliente. La presión de vapor en la superficie del grano incrementa rápidamente durante las primeras etapas del calentamiento. El movimiento de la humedad es desde el borde exterior del grano hacia el centro del mismo. La humedad no tiene un movimiento desde el centro del grano hacia el aire sino cuando el producto es calentado o la capa superior está seca.

1.2.5.11 Flujo de aire. Parámetro que influye notablemente en la velocidad de secado, éste 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. Ángulo 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 ROA, et al. (1985), 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.

1.2.5.12 Inversión de la dirección del flujo de aire. De acuerdo con ROA M., et al. (1999), “para disminuir el gradiente de humedad en la capa estática del café se ha demostrado válida la opción de invertir la dirección del sentido del aire en la capa, a intervalos de 6 a 12 horas, de forma que se disminuye efectivamente el sobresecado en los granos que reciben el aire con mayor temperatura. Mediante esta operación los granos más húmedos quedan localizados en el interior de la capa”. Con la inversión del sentido del flujo se rehumidifica el grano sobresecado mejorando la homogeneidad en el contenido de humedad final del producto.

1.2.5.13 Movimiento del aire. Todo fluido utilizado en sistemas por convección forzada, a su paso por los componentes del secador, encuentra resistencia a su movimiento, con lo cual se ocasionan caídas de presión. De acuerdo a MOTTA y REPISO (1982), estas caídas de presión son originadas principalmente por:

- a. **Resistencia en granos:** aquí es donde se presenta mayor caída de presión en los sistemas de secado, los principales factores que ocasionan esta caída están relacionados a la velocidad del aire, tamaño de los granos, rugosidad superficial, densidad de los granos, viscosidad y concentración de impurezas. 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:

$$\Delta p' = \frac{aQ_a^2}{\ln(1+bQ_a)} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

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

a y b = Constantes definidas para cada grano

Q_a = CFM/pie²

$$Q_a = \frac{\text{Caudal (Q)}}{\text{Area de infl (A1)}} \quad (\text{Ec. 10})$$

- b. **Resistencia del piso perforado:** 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. 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:

$$\Delta p = 10^{-6} \left(\frac{Q_a}{E \times of} \right)^2 \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

ΔP = 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.

- c. **Caída de presión en ductos:** la presión total decrece continuamente en la dirección del flujo. La presión de estática y la presión de velocidad son mutuamente intercambiables y cualquiera de las dos puede incrementar o decrecer en el punto del ducto sobre el área de cruce, empezando a disminuir o crecer sobre el ramal del ducto de conexión. El movimiento del aire en el sistema se hace desde el ventilador al plenum y desde este último al sitio del grano; en muchos casos el ventilador es conectado directamente al plenum y la presión estática es la misma del ventilador, pero en otros casos, el ventilador es conectado al plenum por medio de ductos, ocasionando pérdidas en la conexión del sistema.

Para el cálculo de caída de presión por fricción, en la práctica comúnmente se emplean cartas y tablas para condiciones estándar y se realizan correcciones por densidad, no teniéndose en cuenta el efecto de la viscosidad. De acuerdo a MOTTA y REPISO (1982), se puede determinar con la ecuación de DARCY:

$$\Delta P_{\text{Ducto}} = f \times \frac{L}{D} \times H_v \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

f = Factor de fricción

L= Longitud de la tubería

D= Diámetro

V= Velocidad en el ducto (pie/min)

Hv= Cabeza dinámica (Pulg. ca)

$$H_v = \left(\frac{V}{4005} \right)^2 \quad (\text{Ec.13})$$

Número de Reynolds: se calcula para obtener el factor de fricción (f).

$$NRe = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

ρ = Densidad del aire

μ = Viscosidad dinámica

Cuando se usan ductos de sección rectangular, se puede realizar la equivalencia de las dimensiones para obtener el diámetro, por medio de la siguiente ecuación:

$$d = 1.265 \times \sqrt[5]{\frac{(a \times b)^3}{(a+b)}} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

d = diámetro

a y b = lados de la sección (pulg.)

- d. **Otras pérdidas menores:** este tipo de caídas de presión son generadas principalmente por cambio abrupto al entrar el flujo al silo y por cambios de dirección del flujo.

Por ensanchamiento abrupto:

$$\Delta P_{\text{ens.}} = C_1 \times (V_1/4005)^2 \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

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

V_1 = Velocidad en la sección menor (ducto, Pie/min)

Como $Q_1 = Q_2$, entonces $A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$

$$V_1 = \frac{(A_2 \times V_2)}{A_1} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

A_1 = Área de la sección del ducto, pie²

A_2 = Área de la sección del plenum, pie²

V_2 = Velocidad del flujo sección mayor (pie/min)

Por orificio:

Según Brooker (1995), la caída de presión por orificios, se puede determinar por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta P_{\text{orificio}} = 0.5 \times PV \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

PV = Presión de velocidad en pulgadas de columna de agua

$$PV = (V / 4005)^2 \quad (\text{Ec. 19})$$

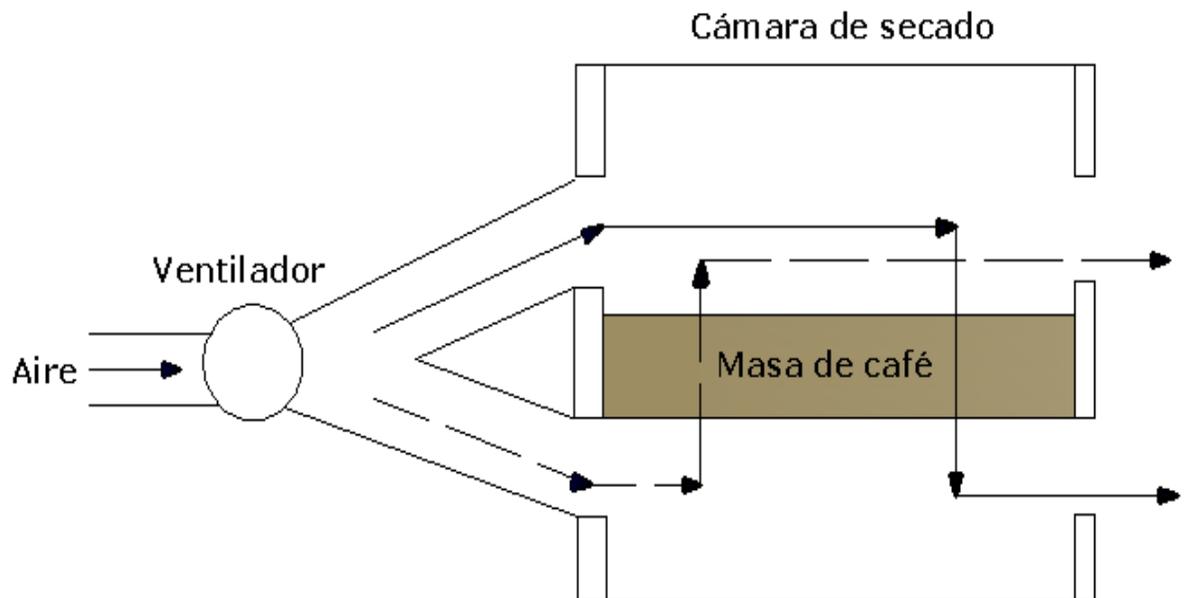
1.3 TIPOS DE SECADO

El procedimiento de secado de café se puede realizar de forma natural, es decir, secar bajo condiciones naturales de radiación, temperatura, humedad y velocidad del aire ambiente, empleando estructuras sencillas como paseras, marquesinas y patios. De acuerdo a DE DIOS (2008), “ésta técnica es ventajosa para volúmenes reducidos (≤ 1000 Kg de grano húmedo), pues el ahorro de energía es considerable, la inversión escasa, y no afecta mayormente la calidad de los granos”, pero la desventaja de realizar secado natural consiste en que durante el periodo de cosecha las condiciones climáticas son de invierno y de poco brillo solar, impidiendo realizar el secado del producto, comprometiendo seriamente su calidad. Sin embargo, su empleo a escala de gran acopio (≥ 1000 Kg de grano húmedo) es impráctico porque es un método lento, y porque requiere colectores solares de gran superficie, de manera que su aplicación ha quedado reducida a pequeños productores. Otro tipo de secado es el artificial ó mecánico y consiste en modificar las condiciones del aire de secado. Estas modificaciones se realizan por los siguientes componentes: ventiladores (encargados de forzar el aire a través de la masa del grano que se va a secar), intercambiador de calor (calienta el aire impulsado y su fuente de calor puede ser energía eléctrica, carbón, leña, gas ó residuos de cosecha, de acuerdo a las condiciones y posibilidades), sistema de distribución de aire (es la ruta obligada que debe seguir el aire como ductos y compuertas), depósitos (compartimientos donde se dispone el grano a secar) y sistema de movimiento del grano (mecanismos como bandas, cangilones, engranes, entre otros, que permiten mezclar, desplazar y agitar el grano dentro del sistema de secado).

Según BROOKER et al. (1975), los secadores mecánicos se clasifican, dependiendo del movimiento relativo del aire y del movimiento del grano. A continuación se presenta dicha clasificación:

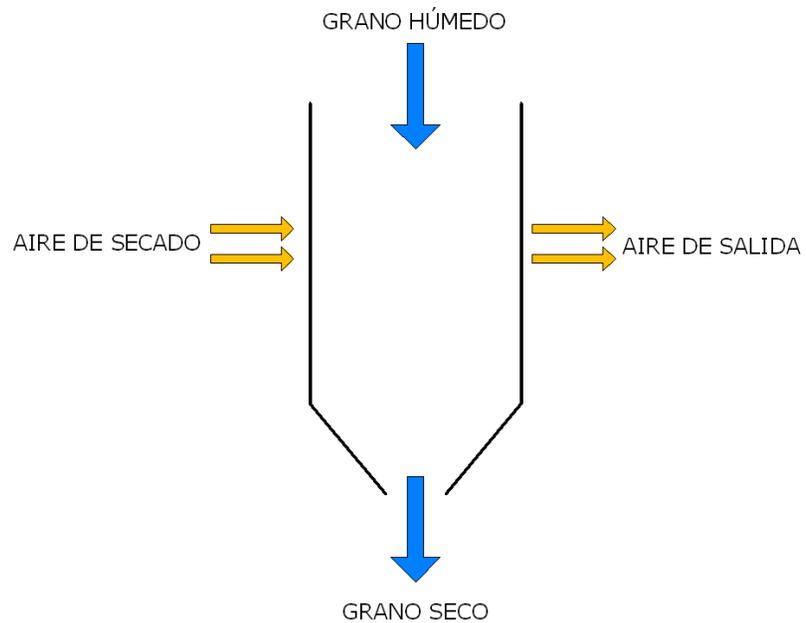
- **Secador estacionario:** En donde el grano permanece estático (ver Figura 3).
- **Secador de flujos cruzados:** Cuando el aire se mueve en dirección perpendicular al movimiento de los granos (ver Figura 4).
- **Secador de flujos concurrentes o paralelos:** En el cual el aire y los granos se mueven en la misma dirección y sentido contrario (ver Figuras 5, 6 y 8).

Figura 3. Esquema de un secador estacionario con inversión del flujo



Fuente: CORONADO et al (2008)

Figura 4. Esquema de un secador de flujo cruzado



Fuente: BROOKER et al. (1975)

Figura 5. Esquema de un secador de flujo concurrente en el mismo sentido



Fuente: BROOKER et al. (1975)

Figura 6. Esquema de un secador de flujo concurrente en sentido contrario



Fuente: BROOKER et al. (1975)

1.4 ALGUNOS SECADORES MECÁNICOS UTILIZADOS EN COLOMBIA

Según ROA, et al. (1988), los tipos de secadores mecánicos se clasifican dependiendo del movimiento relativo del aire y del grano, en sistemas de flujo continuo y estáticos. Entre ellos están:

1.4.1 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, residuos de cosecha, o un calentador de resistencias eléctricas (ver Figura 7).

Figura 7. Secadores rotativos



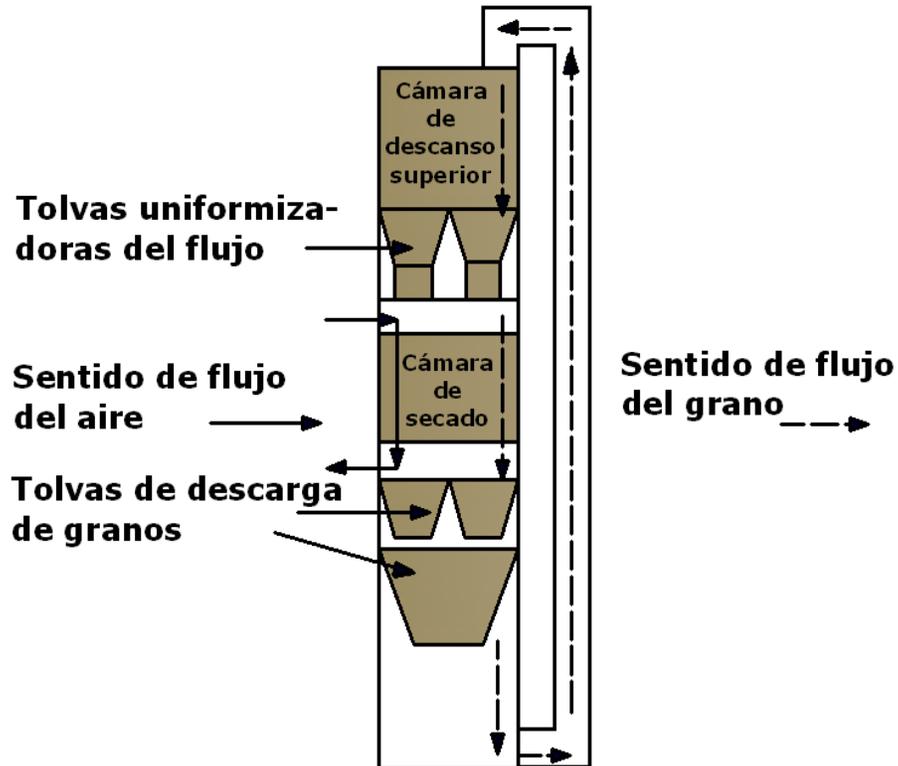
Fuente: CORREA y GAUTZ (2008)

1.4.2 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 (ver Figura 8).

1.4.3 Secadores 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.

Figura 8. Esquema de un secador intermitente de flujos concurrentes



Fuente: CORONADO et al (2008)

1.4.4 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:

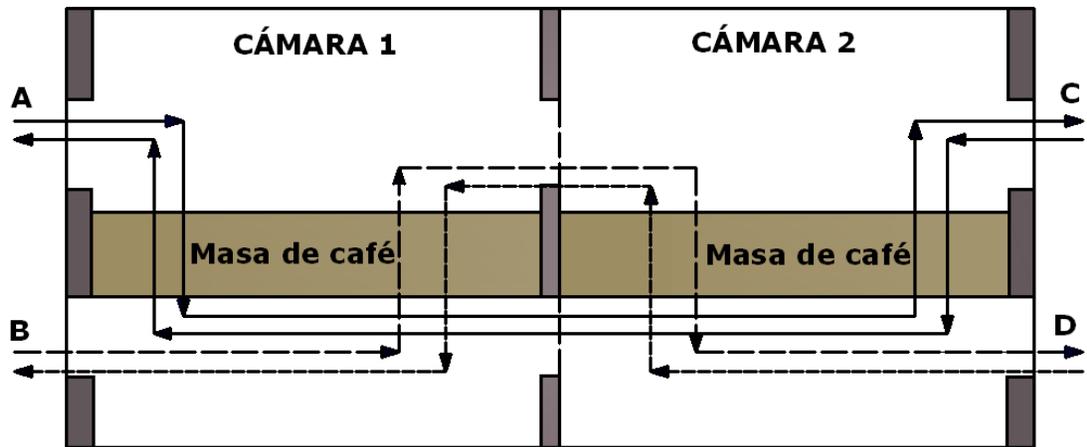
- A. En cuanto al número de compartimentos (de un compartimento o de dos, como se indica las Figuras 3 y 9).
- B. En cuanto al flujo del aire (flujo en una dirección con pre-secado y sin él; Doble flujo con pre-secado y sin él) (ver Figuras 3 y 9).
- C. En cuanto al calentamiento del aire (a fuego directo o con intercambiador de calor).

D. En cuanto a la fuente de calor (energía eléctrica, con quemador de ACPM, con quemador de aceite, con hornillas para coque y carbón mineral) (ver Figuras 10 y 11).

Estos equipos, normalmente son construidos en mampostería (ladrillo y cemento) y en lámina de hierro; además el secado de café por medio de este sistema, ha tomado gran importancia y es muy frecuente en las zonas cafeteras del país, ya que permite realizar el secado de gran volumen de grano en un corto lapso de tiempo y requiere de poca mano de obra.

Mediante estos equipos se agiliza el secado, ya que garantiza el paso de aire caliente (45 - 50°C) sobre la masa de grano y con esto se logra aumentar la capacidad de extracción de humedad. Se debe aclarar que unas de las condiciones para que estos equipos cumplan correctamente su función son: no deben permitir que los gases de combustión se mezclen con el aire de secado; que no desarrollen temperaturas superiores a los 50°C, ya que cristalizarían el grano afectando su apariencia física, características organolépticas y generaría consistencia quebradiza en su proceso de trilla, cuenten con un buen sistema de compuertas para la distribución del aire (inversión de flujo cada 4 ó 6 horas), asegurando secado homogéneo del grano.

