



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño de Secadora de Granos de Cacao de Tipo Discontinua
Transversal”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la Obtención de Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado Por:

Christopher Eduardo León Ramos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2015

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres y a todas las personas que de manera directa o indirecta ayudaron a la realización de este trabajo y de mi trayectoria estudiantil.

DEDICATORIA

Este trabajo realizado con esfuerzo, está dedicado a todos y cada una de las personas que me ayudaron en la realización de la misma.

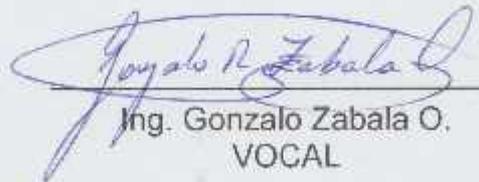
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jorge Duque R.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Manuel Helguero G.
DIRECTOR DE TFG



Ing. Gonzalo Zabala O.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Christopher León Ramos

RESUMEN

Las empresas dedicadas a la exportación de cacao se encuentran realizando mejoras al proceso de secado, optimizando el espacio para secar el producto.

Este producto tomó como referencia las secadoras rectangulares existentes en la planta; implementando un diseño cuadrado con una pendiente en el área de carga. Se realizaron estas modificaciones para poder maximizar el área de secado y aumentar la capacidad de secado.

Se consultó detenidamente el material de apoyo, basándose en principios físicos que intervienen en el proceso de secado. El procedimiento está dividido en un cierto número de pasos que pueden ser comprimidos o cambiados en función de la experiencia del diseñador o las necesidades del cliente. Los datos de entrada de diseño fueron complementados por la información recopilada de las experiencias de los trabajadores sobre el proceso de secado.

Este trabajo fue utilizado para el diseño de una planta procesadora de granos de cacao con secadoras de tipo discontinua transversal.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ABREVIATURAS.....	v
SIMBOLOGÍA.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 Concepto de secado.....	3
1.2 Proceso de secado.....	4
1.3 Condiciones de secado.....	6
1.4 Clasificación de las operaciones de secado.....	7
CAPÍTULO 2	
2. CÁLCULOS DE DIMENSIONES DE SECADORA.....	8
2.1 Cálculos para el dimensionamiento de área.....	8
2.2 Cálculos para el dimensionamiento de cuerpo.....	16

CAPÍTULO 3

3. CÁLCULOS DE DISEÑO DE SECADORA.....	21
3.1 Cálculo de la capacidad del ventilador.....	21
3.1.1 Cálculo del área interfacial.....	21
3.1.2 Cálculo del volumen del grano.....	24
3.1.3 Cálculo de la caída de presión.....	27
3.2 Cálculo de la energía térmica de secado.....	31
3.3 Simulación de flujo.....	39

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO EXTERIOR DEL SECADOR.....	45
-------------------------------------	----

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
--	----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

cm:	Centímetros, unidad de longitud.
cm ² :	Centímetros cuadrados, unidad de área.
cm ³ :	Centímetros cúbicos, unidad de volumen.
°C:	Grados centígrados, unidad de temperatura.
hrs:	Horas, unidad de tiempo.
J/kg- °K:	Joule sobre kilogramos-grados kelvin, unidad de calor específico.
kg:	Kilogramos, unidad de masa.
Kg/s:	Kilogramos sobre segundos, unidad de flujo másico.
Kg/m ³ :	kilogramos sobre metros cúbicos, unidad de densidad.
Kg/m-min:	Kilogramos sobre metros-minutos, unidad de eficiencia.
KJ/kg:	kilojoules sobre kilogramos unidad de calor latente de Evaporización.
°K:	