Figura 9. Esquema de un silo secador con inversión del flujo - cámaras de secado y presecado



Fuente: CORONADO et al (2008)

Figura 10. Silo secador con quemador de biomasa



Fuente: Ingesecc - Ltda, 2008

Figura 11. Silo secador con quemador de gas



Fuente: CORREA y GAUTZ (2008)

1.5 EFICIENCIA DE SILOS SECADORES

De acuerdo con DE DIOS (1996), para determinar la eficiencia con que está trabajando un silo secador se miden las temperaturas del aire de secado, el aire usado y el aire ambiente, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{T_{as}-T_{au}}{T_{as}-T_{aa}} \times 100 \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

T_{as}: Temperatura del aire de secado

T_{au}: Temperatura del aire usado

T_{aa}: Temperatura del aire ambiente

1.6 SELECCIÓN DEL VENTILADOR

Este es uno de los elementos y parámetros 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).

1.6.1 Cálculo del caudal de aire del ventilador (q). Para estimar el flujo o caudal de aire, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

a. Mediante la velocidad del aire de secado: De acuerdo a ROA, et al. (1988), la velocidad del aire de secado recomendada dentro del silo es de 28.5 m/min.

$$\text{Caudal (Q)} = \text{Área} \times \text{Velocidad} \quad (\text{Ec. 21})$$

b. Mediante caudal recomendado por Cenicafé: De acuerdo a ROA M., et al. (2000), el valor de caudal recomendado para el secado de café pergamino en capas estáticas es de 25 m³/min por cada metro cúbico (m³) que ocupe el grano.

$$\text{Caudal (Q)} = Q_{\text{recomendado}} \times \text{Volumen} \quad (\text{Ec. 22})$$

c. Mediante número de Búshels: De acuerdo al número de búshels, el caudal es calculado, así:

$$\text{Caudal (Q)} = Q_{\text{recomendado}} \times \text{Nº Bushels} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde

$$N^{\circ}\text{Bushels} = \frac{\text{Volumen total del grano (pie}^3\text{)}}{1.25\text{bu}} \quad (\text{Ec. 24})$$

1.6.2 Potencia motor del ventilador (HP).

$$\text{HP} = \frac{Q \times \Delta P}{6356 \times \eta} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

ΔP = Pérdidas totales (ΔP grano + ΔP malla + ΔP otras)

η = Eficiencia del ventilador

1.7 FUENTES DE CALOR PARA CALENTAMIENTO DEL AIRE

Para el secado de café se vienen implementando otras alternativas para el aprovechamiento de biosólidos como combustible alternativo. Los biosólidos son todos aquellos compuestos de tipo orgánico 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 y pulpa de café para la producción de bioetanol.

De acuerdo con DE DIOS (1996), los combustibles que comúnmente se encuentran en el mercado son:

- ❖ **Combustibles líquidos.** Gasoil, diesel oíl, diluyente par fuel oíl, fueloil, kerosene.
- ❖ **Combustibles gaseosos.** Gas licuado (propano ó butano) y gas natural.
- ❖ **Combustibles sólidos.** Leña, carbón y residuos de cosecha.

1.8 CONSUMO DE COMBUSTIBLE

De acuerdo a ROA M., et al. (1999), el consumo de combustible se determina mediante la siguiente ecuación:

$$q = \frac{Q \times \Delta T \times 60}{n \times c} \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde:

- q = Flujo de combustible (Kg/min)
- Q = Caudal del aire (m³/min)
- ΔT = Diferencia de temperatura entre el aire de secado y el aire ambiental (°C)
- n = Eficiencia del intercambiador
- c = Poder calorífico del combustible (Kj/Kg). Ver Tabla 2.

Tabla 2. Poder calorífico de algunos combustibles utilizados en Colombia

Combustible	Poder calorífico (Kj/Kg)
ACPM	146000
HULLA (antracita)	33440
HULLA (muestra Riosucio, Caldas)	28750
Coque	30514
Cascarilla de café	17936
Cascarilla de arroz	12500

Fuente: ROA M., et al. (1999)

1.9 CRITERIOS DE DISEÑO PARA SILOS METÁLICOS

Según el criterio de estados límite de falla (Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, ASTM 2000), 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 .

1.9.1 Determinación de presiones y esfuerzos método de H.A. Janssen. Los criterios que se deben tener en cuenta para el cálculo de silos metálicos son la estimación de las presiones y esfuerzos, espesor de lámina y dimensiones de tornillos. El cálculo de presiones y esfuerzos consiste en encontrar las presiones estáticas generadas por el material ubicado en los silos. De acuerdo a MOTTA Y REPISO (1982), se recomienda el método de H.A. Janssen que es uno de los más utilizados en este tipo de cálculos y permite determinar las variables de presión vertical y lateral, así como la fuerza de fricción en las paredes del silo.

Las expresiones son las siguientes:

$$\text{Presión vertical (Pv)} = \frac{W \times R}{u' \times K} \left(1 - e^{\frac{-u' \times K}{R \times h}} \right) \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

P_v = Presión vertical (Kg/m^2)

W = Densidad del material almacenado en el silo (Kg/m^3)

$R = A/U$ = Radio hidráulico medio de la sección (m)

$u' = \text{Tg } \theta$ (θ = Ángulo de rozamiento interno mínimo oscila entre 20 a 25°)

A = Área de la sección recta (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 como:

$$K = \frac{1 - \text{sen } \theta}{1 + \text{sen } \theta} \quad (\text{Ec. 28})$$

θ = Ángulo de rozamiento interno del producto, el cual para silos metálicos oscila entre 0.30 – 0.35.

$$\text{Presión horizontal (Ph)} = \frac{W \times R}{u'} \left(1 - e^{\frac{-u' \times K}{R \times h}} \right) \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

Ph = Presión horizontal (Kg/m²)

$$\text{Esfuerzos verticales a partir de Ph: } N_y = Ph \times r \quad (\text{Ec. 30})$$

r = Radio

$$\text{Esfuerzos horizontales a partir de Ph: } N_x = u' \left(\frac{Ph}{B} - A h \right) \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

$$A = \frac{W \times R}{u'} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$B = \frac{k \times u'}{R} \quad (\text{Ec. 33})$$

$$\text{Espesor de la lámina (e)} = \frac{N_x}{f's} \quad (\text{Ec. 34})$$

Según PYTEL Andrew et al. (2002), $f's$ es el 40% del valor del límite de fluencia del acero.

e = Espesor de lámina se calcula el crítico

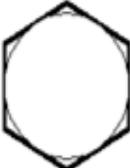
$$f's = f_s \times 0.4$$

(Ec. 35)

1.9.2 Selección de tornillos. Según la norma ASTM (2000), todos los tornillos de alta resistencia deben apretarse hasta que haya en ellos una tensión no menor que la indicada en el Cuadro 1. 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 el Cuadro 2.

Cuadro 1. 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

Cuadro 2. Resistencia de tornillos

RESISTENCIA DE DISEÑO DE REMACHES, TORNILLOS Y BARRAS ROSCADAS				
Elementos de unión	Resistencia en Tensión		Resistencia al cortante en conexiones por aplastamiento	
	Factor de resistencia F_R	Resistencia nominal, Kg/cm ²	Factor de resistencia F_R	Resistencia nominal, Kg/cm ²
Tornillos A307	0.75	3160 ¹	0.60	1900 ^{2,3}
Tornillos A325, cuando la rosca no está fuera de los planos de corte.		6330		3800 ³
Tornillos A325, cuando la rosca está fuera de los planos de corte.		6330		5060 ³
Tornillos A490, cuando la rosca no está fuera de los planos de corte.		7900		4750 ³
Tornillos A490, cuando la rosca está fuera de los planos de corte.		7900		6330 ³
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 ³
Remaches A502, grados 2 y 3, colocados en caliente		4200		3380 ³

Fuente: ASTM, 2000

La resistencia de diseño al aplastamiento entre un tornillo o remache y la pieza en que está colocado es:

$$\text{Resistencia al aplastamiento} = FRRN \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde

$$FR = 0.85 \text{ y} \quad (\text{Ec. 37})$$

$$RN = 3 \text{ dt } F_u \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde:

d = Es el diámetro del remache o tornillo

t = El grueso de la parte conectada

Fu = Su esfuerzo mínimo especificado de ruptura en tensión

Número de tornillos para las uniones: a continuación se mostrará la metodología para calcular el número de tornillos requeridos para unir las láminas que hacen parte de las paredes del silo y el número de tornillos para asegurar el piso falso.

Uniones de las láminas y de la malla:

Según MOTTA y REPIZO (1982) para las uniones se tiene:

$$P^0 = D \times e \times n \times s \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde:

P⁰ = 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 tornillo

Esfuerzo a calcular del tornillo

$$P' = \left(\frac{\pi \times D^2 \times s \times n}{4} \right) \quad (\text{Ec. 40})$$

P' = Esfuerzo a calcular del tornillo Kg

$$\text{Número de tornillos para unir las láminas: } L' = \frac{P_h \times A}{p^0} \quad (\text{Ec. 41})$$

Donde:

L' = Número de tornillos

P_h = Presión horizontal

A = Área de la lámina

P^0 = Esfuerzo de la lámina a calcular

$$\text{Número de tornillos para unir la malla: } L' = \frac{P_v \times A}{p^0} \quad (\text{Ec. 42})$$

Donde:

L' = Número de tornillos

P_v = Presión vertical

A = Área de la lámina

P^0 = Esfuerzo de la lámina a calcular

$$\text{Distancia entre tornillos: } D' = \frac{h}{L'} \quad (\text{Ec. 43})$$

Donde:

h = Altura de la lámina

L' = Número de tornillos

D' = Distancia entre tornillos

1.9.3 Predimensionamiento de vigas. De acuerdo con 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):

$$Q = \frac{W}{A} \quad (\text{Ec. 44})$$

Donde:

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

A = Área de la malla.

$$q = Q \times L_{\text{infl}} \quad (\text{Ec. 45})$$

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.

$$M_{\max} = \frac{q \times l^2}{8} \quad (\text{Ec. 46})$$

Donde:

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

l = Longitud de la viga (m)

$$\text{Momento de inercia: } I_x \geq \frac{5 \times q \times l^4}{f_{\max} \times 384 \times E} \quad (\text{Ec. 47})$$

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/cm²)

Comprobación del perfil: Para la comprobación del perfil se utiliza la comparación de flechas la admisible y la máxima obtenida de la sección, la flecha admisible para vigas de acero hasta 5m de luz es de $L/300$. Ver cuadro 3.

$$f_{adm} = L/300 \quad (\text{Ec. 48})$$

L = Longitud en mm

La flecha máxima

$$f_{max} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} \quad (\text{Ec. 49})$$

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

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

Cuadro 3. Flechas admisibles para vigas de acero

Flecha total	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

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL SILO SECADOR

2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

El sistema está compuesto por una unidad de secado (silo), un ventilador centrífugo con alabes inclinados hacia atrás y requiere de un intercambiador de calor.

El equipo fue dimensionado para satisfacer los requerimientos de secado de 2340 Kg. de café por turno de secado utilizando los intervalos de tiempo más adecuados para realizar la inversión del sentido del flujo de aire en este tipo de secador, donde se tienen 1170 Kg. de grano en secado y 1170 en presecado dependiendo de la dirección de flujo que se opere en el momento, de tal manera que se logre obtener un producto con buena uniformidad en el contenido de humedad final (dentro del rango 10 a 12% bh). Este dimensionamiento se hizo con el objetivo de hacer un uso adecuado de los materiales de construcción y de acuerdo a la producción anual de café en las fincas. Según ROA M., et al. (1999), la producción de pequeños caficultores es de hasta 6.25 ton cps/año y medianos es de 6.25 hasta 12.5 ton cps/año.

En cuanto al tiempo de secado, empleando la temperatura ideal de diseño (50 °C) se puede retirar el contenido de humedad inicial del café (50 a 55% bh) hasta llevarlo a un rango del 10 a 12% bh, en un tiempo estimado de 24 a 28 horas, garantizando la calidad del producto. Cuando la temperatura del aire de secado es inferior a la temperatura ideal, este tiempo puede incrementarse significativamente.

Para la operación de este equipo se debe cargar cada una de sus camas con la totalidad del volumen de café para el cual fueron diseñadas y durante el periodo

de secado se debe realizar inversión del flujo de aire caliente cada 4 ó 6 horas, para garantizar el secado homogéneo del grano.

A continuación se presenta mediante las Figuras 12, 13 y 14, el diseño del silo secador, con las unidades expresadas en metros:

Figura 12. Esquema vista frontal del silo secador

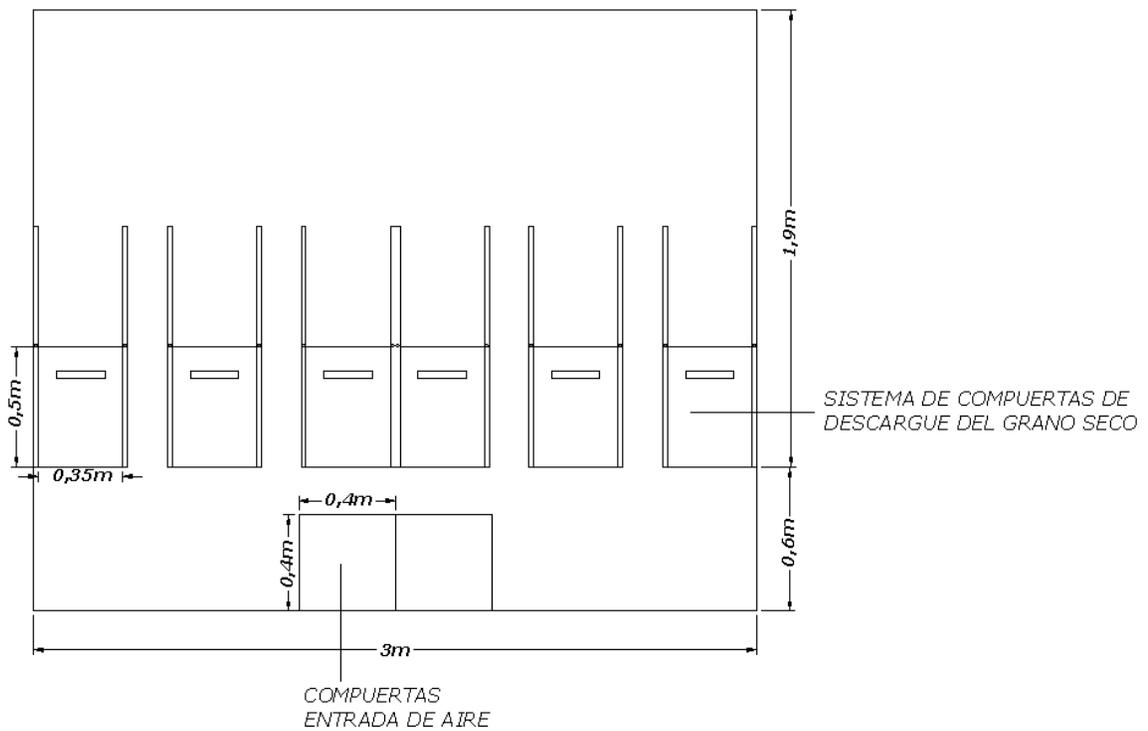


Figura 13. Esquema vista lateral del silo secador

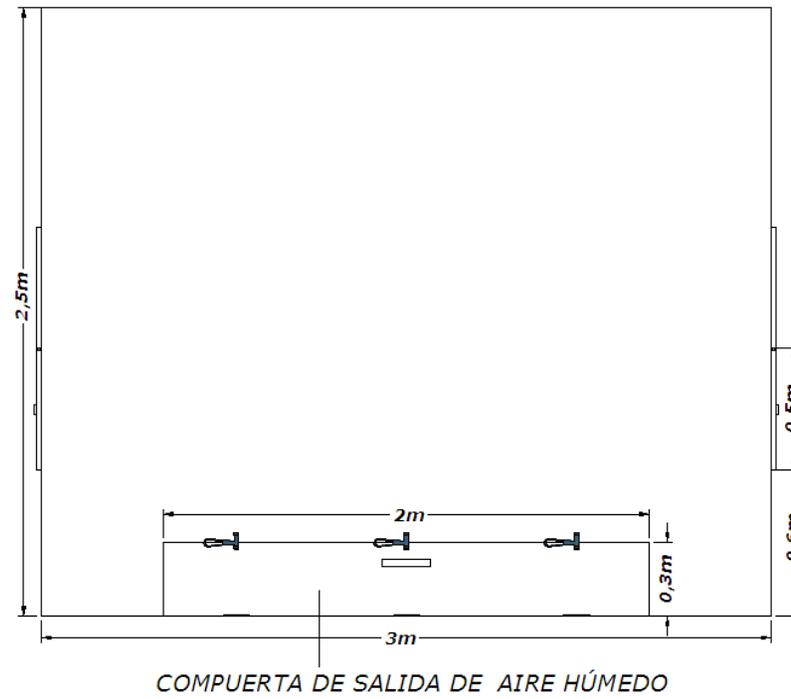
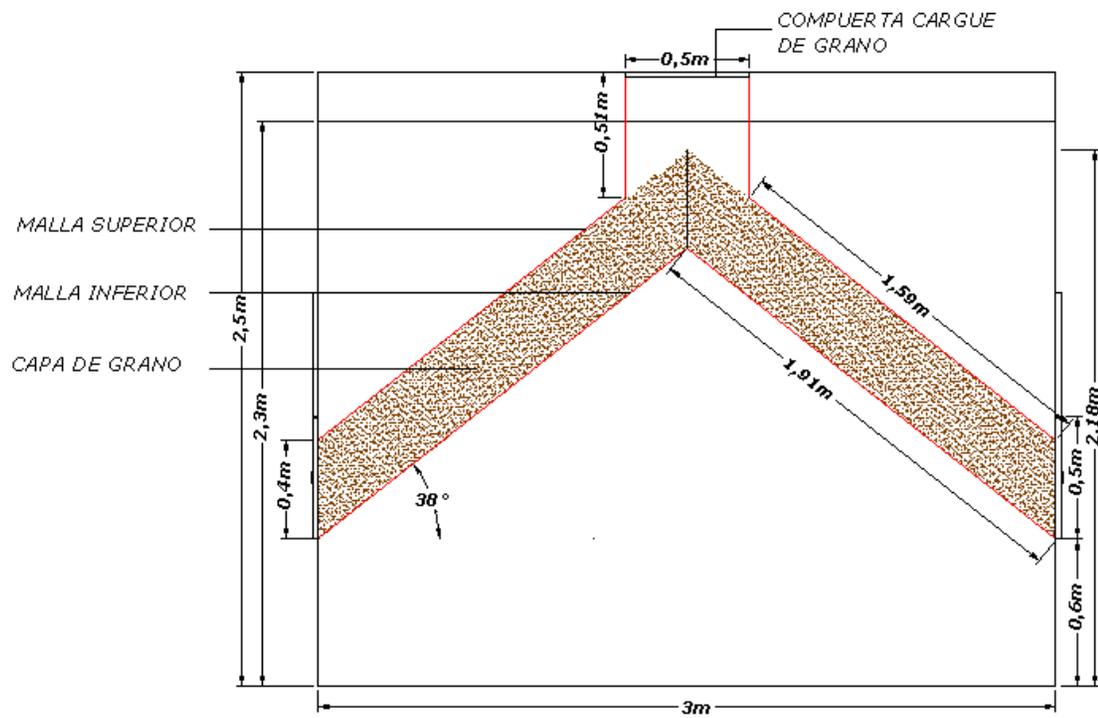


Figura 14. Esquema corte lateral del silo secador



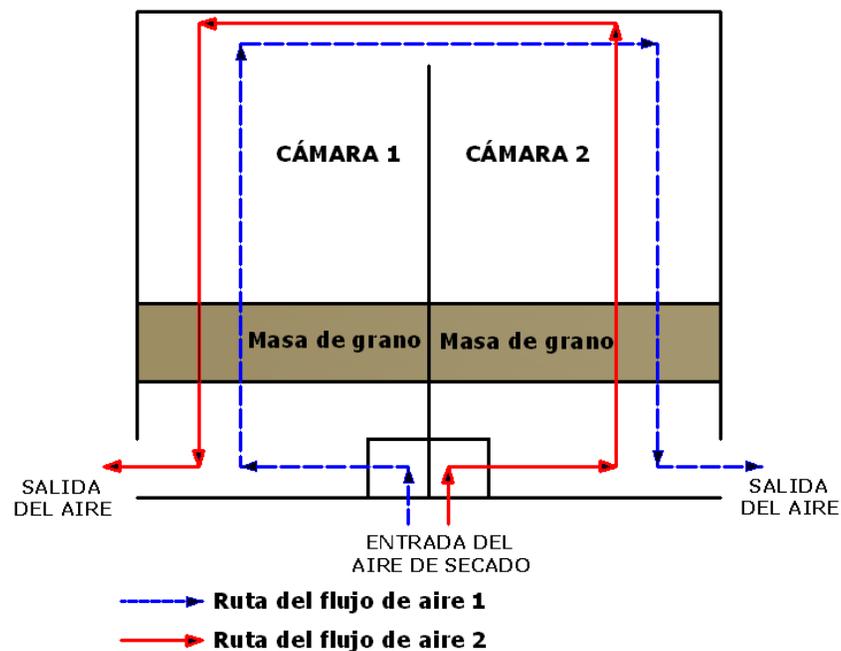
2.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO Y SU FUNCIONAMIENTO

Los materiales de construcción del silo secador son totalmente metálicos. Este consta de tres componentes fundamentales: ventilador centrífugo, intercambiador de calor y el cuerpo de secado, que consta de dos camas para grano (cada una con dos módulos), dos compuertas de distribución de aire, dos para la salida del aire húmedo y 12 para descargar el grano.

Para evitar daños en el grano, la temperatura no debe exceder los 50 °C. De igual manera el caudal del flujo de aire debe ser adecuado para el volumen de café a secar. De acuerdo a ROA M., et al. (2000), para capas estáticas el caudal recomendado es de 25 m³ por minuto por cada metro cúbico ocupado por el grano.

La Figura 15 representa el principio de funcionamiento del silo secador:

Figura 15. Esquema recorrido del flujo de aire a través del silo secador



Como se indica en la figura anterior el sentido del flujo de aire depende de la apertura o cierre de compuertas como lo representan las flechas. Esta inversión del flujo de aire durante el secado, permite lograr mayor homogeneidad en la humedad final del grano.

2.3 CAPACIDAD POTENCIAL DEL SILO SECADOR

La capacidad total del silo secador, tomando como referencia la humedad inicial en base húmeda del 50%, es de 2340 kg, que están distribuidos en dos camas de secado, con espesor de capa de 40 centímetros.

Empleando la Ec. 8, se obtuvo el peso final del grano:

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

$$W_f = 1329.55 \text{ Kg.}$$

2.4 DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES DEL SILO

Los principales componentes del silo secador son el cuerpo de secado, unidad de ventilación y unidad calorífica.

2.4.1 Cuerpo de secado.

2.4.1.1 Dimensiones del silo secador. El silo es de forma cuadrada, con dimensiones 3 x 3 en su base y altura total de 2.5 m. En la Tabla 3 se expresan todas las distancias desde la base hasta la parte superior del silo, donde se tuvo en cuenta el espesor que ocupa la capa de grano y el grado de inclinación de la misma (38°).

Tabla 3. Dimensiones del silo

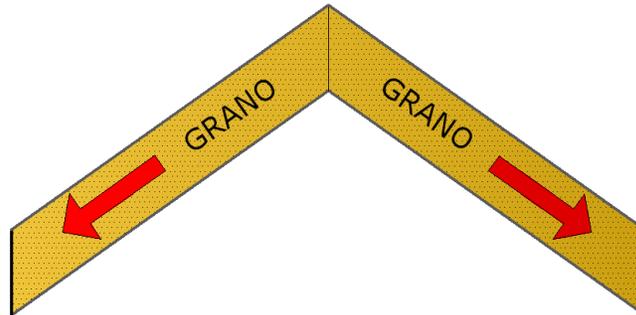
Detalle	Dimensión (m)
Largo	3.0
Ancho	3.0
Altura de la malla inferior	0,6
Altura total de la cama inclinada	2.18
Altura de la compuerta superior de paso de aire	2.3
Altura total del silo	2,5

Para hacer uso adecuado de los materiales de construcción, cada una de las secciones del silo consta de 2.5 láminas galvanizadas calibre 20 (espesor 0.90mm), con área de 3m² (3x1). Estas láminas son unidas entre sí con tornillos en acero de ¼ " distribuidos a lo ancho de la lámina espaciados cada 33 cm.

2.4.1.2 Capacidad de las camas de secado. El silo cuenta con dos camas para secado, con capacidad de 1170 Kg cada una. El esquema de la Figura 16, muestra la disposición del grano e indica el principio de extracción del mismo, aprovechando el ángulo de inclinación (38°).

El hecho de que las camas empleen un ángulo de inclinación, representa inconvenientes en el cargue, ya que el grano tiende a acumularse en los puntos inferiores, impidiendo que la distribución sea homogénea en toda la cama. Por tal razón; se ha incorporado en la parte superior de la cama una malla con mayor área perforada (Ver Figura 14), para que no aumente las pérdidas de presión, y a su vez impida que este fenómeno ocurra, garantizando que el grano este bien distribuido.

Figura 16. Disposición del grano en la cama de secado



El dimensionamiento se realizó para el módulo de una cama de secado, es decir, para un volumen de 585 Kg; teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Capacidad total = 2340Kg
- Altura de la capa de grano = 0.4m
- Densidad café húmedo lavado (ρ) = 650Kg/m³ (Tomada de ROA, et al. 1988).

Volumen del módulo:

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$v = \frac{585}{650} = 0.9m^3$$

Área del módulo:

$$A = \frac{v}{h} \quad (\text{Ec. 51})$$

$$A = \frac{0.9}{0.4} = 2.25m^2$$

Las dimensiones del módulo de secado, empleando el grado de inclinación (38°) son las siguientes:

Base = 1.91 m

Altura = 0.4 m

Profundidad = 1.5 m

Teniendo en cuenta que el área y volumen calculados fueron para un módulo, es decir, para una cuarta parte del silo. Entonces la capacidad total de diseño es para un área de 9 m² y volumen de 3.6 m³.

2.4.1.3 Cálculo de presiones sobre el piso y las paredes. De acuerdo a las Ec. 27 y 29, se encontraron las presiones ejercidas por el grano.

Presión vertical:

De acuerdo a MOTTA y REPIZO 1982, el ángulo de rozamiento para silos metálicos es $\theta = 31^\circ$.

Empleando la Ec. 28, se tiene que:

$$K = \frac{1 - \text{Sen}31^\circ}{1 + \text{Sen}31^\circ} = 0.3201$$

$$R = (9\text{m}^2)/(3\text{m} \times 4) = 0.75 \text{ m}$$

De acuerdo con MOTTA y REPIZO 1982, el ángulo de rozamiento mínimo es de 21°.

$$u' = \operatorname{Tg} 21^\circ = 0.384$$

$$P_v = \frac{650 \times 0.75}{0.384 \times 0.3201} \left(1 - e^{\frac{-0.384 \times 0.3201}{0.75 \times 0.4}} \right) = 1333.26 \text{ Kg/m}^2$$

Presión horizontal:

$$P_h = \frac{650 \times 0.75}{0.384} \left(1 - e^{\frac{-0.384 \times 0.3201}{0.75 \times 0.4}} \right) = 426.78 \text{ Kg/m}^2$$

Esfuerzos verticales a partir de Ph: Por medio de la Ec. 30, se hallaron los esfuerzos verticales, así:

$$r = \text{perímetro}/2\pi$$

$$r = 12/2\pi = 1.90\text{m}$$

$$N_y = 426.78 \times 1.90 = 810.88 \text{ Kg/m}$$

Esfuerzos horizontales a partir de Ph: Por medio de las Ec. 31, 32 y 33, se hallaron los esfuerzos horizontales, así:

$$A = \frac{650 \times 0.75}{0.384} = 1269.53 \text{ Kg/m}$$

$$B = \frac{0.3201 \times 0.384}{0.75} = 0.164/\text{m}$$

$$N_x = 0.384 \left(\frac{426.78}{0.164} - 1269.53 \times 0.4 \right) = 804.29 \text{ Kg/m}$$

2.4.1.4 Cálculo del espesor de la lámina. El espesor de la lámina se determinó a partir de la Ec. 34:

Empleando la Ec. 35, se determinó f's:

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

$$f_s = 3700 \text{ lb/pul}^2 = 2606823,4 \text{ Kg/m}^2$$

$$f's = 2606823.4 \text{ Kg/m}^2 \times 0.4 = 1042729.36 \text{ Kg/m}^2$$

Entonces:

$$e = \frac{804.29}{1042729.36} = 0.00077\text{m} = 0.77\text{mm}$$

Por lo tanto se determina que el espesor de lámina requerido para el silo es de una lámina calibre 20, la cual tiene un espesor de 0.9 mm y es el que más se aproxima al calculado, brindando mayor seguridad, ya que su espesor es superior.

2.4.1.5 Cálculo de tornillos. A continuación se presentan los cálculos que permiten determinar la cantidad de tornillos necesarios para asegurar todas las piezas del silo, incluyendo el número de tornillos para asegurar la malla.

Cálculo de tornillos para unir las láminas: para realizar la unión de las láminas, se ha seleccionado un perno de alta resistencia de ¼ de pulgada ó 0.635 cm de diámetro y resistencia de 120 kpsi ó 8454,56kg/cm². A partir de estas características es calculado el número de tornillos y su espaciamiento. De acuerdo a la (Ec. 39)

$$P^0 = 0.635\text{cm} \times 0.09\text{cm} \times 1 \times 8454,56 \text{ Kg/cm}^2 = 483.18\text{Kg}$$

Esfuerzo a calcular del tornillo. Se obtiene utilizando la Ec. 40.

$$P' = \left(\pi \times (0.635\text{cm})^2 \times 8454.56 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \times 1 \right) / 4 = 2677.49\text{Kg}$$

Número de tornillos. Utilizando la Ec. 41.

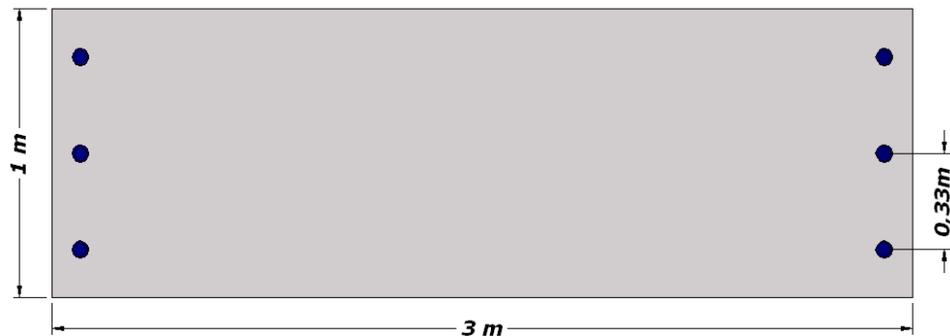
$$L' = \left(426.78 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \times 3\text{m}^2 \right) / 483.18\text{Kg} = 2.65 \approx 3 \text{ tornillos}$$

Distancia entre tornillos. Utilizando la Ec. 43

$$D' = \frac{100\text{cm}}{3} = 33.33\text{cm}$$

Para sostener la lámina seleccionada de dimensiones 3x1 se debe utilizar 3 pernos tipo 5 de alta resistencia, espaciados cada 33.33 centímetros a lo largo de los 100 centímetros de lámina, como se indica en la Figura 17.

Figura 17. Disposición de tornillos en la unión de las láminas



Cálculo de tornillos para asegurar la malla: se desarrolla empleando la misma metodología para la unión de láminas, determinando los esfuerzos de la lámina (P^0) y los esfuerzos del tornillo (P'). Del mismo modo se utiliza el tornillo de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

Entonces:

$$P^0 = 483.18\text{Kg}$$

$$P' = 2677.49\text{Kg}$$

Número de tornillos. Utilizando la Ec. 42.

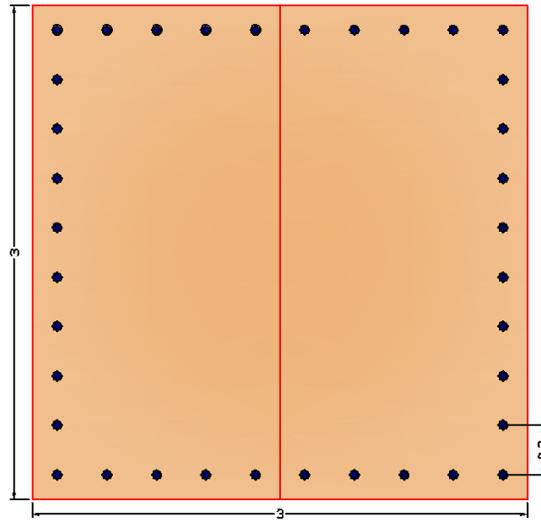
$$L' = \left(1333.26 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \times 3\text{m}^2 \right) / 483.18\text{Kg} = 8.28 \approx 9 \text{ tornillos}$$

Distancia entre tornillos. Utilizando la Ec. 43.

$$D' = \frac{300\text{Cm}}{9} = 33.33\text{Cm}$$

Para fijar la lámina perforada empleada como piso de las camas, se requieren 9 pernos de alta resistencia tipo 5, distanciados cada 33.33 centímetros a lo largo de la lámina de 3 metros. Para mejorar la distribución de estos se emplean 10 pernos espaciados cada 30 centímetros, como se indica en la Figura 18.

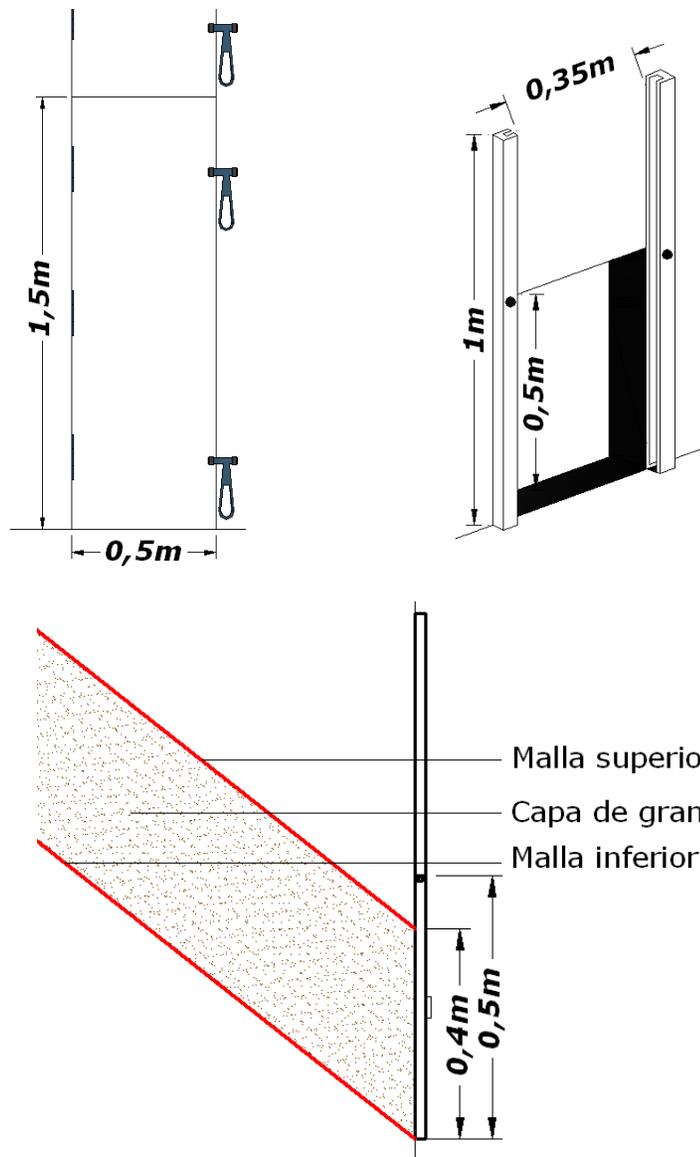
Figura 18. Disposición de tornillos para fijar la malla perforada



2.4.1.6 Puertas para carga y descargue del grano. En la parte superior del silo está la zona de carga, donde se encuentran dos (02) puertas de bisagra de dimensiones 1.5 x 0.5 metros, por medio de las cuales es ingresado el grano aprovechando la gravedad. Para llevar el grano a la zona de carga, se pueden usar elementos anexos como escaleras ó elevadores de cangilones.

Para el descargue del grano se encuentran doce (12) compuertas de dimensiones 0.35 x 0.5 metros, que permiten evacuar eficientemente el producto de los cuatro módulos directamente a empaques. Aunque el espesor de la capa de grano es de 0.4 metros, la altura de las compuertas es mayor (0.5 m), con el fin de facilitar el mantenimiento de la parte superior de la cama y retiro del materiales finos que pasen a través de la malla y se acumulen en este lugar (ver Figura 19). Todas las compuertas del silo llevan empaques para garantizar la hermeticidad e impedir escapes del flujo de aire.

Figura 19. Detalles de las puertas de carga y descarga



2.4.1.7 Cámara de secado. La cámara de secado consta de un piso de lámina troquelada galvanizada, donde reposa la masa de grano y posee una inclinación de 38° , respecto a la horizontal. Esto con el fin de aprovechar el ángulo de reposo del café facilitando su descarga.

El piso perforado es una lámina galvanizada calibre 20 (0.9 mm de espesor), de dimensiones 3 x 1 metro y perforaciones de 4 milímetros de diámetro, la cual pesa 8 kg/m².

En la parte superior de la cama está ubicada una lámina calibre 20 (0.9 mm de espesor) con dimensiones de 3 x 1 metros y perforaciones de 4 milímetros pero con mayor área abierta del 40%, la cual pesa 4.21 kg/m² y es la encargada de garantizar la homogeneidad de la capa de grano en el silo. Esta malla se encuentra soportada por perfiles cuadrados huecos de 19 milímetros de lado y 2.5 milímetros de espesor, con peso de 0.71 kg/m, espaciados en cuadrícula cada 0.5 metros; con el fin de evitar deformación de la malla por efecto del empuje del grano. Esta estructura está soportada por un ángulo con dimensiones de 25 x 25 x 2.5 milímetros, con peso de 0.95 kg/m (ver Figura 20).

El punto más bajo de la lámina perforada está ubicado a una altura de 0.6 metros respecto al piso del silo, el cual debe ser desarmable para facilitar su limpieza y mantenimiento.

La dimensión de las secciones que soportan el piso perforado y la masa de grano es de 40 x 40 x 4 milímetros y separadas a 0.5 metros en forma de cuadrícula (ver Figura 21).

Figura 20. Detalle disposición de las mallas y marco estructural de las camas de secado

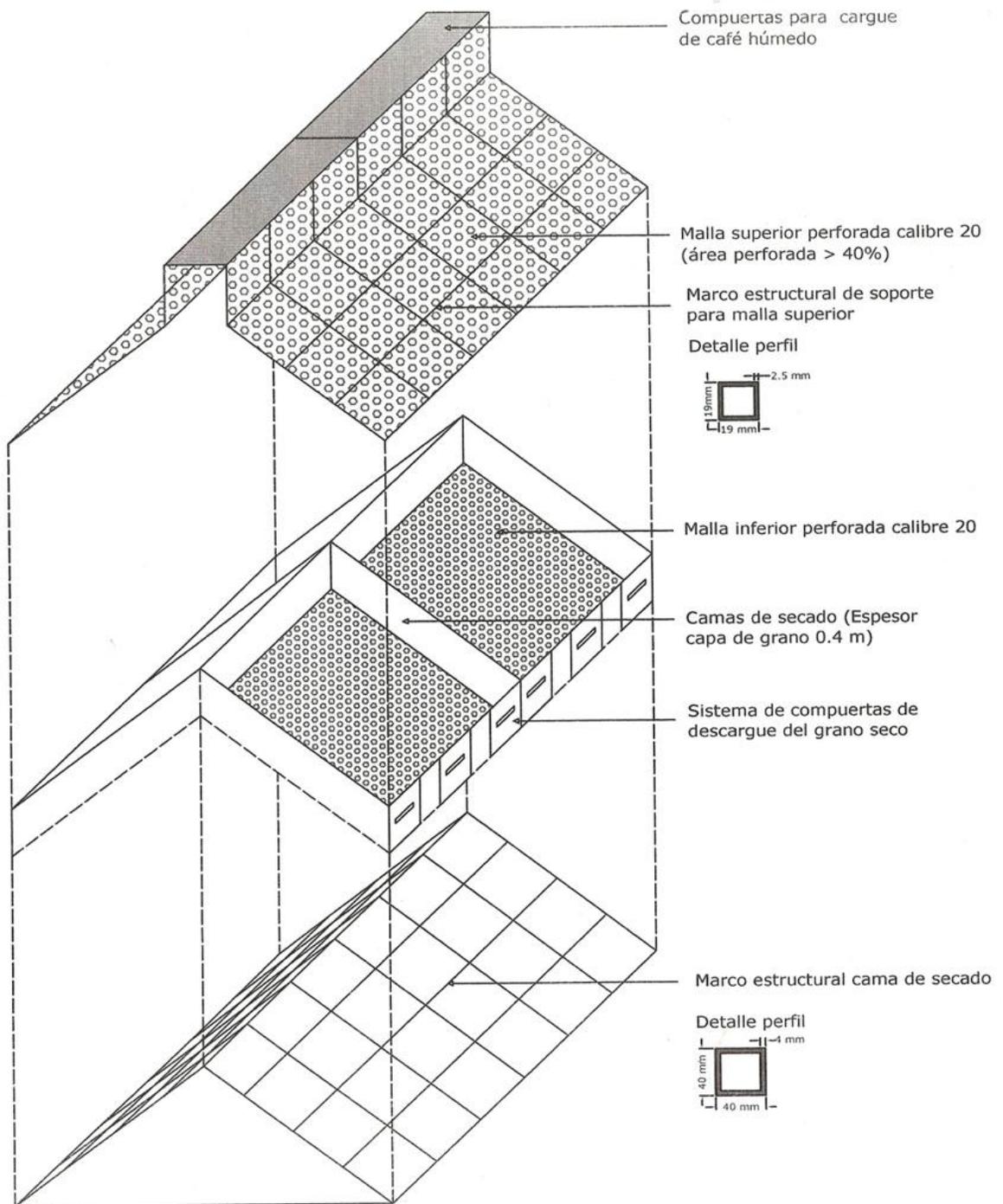
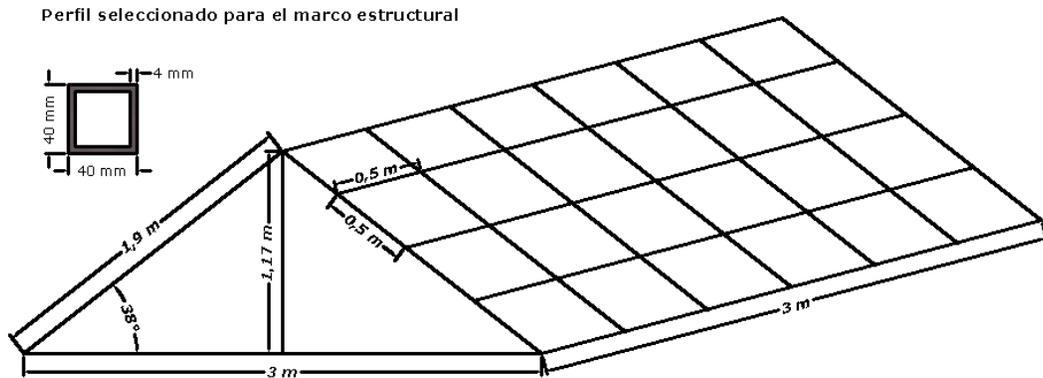


Figura 21. Detalle marco estructural camas de secado



El piso está soportado por un marco estructural, el cual a su vez descansa sobre ángulos de acero de 40 x 40 x 4 milímetros, cuya función es soportar el peso del grano y de la estructura metálica.

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

2.4.1.8 Cálculo estructural del soporte para la lámina perforada. Para el cálculo del marco estructural de soporte de la lámina perforada, se toma la viga crítica para encontrar la sección a utilizar en todos los demás soportes. Este soporte de la lámina se encuentra espaciado a 50 cm entre viguetas, con el fin de evitar la deformación crítica por efecto del peso del grano y el peso propio de toda la estructura.

Cálculo del marco de soporte para la cámara de secado: El piso de la cámara de secado presenta una elevación en el centro, por lo cual está conformado por dos secciones de 1.9 metros de ancho por 3 metros de largo (ver Figura 22). Los soportes se distribuyen en forma de cuadrícula espaciados a 50 cm. Si la carga distribuida que se encuentra sobre el soporte, la cual es igual a la sumatoria de las cargas de la estructura, que son la lámina troquelada, las cargas por producto y

cargas vivas, esta carga distribuida neta es multiplicada por un factor de seguridad del 60% obteniendo la carga distribuida (q).

$$W_{\text{producto}} = \rho \times V \quad (\text{Ec. 52})$$

Donde:

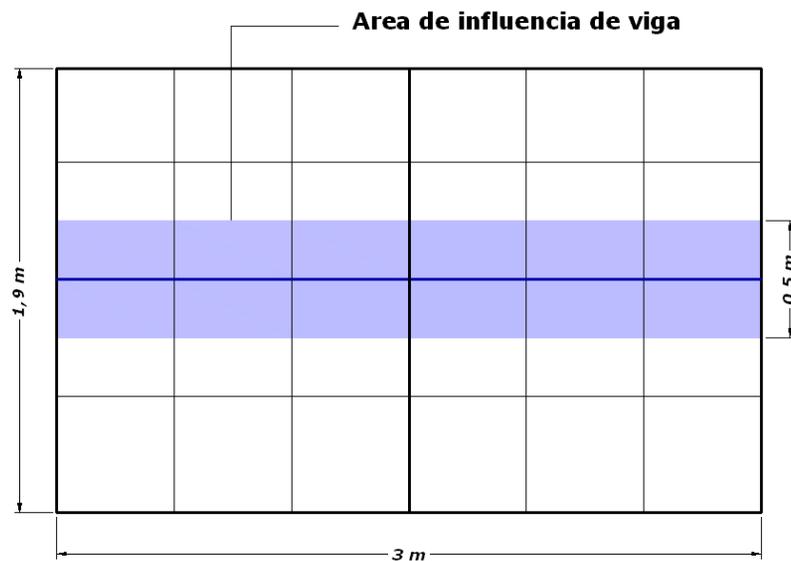
V = Volumen del grano a contener (m^3)

ρ = Densidad del café (Kg/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 $4.09 \text{ Kg}/\text{m}$.

$$W_{\text{producto}} = 650 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 3.6 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{producto}} = 2340 \text{ Kg}$$

Figura 22. Área de influencia de la viga



Determinación de las cargas:

Para determinar el peso de la estructura sólo se toma el peso de la lámina troquelada de 4mm de diámetro calibre 20 la cual soporta el peso del grano, al igual que el peso del perfil (4.09 kg/m) y de la tornillería (0.025 kg por cada tornillo)

$$W_{\text{Estructura}} = W_{\text{Lámina}} + W_{\text{Perfil}} + W_{\text{Tornillos}} \quad (\text{Ec. 53})$$

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

$$W_{\text{lámina}} = 8 \text{ Kg/m}^2 \times 2(1,9 \times 3) \text{ m}^2 = 91.2 \text{ Kg.}$$

$$W_{\text{perfil}} = 4.09 \text{ Kg/m} \times 3 \text{ m} = 12.27 \text{ Kg}$$

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

$$W_{\text{Tornillos}} = 0,025 \text{ Kg} \times 40 = 1 \text{ Kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = (91.2 + 12.27 + 1) \text{ Kg}$$

$$W_{\text{estructura}} = 104.47 \text{ Kg}$$

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

$$W_{\text{total}} = W_{\text{estructura}} + W_{\text{producto}} + W_{\text{viva}} \quad (\text{Ec. 54})$$

$$W_{\text{total}} = (104.47 + 2340 + 200) \text{ Kg}$$

$$W_{\text{total}} = 2644.47 \text{ Kg}$$

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

$$q = \frac{W_{total}}{9} \times fs \quad (Ec. 55)$$

$$fs = 1.6$$

$$q = 293.83 \text{ Kg/m} \times 1.6$$

$$q_{neta} = 470.13 \text{ Kg/m}^2$$

Para el cálculo se toma la parte más crítica de la estructura, donde se presenta mayor influencia de la carga distribuida (ver Figura 23).

Se toma la vigueta crítica la cual tiene una longitud de 1.5 m

$$Q_{viga} = q_{neta} \times L \quad (Ec. 56)$$

Donde:

q_{neta} = Carga distribuida neta

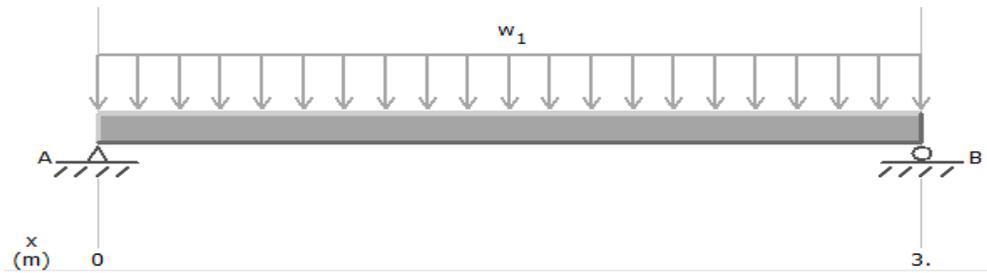
L = Influencia de la viga

Entonces la distribuida es:

$$q_{neta} = 470.13 \text{ Kg/m}^2 \times 0.5 \text{ m}$$

$$q_{neta} = 235.06 \text{ Kg/m}$$

Figura 23. Diagrama de carga distribuida a través de la viga



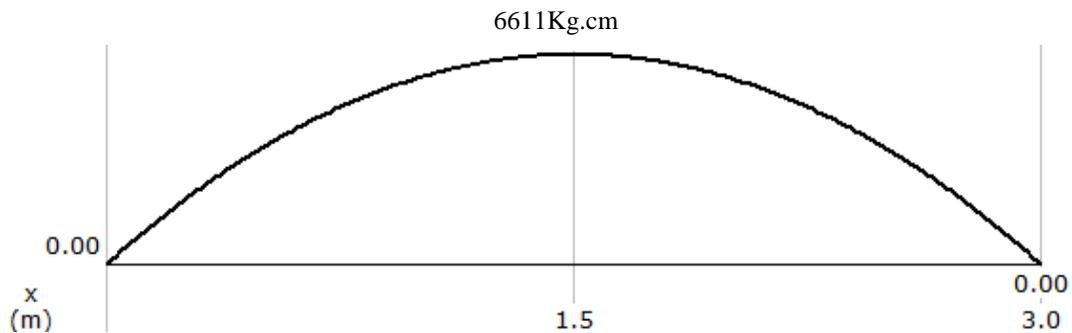
Se determina el momento máximo el cual se toma como una viga biapoyada.

$$M_{\max} = \frac{q \times l^2}{8} \quad (\text{Ec. 57})$$

$$M_{\max} = \frac{2.3506 \times 150^2}{8} = 6611 \text{Kg. cm}$$

Ese momento máximo se presenta a 1.5 m de la vigueta, como se observa en la Figura 24.

Figura 24. Diagrama de momento máximo de la viga



La flecha máxima admisible (f_{adm}): $L/300$

L = Longitud en mm

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

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

Una vez calculado el momento máximo se determina el momento de inercia mínimo mediante la Ec. 47:

Carga ponderada

$$q = 235.06/1.5$$

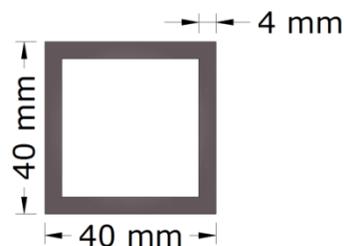
$$q = 156.7 \text{ Kg/m} = 1,567 \text{ Kg/cm}$$

Entonces:

$$I_x \geq \frac{5 \times 1.567 \times 150^4}{0.5 \times 384 \times 2,1 \times 10^6} = 9.84 \text{ cm}^4$$

De acuerdo a la inercia obtenida, se puede utilizar un perfil cuadrado de 40mm de lado y 4 mm de espesor (ver Figura 25); el cual tiene una I_x de 10.5 cm^4 mayor al requerido, dicho perfil tiene un peso de 4.09 Kg/m.

Figura 25. Sección de la viga



Fuente: DIACO (1996)

Cálculo de la flecha máxima, de acuerdo a la Ec. 49.

$$f_{\max} = \frac{5 \times 1.567 \text{Kg/cm} \times 150 \text{cm}^4}{384 \times 2,1 \times 10^6 \text{Kg/cm}^2 \times 10.5 \text{cm}^4} = 0.47 \text{cm} = 4,7 \text{mm}$$

$$f_{\max} = 4.7 \text{mm} < f_{\text{adm}} = 5 \text{ mm O.K.}$$

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

Determinación del ángulo que soporta la lámina y su estructura metálica: De acuerdo a CABRERA Y MORA (2009), 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:

$$W_{\text{(grano + lámina + vivo)}} = 2684.25 \text{ Kg}$$

$$W_{\text{marco estructural}} = 321 \text{ Kg}$$

$$W_{\text{total}} = (2684.25 + 321) \text{ Kg}$$

$$W_{\text{total}} = 3005.25 \text{ Kg}$$

Con la Ec. 44, se determina la carga soportada por la estructura

$$Q = 3005.25 \text{ Kg} / 9.0 \text{ m}^2 = 333.92 \text{ Kg/m}^2$$

Con la Ec. 45, se determina la carga distribuida

$$q = 333.92 \text{ Kg/m}^2 \times 1.5\text{m} = 500.88 \text{ Kg/m}$$

Se procede a determinar el momento máximo con la Ec. 46:

$$M_{\max} = \frac{5.0088 \times 300^2}{8} = 56349 \text{ Kg. cm}$$

Luego se determina la inercia:

$$I = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E} \quad (\text{Ec. 58})$$

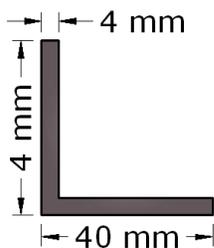
$$I = \frac{5 \times 500.88 \times 3^4}{384 \times 2,1 \text{Exp}^{10}} = 2.52 \text{ cm}^4$$

De acuerdo a este valor se ubica la inercia en catálogo y se comprueba la inercia admisible con la calculada para seleccionar el ángulo más apto:

$$I_x = 4.47 \text{ cm}^4 \text{ (tomado de catalogo de ángulos)} \geq 2.52 \text{ cm}^4 \text{ O.K.}$$

Para lo tanto es seleccionado un ángulo estructural de acero. Este perfil tiene un peso de 2.42 Kg/m (ver Figura 26).

Figura 26. Sección del ángulo



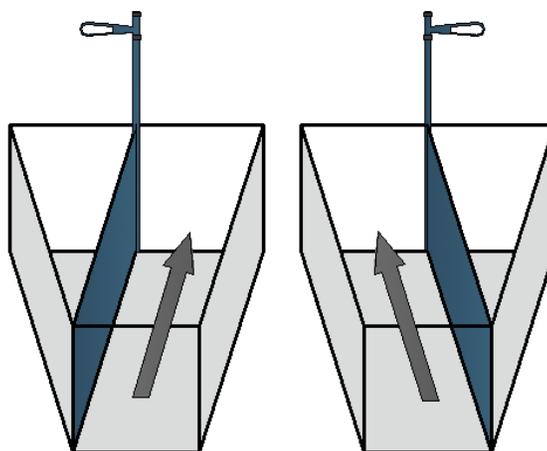
Fuente: DIACO (1996)

2.4.1.9 Compuertas de entrada y salida del aire de secado. Están ubicadas en la parte inferior del silo de la siguiente manera:

En una de las caras frontales o de descargue de grano, se encuentran ubicadas las dos compuertas para entrada del flujo de aire, su dimensión es de 0.4 x 0.4 metros cada una. El cuerpo de secado está unido al ventilador a través de una expansión gradual y un ducto de sección cuadrada y longitud de 1 metro. En el interior de la expansión gradual existe una compuerta deslizante, que permite definir el sentido del flujo de aire (ver Figura 27) y permite disminuir perdidas ya que la dirección del flujo no cambia bruscamente.

Para evacuar el aire cargado de humedad, en cada una de las caras laterales existe una compuerta de dimensión 2 x 0.3 metros. Esencialmente se busca que esta área sea superior al área de salida en el ventilador y obtener mejores condiciones de secado. Los termómetros ó termostatos se deben instalar en el punto de salida de aire del ventilador, pero evitando que estos hagan contacto con la lámina, ó también se pueden ubicar en la entrada del aire al plenum del silo.

Figura 27. Compuerta al interior de la expansión gradual



Entrada del aire de
secado al plenum

2.4.2 Procedimiento para seleccionar el ventilador. En esta fase se requiere conocer los valores de caudal necesario para el silo secador, pérdidas de presión ocasionadas por el paso del aire a través de todos los componentes del sistema y la potencia del motor para su funcionamiento.

2.4.2.1 Flujo o caudal de aire del ventilador (q).

El cálculo se realizó teniendo en cuenta la velocidad del aire de secado dentro del silo recomendada por CENICAFÉ (1988). También se calculó teniendo en cuenta el caudal recomendado por CENICAFE y mediante el número de Bushels.

a. Mediante la velocidad del aire de secado: Se obtuvo con la Ec. 21.

$$\text{Caudal}(Q) = 4.5\text{m}^2 \times 28.5\text{m}/\text{min} = 128.25\text{m}^3/\text{min}$$

$$\text{Caudal (Q)} = 128.25\text{m}^3/\text{min} \left(\frac{1\text{pie}}{0.3048\text{m}} \right)^3 = 4529.1\text{CFM}$$

b. Mediante caudal recomendado por Cenicafé: Se obtuvo con la Ec. 22.

$$\text{Caudal (Q)} = 25\text{m}^3/\text{min} \times 3.6\text{m}^3 = 90\text{m}^3/\text{min}$$

$$\text{Caudal (Q)} = 90\text{m}^3/\text{min} \times \left(\frac{1\text{pie}}{0.3048\text{m}} \right)^3 = 3178.32\text{CFM}$$

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 su eficiencia, que para ventiladores centrífugos de alabes inclinados hacia atrás es del 70%.

$$Q_{\text{Nominal del ventilador}} = \frac{3178.32 \times 100}{70} = 4540.46\text{CFM}$$

c. Mediante número de Búshels: De acuerdo al número de búshels, el caudal es calculado de acuerdo a las Ec. 23 y 24.

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

$$\text{Volumen del grano total} = \frac{2340\text{kg}}{650\text{kg/m}^3} = 3.6\text{m}^3 = 127.13\text{pie}^3$$

$$\text{N}^\circ\text{Bushels} = \frac{127.13\text{pie}^3}{1.25 \text{ bu}} = 101.71$$

$$\text{Caudal(Q)} = 31.25\text{CFM} \times 101.71 = 3178.43\text{CFM}$$

$$\text{Caudal(Q)} = \frac{3178.43 \times 100}{70} = 4540.61\text{CFM}$$

2.4.2.2 Determinación de pérdidas de presión en el sistema. Teniendo en cuenta que en el sistema se presentan pérdidas de presión estática en las cámaras, ductos, 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 determinan las 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 con las Ec. 9 y 10.

Donde:

$$a = 0.00065$$

$$b = 0.156$$

$$\text{Area infl. (Al)} = 9\text{m}^2 \times \left(\frac{1\text{pie}}{0.3048\text{m}}\right)^2 = 96.88\text{pie}^2$$

$$Q_a = \frac{4540.61\text{CFM}}{96.88\text{pie}^2} = 46.87\text{CFM}/\text{pie}^2$$

$$\Delta P \text{ grano} = \frac{0.00065 \times (46.87\text{CFM}/\text{pie}^2)^2}{\ln(1 + 0.156 \times 46.87\text{CFM}/\text{pie}^2)} = 0.69\text{pulg. ca}/\text{pie}$$

$$\Delta P \text{ grano} = 0,69\text{Pulg.ca}/\text{pie} \times 1.31232\text{pie (Capa de Grano)}$$

$$\Delta P \text{ grano} = 0,9 \text{Pulg.ca}$$

$$\Delta P \text{ Total} = \Delta P \text{ grano} + (60\% \times \Delta P \text{ grano}) \text{ (Debido a compactación del grano)}$$

$$\Delta P' \text{ Total} = 0,9\text{Pulg.ca} + (0,9\text{Pulg.ca} \times 0.6)$$

$$\Delta P' \text{ Total} = 1,44\text{Pulg.ca}$$

b. Resistencia del piso perforado al paso del aire: Según BROOKER (1975), la caída de presión a través de la lámina perforada, cuando se encuentra cubierta por grano, se puede determinar por medio de la Ec. 11.

$$\Delta P \text{ lámina} = (10^{-6}/9) \times (46.87\text{CFM}/\text{pie}^2/0.2 \times 0.4)^2 = 0.038\text{Pulg. ca}$$

c. Pérdida de presión debido al ducto: ésta pérdida se produce al pasar el caudal a través del ducto que dirige el flujo del ventilador hasta el cuerpo de secado. Se puede determinar con la Ec. 12:

Como el ducto utilizado es de sección cuadrada 0.4 x 0.4 metros, se realiza la equivalencia de las dimensiones para obtener el diámetro, de acuerdo a la Ec. 15.

$$d = 1.265 \times \sqrt[5]{\frac{(15.75 \times 15.75)^3}{(15.75 + 15.75)}} = 17.35 \text{Pulg.}$$

Diámetro = 17.35 Pulg. = 1.446 pie = 44.069 cm

Caudal = 4540.61 pie³/min

Longitud = 1 m = 3.28 pie

Se halla el área de la sección:

$$\text{Area} = \frac{\pi \times (1.446)^2}{4} = 1.642 \text{Pie}^2$$

Luego, se calcula la velocidad en el ducto:

$$\text{Velocidad} = \frac{4540.61 \text{Pie}^3/\text{min}}{1.642 \text{Pie}^2} = 2765.3 \text{Pie}/\text{min}$$

Se calcula Hv con la Ec. 13:

$$Hv = \left(\frac{2765.3}{4005} \right)^2 = 0.477 \text{Pulg. ca}$$

Número de Reynolds con la Ec. 14:

ρ = Densidad del aire = 0.07359 Lbm/Pie³ (Temperatura = 82.4 °F)

μ = Viscosidad dinámica = 1.25394 x10⁻⁵ Lbm/Pie-seg. (Temperatura = 82.4 °F)

$$NRe = \frac{0.07359 \times (2765.3/60) \times 1.446}{1.25394 \times 10^{-5}} = 391112.18$$

El flujo es turbulento

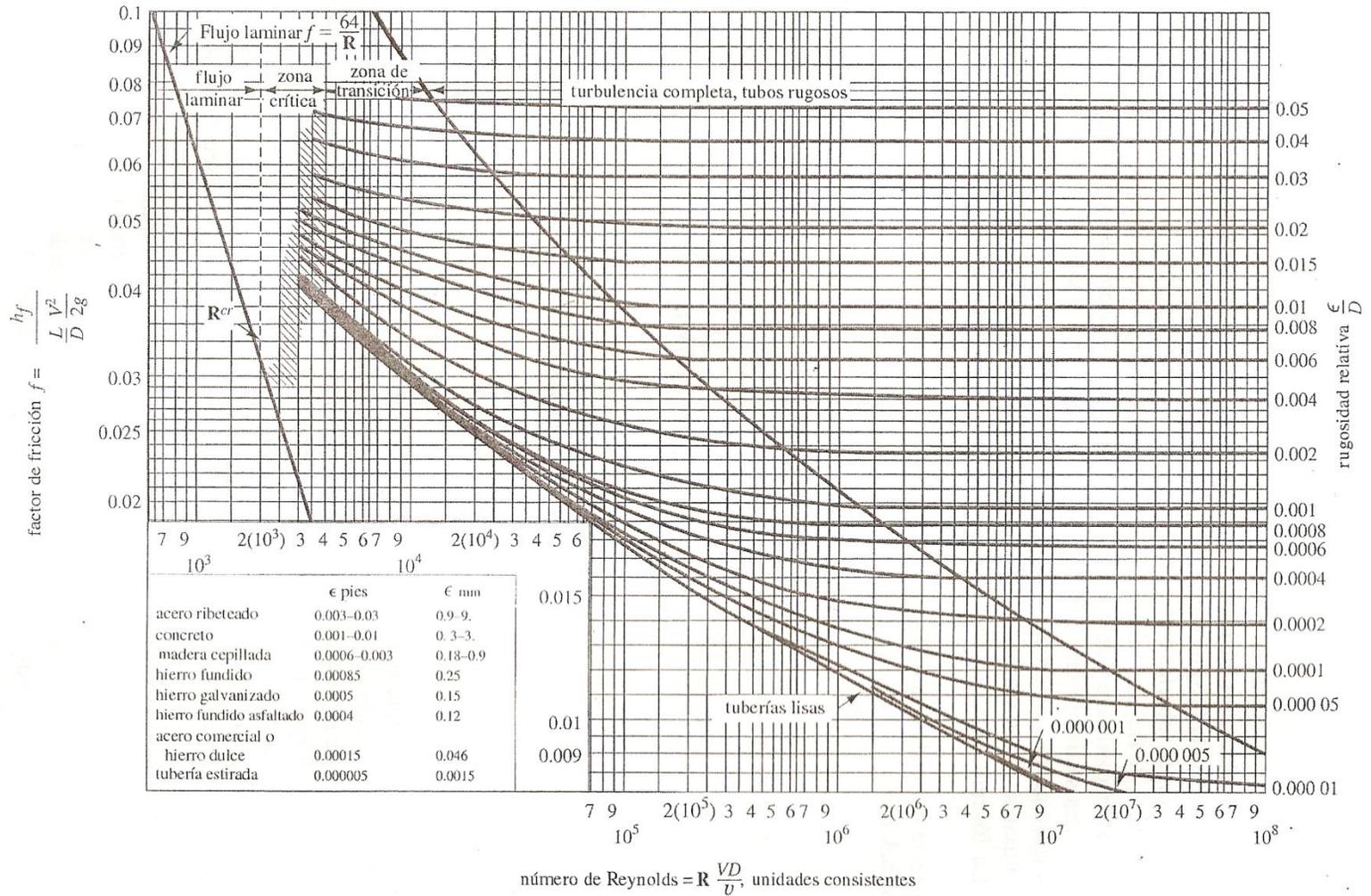
Se halla el coeficiente de rugosidad f:

Es tomado de la Figura 28. Ingresando con el NRe y la relación e/D, donde D es el diámetro (cm) y e rugosidad promedio (cm).

Donde, f= 0.017

$$\Delta P \text{ Ducto} = 0.017 \times \frac{100\text{cm}}{44.069\text{cm}} \times 0.477 = 0.0184\text{Pulg. ca}$$

Figura 28. Diagrama de Moody



Fuente: STREETER et al (2000)

d. Pérdida de presión debido a ensanchamiento abrupto: Ésta pérdida de cabeza se produce al pasar el caudal desde el ducto de menor diámetro, al plenum del silo, y se determina con la Ec. 16.

$$\text{Área del ducto} = 0.16 \text{ m}^2 = 1.72 \text{ pie}^2$$

$$\text{Área de sección del plenum} = 28.79 \text{ pie}^2$$

$$\text{Velocidad en el plenum} = \text{caudal (CFM)} / \text{Área de sección del plenum}$$

$$\text{Velocidad en el plenum} = 4540.61 \text{ CFM} / 28.79 \text{ pie}^2 = 157.71 \text{ pie/min}$$

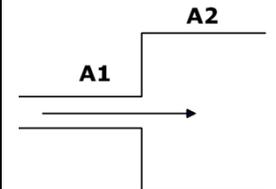
$$V_1 = (28.79 \text{ pie}^2 \times 157.71 \text{ pie/min}) / 1.72 \text{ pie}^2$$

$$V_1 = 2639.8 \text{ pie/min}$$

$$A_1 / A_2 = 1.72 \text{ pie}^2 / 28.79 \text{ pie}^2 = 0.06$$

De acuerdo a la relación A_1 / A_2 del Cuadro 4, se determina $C_1 = 0.81$

Cuadro 4. Coeficientes de pérdida para cambios de área

Tipo	Ilustración	Relación A_1/A_2	Coefficiente de pérdida C_1
Expansión abrupta		0.1	0.81
		0.2	0.64
		0.3	0.49
		0.4	0.36
		0.5	0.25
		0.6	0.16

Fuente: BROOKER (1974)

Entonces:

$$\Delta P_{\text{ens.}} = 0.81 \times \left(\frac{2639.8}{4005} \right)^2 = 0.35 \text{ Pulg. ca}$$

d. Pérdidas de presión por orificio: Según Brooker (1995), la caída de presión por orificios, se puede determinar por medio de la Ec. 13.

$$PV = (2639.8 \text{ pie/min} / 4005)^2$$

$$PV = 0.434 \text{ Pulg. ca}$$

$$\Delta P \text{ orificio} = (0.5 \times 0.434 \text{ Pulg. ca})$$

$$\Delta P \text{ orificio} = 0.22 \text{ Pulg. ca}$$

A continuación se presenta en la Tabla 4. la sumatoria de las pérdidas:

Tabla 4. Pérdidas totales en el sistema

Caudal	ΔP	ΔP_t				
(Pie³/min)	Grano(Pulg.ca)	Piso(Pulg.ca)	Ducto(Pulg.ca)	E.A(Pulg.ca)	Orif(Pulg.ca)	Estática
4540.61	1.44	0,038	0,0184	0,35	0.22	2.066

2.4.2.3 Potencia del motor del ventilador (HP). Conociendo el caudal de aire y las pérdidas totales, se calcula la potencia del motor con la Ec. 25.

Eficiencia del ventilador = 70%

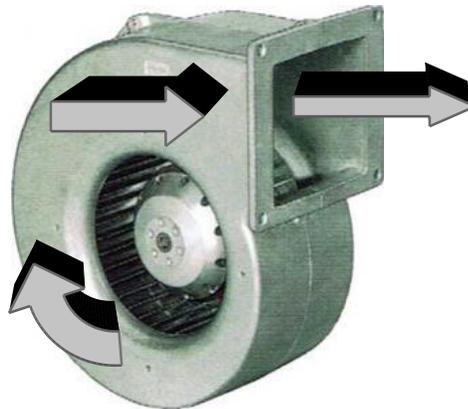
$$HP = \frac{4540.61 \text{ CFM} \times 2,066 \text{ Pulg. ca}}{6356 \times 0,70} = 2.11 \approx 2.5$$

2.4.2.4 Selección del ventilador. Conocidos los valores de caudal y cabeza estática del ventilador, es seleccionado teniendo en cuenta las especificaciones y conceptos establecidos por OROZCO (1996), para la determinación de las curvas de comportamiento de un ventilador centrífugo a partir de datos de catálogo y laboratorio.

El ventilador seleccionado 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 (ver Figura 29). Este ventilador es accionado por un motor eléctrico monofásico de 2.5 caballos de fuerza (ver Tabla 5).

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 29. Ventilador centrífugo de alabes inclinados hacia atrás

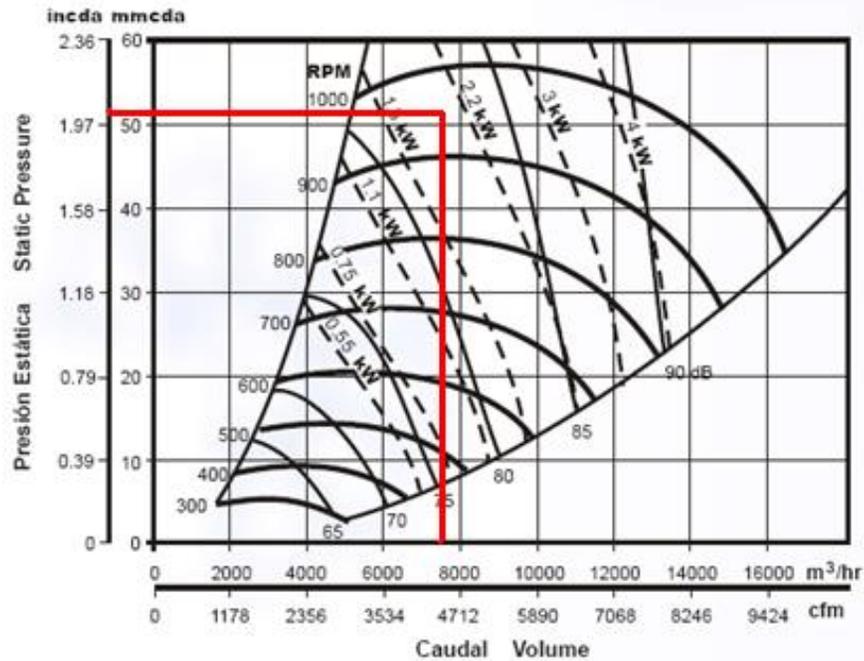


Fuente: Ventilación y representaciones industriales (2009)

En el eje de abscisas (horizontal) se ubica el caudal 4540.61 CFM y en el eje de ordenadas (vertical) la presión estática de 2.066 Pulg.ca (ver Figura 30). De esta manera se obtiene la siguiente curva característica del ventilador seleccionado.

Figura 30. Curva característica del ventilador

C/DAB 15/15



Fuente: Ventilación y representaciones industriales (2009)

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

Ventilador C/DAB 15/15 – 2.2 kW

Potencia motor: 2.2 kW

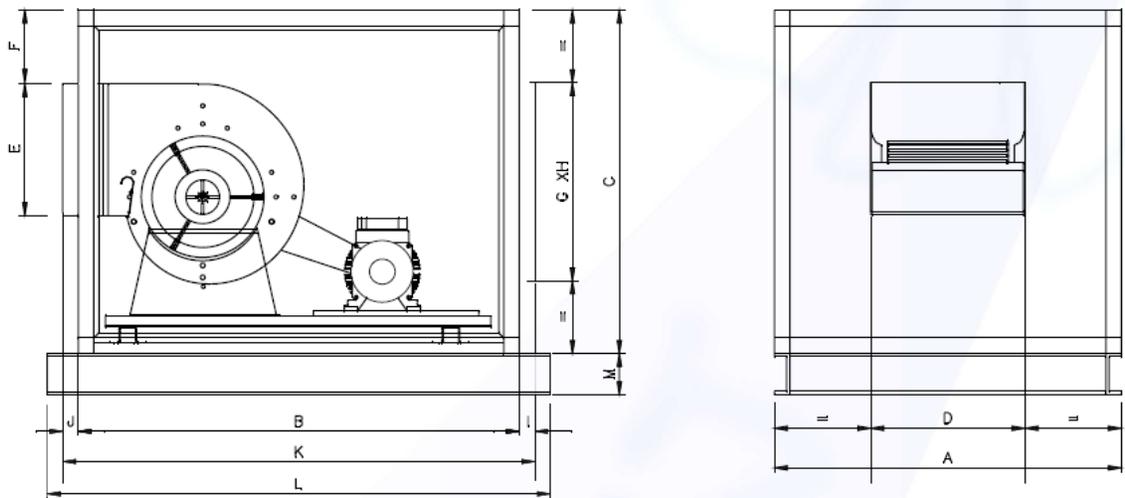
Revoluciones del ventilador: 1000 RPM

Eficiencia: 70%

Presión sonora a 1 metro: 85.0 dB

Dimensiones del ventilador: detalladamente se especifican las dimensiones del ventilador seleccionado de acuerdo a las condiciones de diseño (ver Figura 31 y Cuadro 5):

Figura 31. Dimensiones de la unidad de ventilación



Cuadro 5. Dimensiones del ventilador

VENTILADOR	DIMENSIONES (mm)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
C/DAB 15/15	950	1018	775	473	403	88	600	600	40	30	1088	1510

Fuente: Ventilación y representaciones industriales (2009)

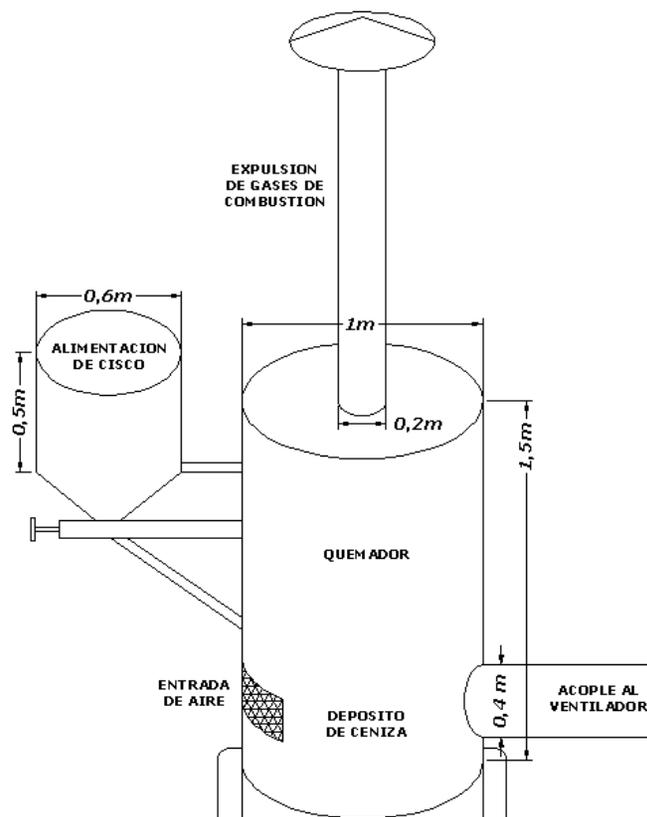
Tabla 5. Características finales del ventilador (flujo de aire y presión estática)

Espesor Max. Capa de grano (m)	Flujo de aire (m ³ /min x m ³ de grano)	Flujo total del aire (m ³ /min)	Presión estática (Pulg. ca)	Potencia del motor eléctrico (Hp)
0.4	25	128.6	2.066	2.5

2.4.2.5 Intercambiador de calor para el silo secador. Se recomienda emplear un intercambiador de calor que permita el aprovechamiento de los residuos del producto y reducir costos.

El intercambiador de calor recomendado está compuesto por dos cilindros concéntricos. En el cilindro central se realiza la combustión de la biomasa (cisco de café) y los gases de la combustión son expulsados a través de una chimenea para evitar daños en el grano, por efecto de los gases de combustión. 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 eficiencia del quemador se pueden anexar aletas en la parte externa del cilindro central. Ver Figura 32.

Figura 32. Esquema estructura del intercambiador de calor recomendado



El cilindro externo posee una rejilla que permite ingreso de aire ambiente y una boquilla de diámetro igual a la del ventilador para realizar el acople. La eficiencia se puede aumentar construyendo el cilindro externo de doble pared y cubrir externamente con un material aislante (fibra de vidrio).

La dosificación de combustible (cisco de café), se puede realizar a través de un sistema automático que se active de acuerdo al requerimiento de temperatura, por medio de un tornillo sin fin, teniendo en cuenta que se debe programar para un rango de temperaturas entre 45 - 55°C. Comercialmente se encuentran este tipo de quemadores (valor = \$1'250.000 a septiembre de 2009). Ver Figura 33.

Figura 33. Intercambiadores de calor



Fuente: Ingesecc – Ltda, 2008

2.5 CÁLCULO DEL CALOR REQUERIDO PARA EL SECADO

Los cálculos se realizan con base en la capacidad que posee el silo secador en cada una de sus cámaras (1.17 Ton). El café pergamino llega a la cámara de secado con un contenido inicial de humedad del 55% Hbh, y es necesario reducirla hasta el 12% Hbh para poder almacenarlo de forma segura, evitando daños en el grano.

Se determina el agua que se debe retirar y se calcula el peso del producto final, por cada cámara de secado.

- **Masa del agua inicial :**

$$Hbh = \frac{W_{\text{guai}}}{W_{\text{total}}} \quad (\text{Ec. 59})$$

$$W_{\text{guai}} = 0.55 \times 1170\text{Kg} = 643.5\text{Kg}$$

$$W_{\text{ms}} = (1170 - 643.5)\text{Kg} = 526.5\text{Kg}$$

- **Masa de agua final :**

$$Hbhf = \frac{W_{\text{guaf}}}{W_{\text{totalf}}} \quad (\text{Ec. 60})$$

$$0.12 = \frac{W_{\text{final}}}{W_{\text{ms}} + W_{\text{gaf}}}$$

$$W_{\text{guaf}} = 0.12 \times (526.5\text{Kg} + W_{\text{guaf}})$$

$$W_{\text{guaf}} = 63.18\text{Kg} + 0.12 \times W_{\text{guaf}}$$

$$63.18\text{Kg} = W_{\text{guaf}} - 0.12 \times W_{\text{guaf}}$$

$$63.18\text{Kg} = W_{\text{guaf}} \times (1 - 0.12)$$

$$W_{\text{guaf}} = 63.18\text{Kg} / (1 - 0.12)$$

$$W_{\text{guaf}} = 71.79\text{Kg}$$

- **Masa de agua a retirar :**

$$W_{\text{aguaretirada}} = W_{\text{aguai}} - W_{\text{aguaf}} \quad (\text{Ec. 61})$$

$$W_{\text{aguaretirada}} = 643.5\text{Kg} - 71.79\text{Kg}$$

$$W_{\text{aguaretirada}} = 571.71\text{Kg}$$

- **Masa final de producto :**

$$W_{\text{fcafé}} = W_{\text{ms}} - W_{\text{aguaf}} \quad (\text{Ec. 62})$$

$$W_{\text{fcafé}} = 1170\text{Kg} - 571.71\text{Kg}$$

$$W_{\text{fcafé}} = 598.29\text{Kg}$$

Donde, para las dos camas de secado la masa final del producto es:

$$W_{\text{total}} = 598.29 \times 2 = 1196.58 \text{ Kg cps.}$$

2.5.1 Consumo teórico de combustible. Se determina a partir de la Ec. 26.

$$Q = 128.58 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\Delta T = (50 - 26.57) \text{ }^\circ\text{C} = 23.43 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c = 17936 \text{ Kj/Kg}$$

$$\eta = 40 \%$$

$$q = \frac{128.58 \times 23.43 \times 60}{40 \times 17936} = 0.25 \text{ Kg/min}$$

Para obtener el consumo total de combustible durante todo el proceso de secado se toma un tiempo de 28 horas.

$$\text{Consumo de cisco de café} = 1680 \text{ min} \times 0.25 \text{ Kg/min}$$

$$\text{Consumo de cisco de café} = 420 \text{ Kg.}$$

3. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO A ESCALA 1:5

3.1 METODOLOGÍA DE CONTRUCCIÓN

Al realizar la conversión de las medidas de diseño a las medidas del prototipo escala 1: 5 (ver Tabla 6), se construyó el modelo con el objetivo de simular el funcionamiento y evaluar la eficiencia a partir de diferentes pruebas.

Tabla 6. Dimensiones del prototipo

Detalle	Dimensión (cm)
Largo	60
Ancho	60
Altura de la malla inferior	12
Altura total de la cama inclinada	43.6
Espesor capa de grano	8
Altura de la compuerta superior de paso de aire	46
Altura total del silo	50

El prototipo se construyó con base en los materiales y características del diseño original del silo secador. Las paredes, la base y la tapa del equipo están construidas en lámina cold roll calibre 20, soportadas en un ángulo de aluminio de 19.05 x 19.05 x 2 milímetros. En la base de la cama de secado se utilizó lámina perforada cold roll calibre 22 con perforaciones de 4 mm de diámetro, en la parte superior de la cama una malla tipo zaranda 6x6 para nivelar la capa de grano y todo el equipo esta apoyado en un ángulo de 40 x 30 x 5 milímetros.

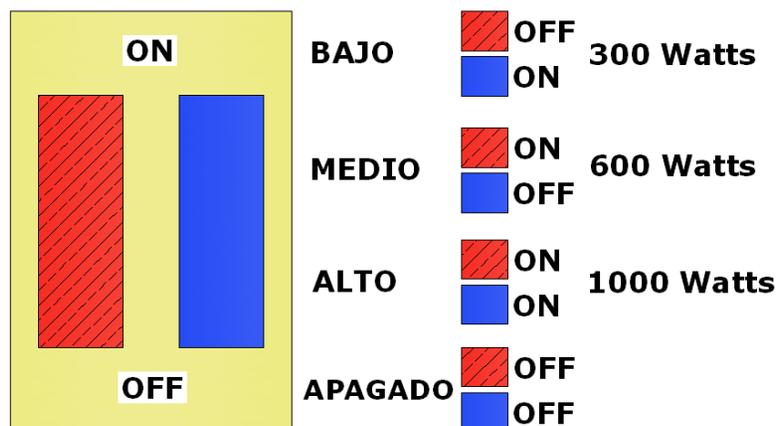
En la elaboración del prototipo se tuvieron en cuenta todos los detalles constructivos de la cámara, entre estos la inclinación de 38°, para simular la descarga del grano en la sección de secado. Las mallas están atornilladas en las esquinas, sobre un ángulo de 19.05 x 19.05 x 2 milímetros, que mejoran su rigidez y a su vez las hace desarmables.

Para simular el intercambiador de calor y el ventilador se utilizó una resistencia de 1000 Watt con la cual se obtiene la temperatura ideal de secado del café (50 °C), dicha resistencia está ubicada a continuación de los ventiladores, conectada a un interruptor para graduarla en tres niveles de calor (bajo, medio y alto), como lo muestra la Figura 34.

Para el caudal de aire se usaron dos ventiladores en serie de flujo axial de $\Phi = 4 \frac{1}{2}$ " y conexión a 110 voltios cada uno, los cuales se están ubicados al inicio del ducto. El caudal se ajustó empíricamente midiendo la velocidad del flujo de aire en la compuerta de entrada al plenum, con un anemómetro y utilizando la Ec. 21.

Las compuertas del prototipo han sido selladas herméticamente para disminuir escapes del flujo de aire y optimizar la eficiencia.

Figura 34. Interruptor para ajuste de la temperatura



3.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Para efectuar la evaluación y encontrar las condiciones de funcionamiento del silo secador se tuvieron en cuenta las características del producto a secar, del lugar donde se efectuaron las pruebas y las características del prototipo a escala 1:5 (caudal y temperatura del aire de secado).

3.2.1 Determinación de humedad inicial del café. La determinación del contenido inicial de humedad se hizo de acuerdo con la norma ISO 6673.

Se tomaron 5 muestras del producto en cantidades aproximadamente iguales y se pesaron en una balanza con sensibilidad de 0.001. Las muestras se llevaron a la estufa y sometidas a secado a temperatura constante de 105°C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo se tomó el peso de cada una de las muestras y se determinó el contenido de humedad mediante las Ec. 6 y 7. Con los datos obtenidos del secado en el horno se determinó la humedad inicial a la cual empezó el proceso de secado en el prototipo y obtener la humedad final del producto.

3.2.2 Prueba de secado en el silo secador. Se realizó la prueba en el prototipo con el fin de conocer la información sobre el secado del café y así mismo evaluar algunos parámetros que permitieron determinar la eficiencia de secado.

4. RESULTADOS

4.1 COSTO DEL EQUIPO VS. OTRAS ALTERNATIVAS

De acuerdo a un análisis de costos, se obtuvo como resultado un equipo de secado con capacidad de 1196 Kg cps con un costo aproximado de \$7`628.040, lo que indica que es relativamente económico en comparación con otros que se encuentran en el mercado como es el CE 1500-C de 750kg cps por cámara y que presenta un costo de \$12`626.000, lo que representa una diferencia significativa en el precio y en la funcionalidad del diseño. Razón por la cual se determina que la construcción de este equipo es viable para pequeños y medianos caficultores.

De igual manera la construcción del equipo se realiza totalmente en lámina cold roll calibre 20, lo que implica reducción de costos en su mantenimiento. Además es más funcional que otras alternativas como 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 y fácil de transportar; además su operación es muy sencilla y requiere de menos operarios. Al ser metálico en su totalidad permite que en el momento en que se da fin a su vida útil pueda ser desarmado para reformarlo ó reciclarlo reduciendo costos en demoliciones y contaminación del medio ambiente.

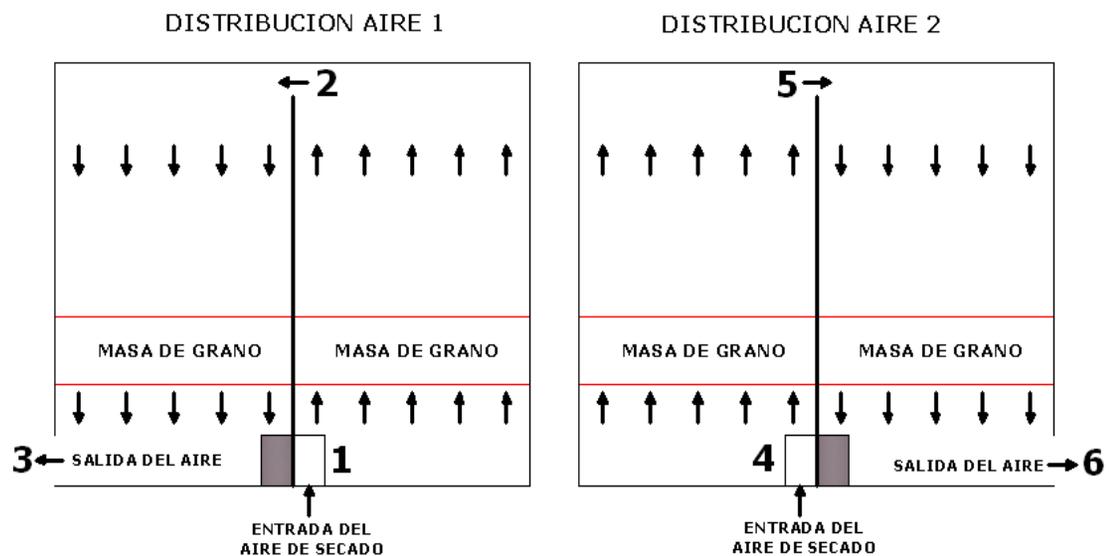
4.2 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

Una vez despulpado y retirado el mucilago del grano de café, este posee un contenido de humedad inicial de 50.61 % y tiene que llevarse hasta el 12% en base húmeda.

El sistema cuenta con dos ventiladores de flujo axial de $\Phi= 4 \frac{1}{2}$ ", conectados a 110 voltios y se encuentran ubicados en paralelo en la parte inicial del ducto de entrada del aire de secado generando $0.08\text{m}^3/\text{seg}$ de caudal. Este valor se obtuvo midiendo la velocidad en la compuerta de entrada al plenum con ayuda de un Anemómetro. Posteriormente se encuentra una resistencia de 1000 Watt con las cuales se obtiene la temperatura ideal de secado ($50\text{ }^\circ\text{C}$).

Como el principio de funcionamiento del silo secador es con inversión del sentido del flujo, existen dos distribuciones de aire para obtener uniformidad en el contenido de humedad final del grano (rehumidificación del grano sobresecado). La primera distribución se realiza a través de la compuerta de entrada 1, atraviesa la masa de grano haciendo secado y llega a 2, luego pasa hacia el siguiente modulo haciendo presecado. Posteriormente llega a 3 donde sale el aire con alto grado de humedad, en esta distribución las compuertas 4 y 6 permanecen cerradas. Luego el proceso se invierte en la distribución de aire 2, con periodos de inversión del flujo cada 4 horas (Ver Figura 35).

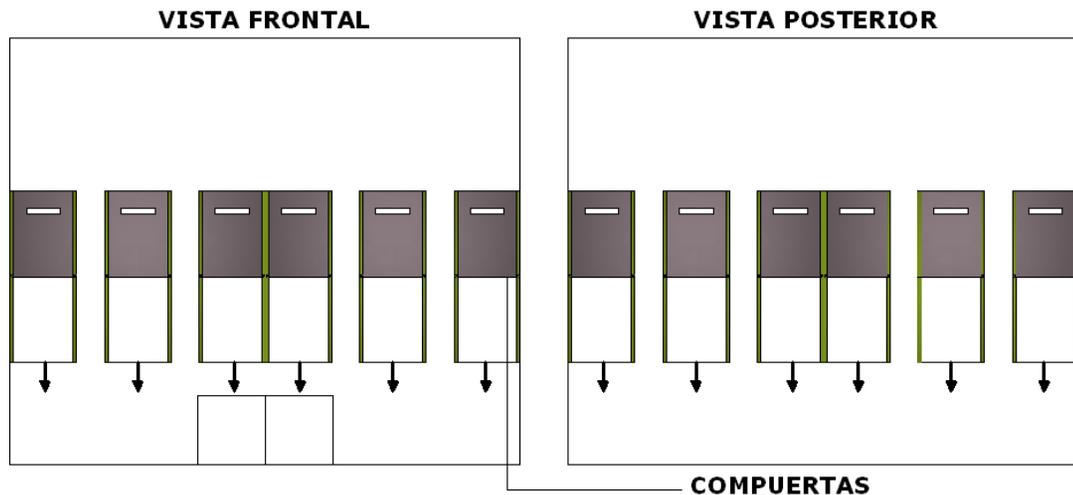
Figura 35. Esquema de distribución del aire de secado del silo secador



El cargue del prototipo silo secador se realiza manualmente, el grano se distribuye en los cuatro módulos a razón de 6.3 Kg en cada uno, para una capacidad total de 25.2 Kg y espesor de capa de 0.08 m.

El sistema de descarga es práctico debido a que tiene seis (6) compuertas por cada cara utilizando un ángulo de 38° y la fuerza de gravedad como medio de transporte del grano de cada sección de secado como se muestra en la Figura 36.

Figura 36. Esquema sistema de descargue del grano



4.3 EVALUACION EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO

Con este análisis se encuentran las condiciones de funcionamiento del silo secador para lo cual se toman como referencia las siguientes variables:

- **Datos del producto**

Contenido de humedad inicial del café: 50,61% bh

Temperatura inicial del café: 27,0°C

Contenido de humedad promedio al final del secado: 12,0% bh

Cantidad de grano a secar: 24544 gr.

- **Datos del lugar**

Altitud: 440 m.s.n.m.

Temperatura ambiente: 27°C.

Humedad relativa ambiente: 69.37%

- **Datos del sistema a escala 1:5**

Sección transversal del silo-secador: 0.36 m².

Espesor de la capa de grano en cada cámara: 0.08m

Caudal: 0.08m³/seg.

- **Datos del aire de secado**

Temperatura a la entrada: 48 ± 2 °C.

Temperatura promedio a la salida: 34.3°C.

4.3.1 Humedad inicial del café. La determinación del contenido inicial de humedad se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Determinación de Hbh y Hbs del producto

Muestra	W inicial (gr)	W final (gr.)	%Humedad B. H.	Prom. % Humedad B. H.	%Humedad B. S.	Prom. % Humedad B.S.
1	116.48	57.78	50.39	50.61	101.59	102.49
2	110.40	54.73	50.43		101.72	
3	113.15	55.90	50.60		102.41	
4	114.73	56.61	50.66		102.66	
5	110.87	54.33	51.00		104.08	

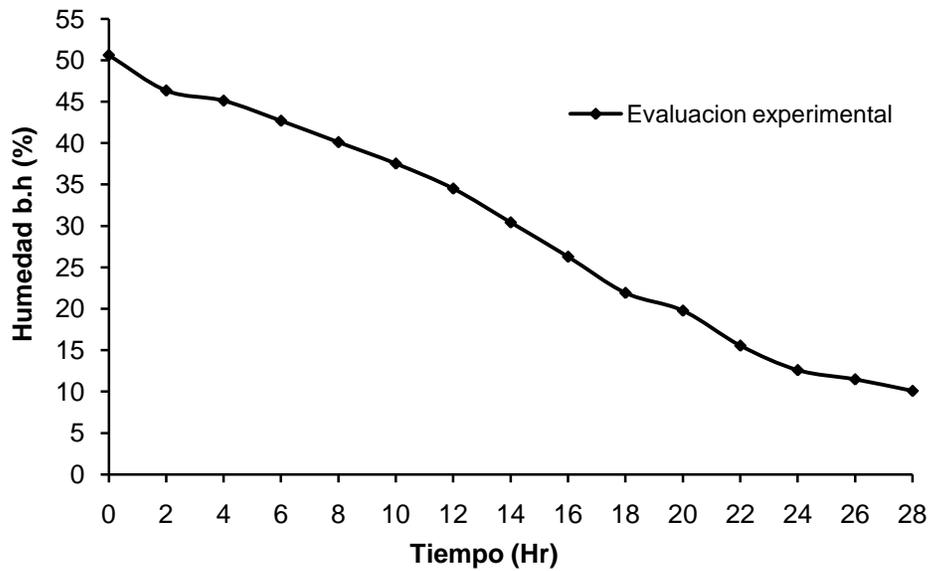
4.3.2 Proceso de secado en el prototipo silo secador. En el momento de iniciar el proceso de secado la temperatura ambiente fue de 27 °C, humedad relativa del 67 % y la temperatura de entrada al silo 45 °C. El flujo de aire se dirigió

hacia una de las cámaras por medio de la apertura o cierre de compuertas, donde la primera capa de grano (8 cm) que atravesó actuó en secado y la otra en presecado. Al invertir el sentido del flujo de aire en el otro ciclo la primera capa que inicialmente fue de secado luego estuvo en presecado. Este proceso permitió que no se presentaran diferencias significativas en el gradiente de humedad final entre el grano ubicado en el punto inferior de la cama hasta el que estuvo ubicado en la parte superior. La frecuencia de inversión del flujo de aire se efectuó en periodos de 4 horas. En el Cuadro 7 se encuentran algunas de las variables evaluadas en el proceso. La Figura 37 muestra el comportamiento de la humedad del producto durante el secado.

Cuadro 7. Comportamiento del secado en el prototipo

Tiempo (Min.)	Hora	W (gr.)	Tbs (°C) entrada	Tbs (°C) salida	Tbs ambiente (°C)	HR silo (%)	HR ambiente (%)	HUMEDAD GRANO (%)
0	0	24544	45	30	27	86	67	50.61
120	2	22588	50	35	28	47	68	46.33
240	4	22086	46	29	25	73	69	45.11
360	6	21150	46	30	25	67	76	42.68
480	8	20238	50	30	25.5	83	73	40.10
600	10	19402	45	32	26	71	75	37.52
720	12	18508	45	33	26	63	74.5	34.50
840	14	17422	50	38	25	52	75	30.42
960	16	16444	45	36.5	25	60	72	26.28
1080	18	15525	46	35	26	59	74	21.92
1200	20	15110	48	35	28	60	64	19.77
1320	22	14355	46	37	28	55	64	15.55
1440	24	13870	46	38	28	52	63	12.60
1560	26	13695	46	38	28	52	63	11.48
1680	28	13483	46	38	28	52	63	10.09
Promedio			46.67	34.3	26.57	62.13	69.37	29.67
Desv. Stand.			1.88	3.37	1.32	11.76	5.09	13.87
Varianza			1.37	1.84	1.15	3.43	2.26	3.72
CV			2.94	5.35	4.33	5.52	3.25	12.55

Figura 37. Comportamiento de la humedad durante el proceso de secado



4.3.3 Eficiencia del silo secador. Se determina por medio de la Ec. 20.

$$\text{Eficiencia} = \left(\frac{46.67 - 34.3}{46.67 - 26.57} \right) \times 100 = 61.54 \%$$

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comparación de curva de secado experimental vs. modelación matemática de secado de café pergamino

Para la modelación matemática de secado de Café pergamino se utilizó la ecuación de Roa y Macedo, con el objetivo de realizar la comparación y evaluación del secado del café en el prototipo construido (ver Figuras 38 y 39).

$$MR = (CH(t) - Che) / (Chi - Che) \quad (\text{Ec. 63})$$

$$MR = e \{ -m \times (Pvs - Pv)^n \times t^q \}$$

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

$$T = 50^{\circ}\text{C}$$

$$T = 122^{\circ}\text{F}$$

$$\text{HR} = 50\%$$

$$He = 0.10241$$

$$Pvs = 1248.48 \text{Kg/ m}^2$$

$$Pv = 0.5 \times 1248.48 \text{Kg/ m}^2 = 624.24 \text{Kg/ m}^2$$

Figura 38. Curva de secado según modelación (ecuación de Roa)

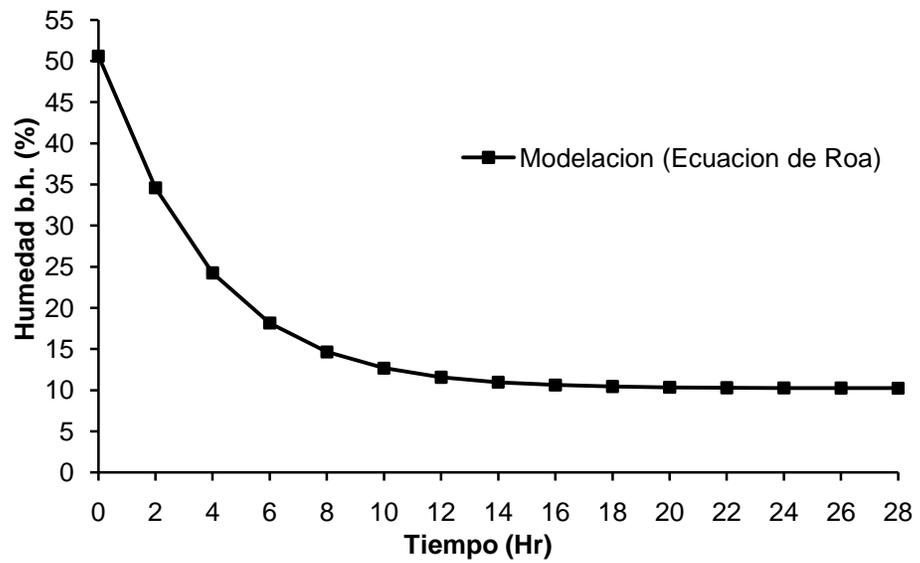
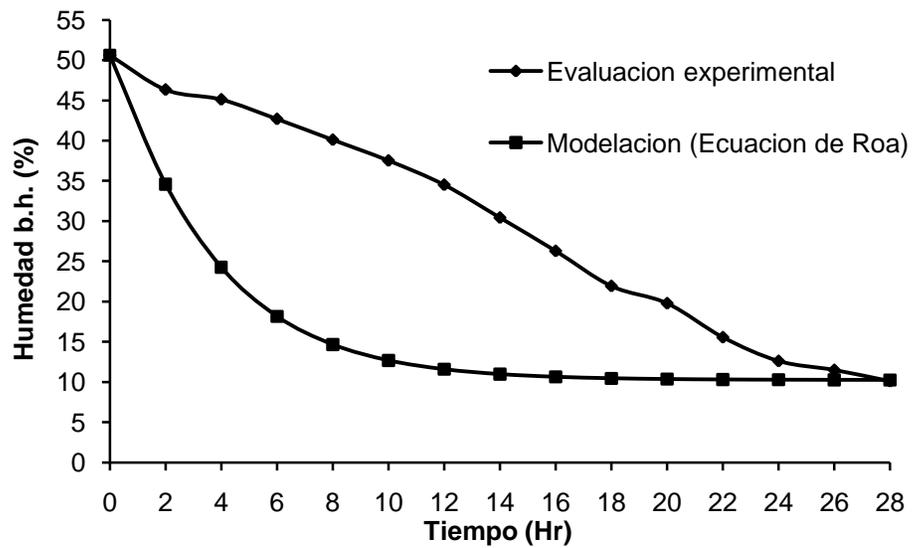


Figura 39. Comparación curva de secado experimental Vs. Modelación

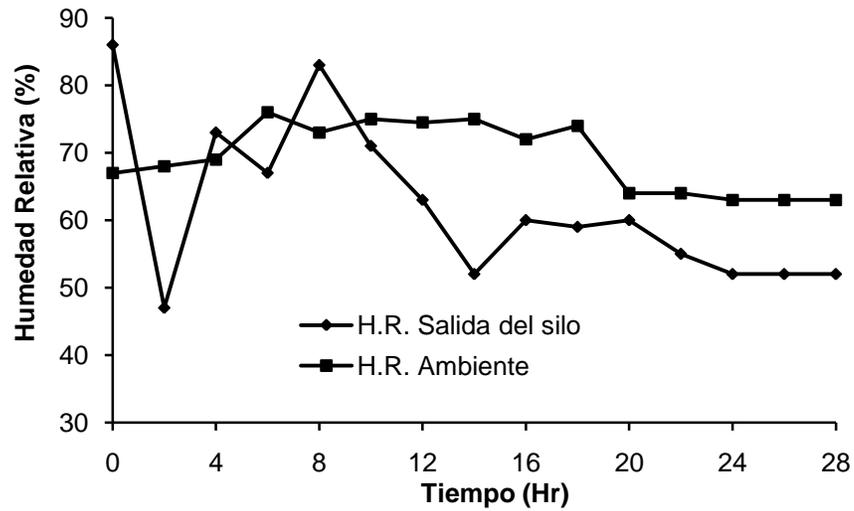


En las pruebas efectuadas en el prototipo a escala 1:5, se determinó que durante todo el proceso de secado el porcentaje de humedad removida del grano en el interior del silo se realizó lentamente, debido a que las temperaturas fueron bajas y variables (promedio de 46.67 °C) y no permitieron el retiro constante de humedad, así como ocurre a condiciones ideales (modelación).

El tiempo de secado obtenido en el ensayo fue satisfactorio, ya que se aproxima a la curva de modelación de secado de Roa, la cual predice el tiempo para las condiciones de trabajo (temperatura de 50°C y una capa de grano de 0,40m).

Al igual comparando este resultado con estudios de evaluación y modelación de CORONADO et al (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 de 23 horas en secado y 32 horas en presecado; de igual manera ROA M., et al. (2000), en el avance técnico 282 de CENICAFÉ, 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 secado total entre 20 y 24 horas con el contenido de humedad final entre el 11 y 16%.

Figura 40. Comportamiento de la humedad relativa durante el proceso



En la Figura 40 se observa que la humedad relativa fluctuó considerablemente en todo el proceso, debido a que la temperatura no fue constante presentando muchas variaciones durante toda la fase de secado. A pesar de las fluctuaciones la tendencia hasta la octava hora en el comportamiento de la humedad relativa a la salida de la cámara de presecado, fue de permanecer por encima a la humedad relativa del ambiente, debido a la gran cantidad de agua que fue retirada del grano por el paso del aire en las horas iniciales. Posteriormente la humedad a la salida del silo fue inferior a la del ambiente, debido a la menor proporción de humedad retirada del grano, frente a las condiciones de humedad del ambiente.

6. CONCLUSIONES

- Las características finales de diseño del silo secador de dos cámaras de secado con inversión de flujo, son las siguientes:

Parámetro	Valor
Capacidad volumétrica total	3.6 m ³
Capacidad másica	2.34 Ton de café húmedo
Temperatura de secado	50 °C
Espesor de capa de grano	40 cm
Caudal de aire	4540.61 CFM
Presión estática	2.066 Pulg.ca
Potencia del motor	2.5 HP
Costo a septiembre de 2009	\$7'628.040

- La malla (área perforada del 40%) ubicada en la parte superior del silo, controla la uniformidad en el espesor de capa y también facilita el cargue y acomodamiento del grano dentro del silo.
- El equipo permite realizar su transporte con facilidad, ya que se encuentra diseñado en lámina cold roll calibre 20 unidas entre sí utilizando pernos de 1 x 1/4" y ángulos de amarre perimetral de 40 x 40 x 4 mm, lo que hace que sea desarmable.

- El prototipo del silo secador construido a escala 1:5, permitió evaluar la cinética del secado del grano con los siguientes resultados: Humedad inicial (50.61%), humedad final (10.09%), temperatura promedio del aire de secado (46.67 °C), caudal ($Q= 0.08\text{m}^3/\text{seg.}$) y tiempo de secado (28 horas).
- A partir de la evaluación del prototipo silo secador, se comprobó la efectividad del sistema de descargue del grano empleando una inclinación de 38°, representando una ventaja operativa que reduce los costos al caficultor.

7. RECOMENDACIONES

- Disminuir las pérdidas de calor revistiendo el ducto de entrada del aire al silo, con un material de baja conductividad térmica.
- Programar el mantenimiento periódico de todas las partes del sistema verificando la hermeticidad del mismo.
- Para próximos trabajos de construcción y evaluación de prototipos realizar un análisis dimensional riguroso, para obtener mayor exactitud en los resultados derivados de la evaluación.

8. BIBLIOGRAFÍA

BROOKER D.B, BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL,C.W. Drying Cereal Grains. : Westport, Connecticut: The Avi publishing company, 1975. 247p.

CASTILLO NIÑO, Álvaro. Almacenamiento y secamiento de granos Ed. Bogotá, agrosintesis, 1978, 95p.

CONTRERAS V., Luz María. Aspectos teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos (En línea), 1995, <<http://www.monografias.com/trabajos15/operacion-secado/operacion-secado.shtml>>, (Consulta 22 de Agosto de 2009).

CORREA Arturo y GAUTZ Loren. Design and comparative evaluation of a three-layer coffee dryer (En línea), <http://www.hawaiicoffeeassoc.org/hca2003pdf/dryer.pdf>, (Consulta 07 de Abril de 2008).

CORONADO P., Alfonso; ROA M., Gonzalo y TASCÓN O., Carlos. Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino (En línea), <www.agriambi.com.br> (Consulta: 02 de Julio de 2009).

DE DIOS, Carlos Alberto. Secado de granos y secadoras (En línea), FAO, oficina regional para América latina, Santiago, Chile 1996, <www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S08.htm> (Consulta: 10 Septiembre de 2008).

DIACO Ltda. Manual de diseño de estructuras, Fedestructuras. Santafé de Bogotá, Junio de 1996, 121p.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Post-cosecha y Beneficio: El secado (En línea), <www.cafedecolombia.com/caficultura/secado.html>. (Consulta: 21 de abril de 2009). 30p.

GARCIMARTIN, Miguel Ángel. Edificación agroindustrial: Estructuras metálicas, ediciones Mundi-Prensa, Madrid-España, 1998, 90p.

GUTIERREZ G., Nelson y MUÑOZ B., Diego F. Diseño y construcción de una secadora de arroz. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de ingeniería, 1991. 163p.

HUEJE N., Carlos A. y MONTILLA E., Luis E. Evaluación de un silo secador de granos tipo laboratorio. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de ingeniería, 1985, 196p.

INGESEC Ltda. Equipos de secado de café. (En línea), <<http://ingesecltda.com/secado.htm>>. (Consulta: 29 de octubre de 2008).

MORA A., Fernando y CABRERA L., J. Camilo. Diseño de un secador para café (tipo silo) en el municipio de Teruel-Huila y evaluación del prototipo a escala 1:10. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de ingeniería, 2009. 147p.

MOTTA, Luis y REPIZO, Orlando. Diseño y construcción de un secador para granos. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de ingeniería, 1982. 132p.

OLIVEROS T., C.E. y ROA M., G. Coeficiente de fricción, ángulo de reposo y densidades aparentes de granos de café *Coffea arabica*, variedad Caturra. Cenicafé (Artículo revista), 1985.

OROZCO HINCAPIE, Carlos A. Determinación de las curvas de comportamiento de un ventilador centrífugo a partir de datos de catálogo y de laboratorio. En: Scientia et Technica N° 16, Pereira, Colombia: UTP. Abril de 1996, 117p.

PYTEL, Andrew y SINGER, Ferdinand L. Resistencia de materiales, Edimac S.A. México D.F, 2002, 584p.

ROA M., Gonzalo, et al. Beneficio ecológico del café. Primera edición. CENICAFE, Chinchiná, 1999. 300p.

ROA M., Gonzalo, et al. Secado mecánico del café, CENICAFE, avance técnico 282, Chinchiná, Diciembre de 2000. 8p.

ROA M., Gonzalo, et al. Tecnología del cultivo del Café: Secado mecánico del café, CENICAFE, Manizales- caldas, Enero de 1988, Segunda Edición. p 311-340. 404p.

RUIZ MUÑOZ, Silvio Antonio. Diseño de una Planta de Secado de Café y Evaluación del Sistema de Guardiola. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de ingeniería, 1998. 99 p.

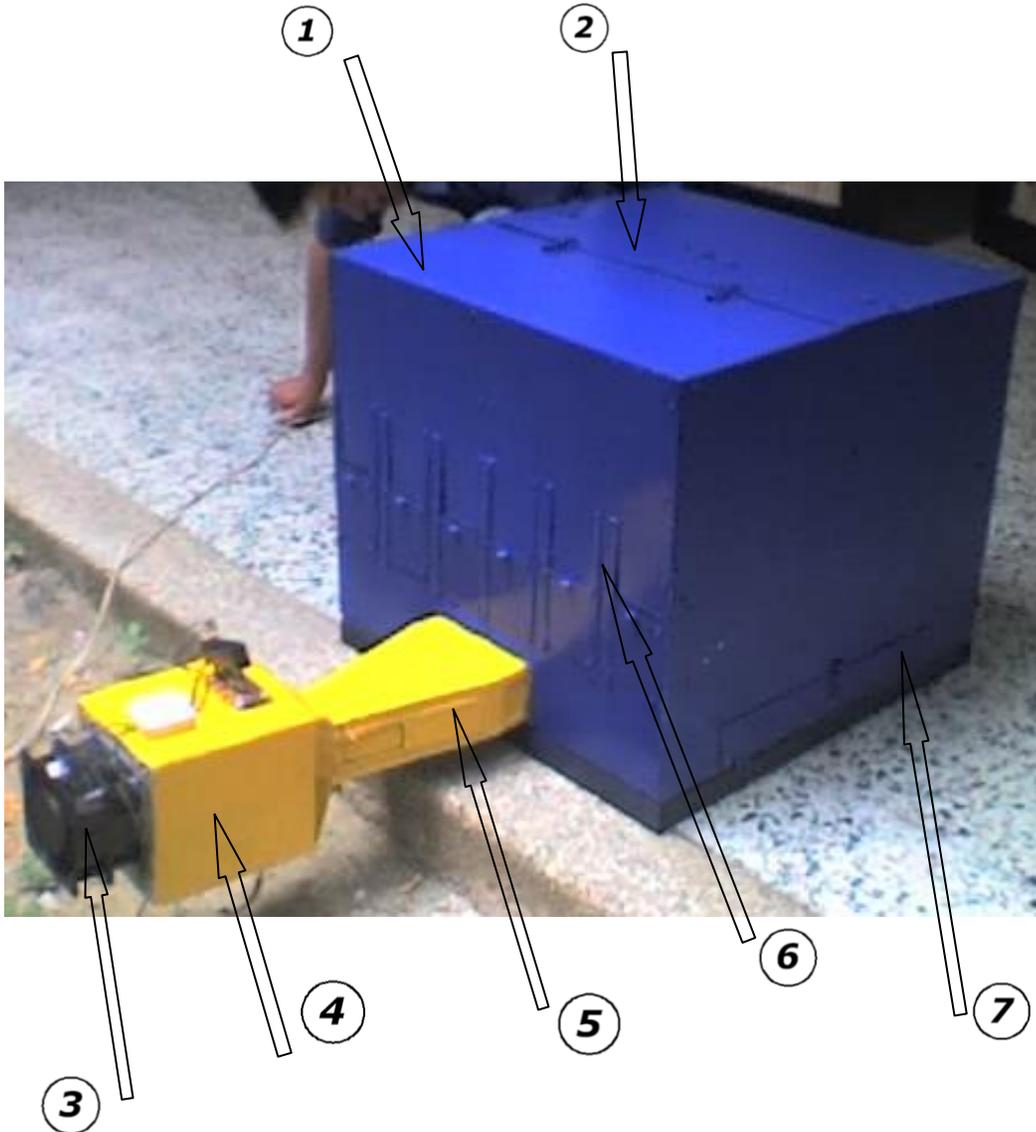
SOLANO OSORIO, Jair Fernando. Diseño, construcción y evaluación de un secador desarmable con destino a pequeños y medianos caficultores. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de ingeniería, 2002. 81p.

STREETER L., Victor; WYLIE E., Benjamin y BEDFORD W., Keith, Mecánica de fluidos, Mcgraw-Hill Interamericana, Santafé de Bogotá 2000, p 293. 740 p.

VENTILACION Y REPRESENTACIONES INDUSTRIALES (En línea),
<http://www.vriventilacion.com/industrial/pdf/simp_dob_corel/MODC_DAB.pdf>,
(Consulta 23 de agosto de 2009).

ANEXOS

ANEXO A. Vista frontal del prototipo silo secador

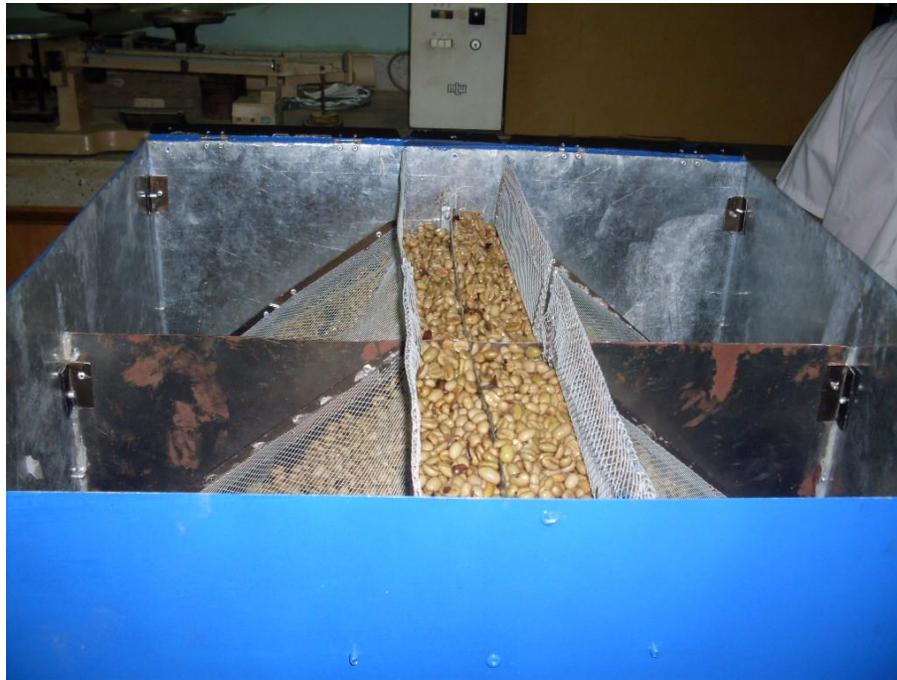


1. Cuerpo del silo secador
2. Compuerta de cargue del grano húmedo
3. Sistema de ventilación (\varnothing 4 ½ " conexión a 110 V)
4. Fuente de calor (resistencia eléctrica de \varnothing 6" y 120 V)
5. Ducto de entrada de Aire
6. Compuerta de descargue del grano seco
7. Compuerta de salida de aire húmedo

ANEXO B. Vista lateral y posterior del silo secador



ANEXO C. Vista lateral del silo secador cargado con grano húmedo



ANEXO D. Vista en planta del silo secador



ANEXO E. Apertura de compuertas de descarga del silo secador



ANEXO F. Descripción presupuesto del silo secador a Septiembre de 2009

PRESUPUESTO SILO SECADOR				
ITEM	UNID	CANT.	Vr. UNIT (\$)	Vr. TOTAL (\$)
Lámina galvanizada calibre 20	m ²	66	19,000	1,254,000
Lámina troquelada calibre 20 Ø orificio 4mm	m ²	12	32,500	390,000
Lámina troquelada calibre 20 Ø orif. 4mm A. troq.40%	m ²	13	31,500	409,500
Perfil cuadrado acero 40 x 40 x 4 mm	m	94	2,900	272,600
Ángulo estructural 40 x 40 x 4 mm	m	56	3,850	215,600
Tornillo acero alta resistencia 1/4 x 1"	Doc.	45	5,400	243,000
Ventilador centrífugo C/DAB 15/15	-	1	1,300,000	1,300,000
Motor monofásico 2.5 HP	-	1	950,000	950,000
Bisagra	Pares	12	6,000	72,000
Intercambiador de calor	-	1	1,250,000	1,250,000
TOTAL PARCIAL				\$ 6,356,700
Administración (20%)				\$ 1,271,340
TOTAL				\$ 7,628,040

ANEXO G. Plano1. Silo Secador

ANEXO H. Plano 2. Silo Secador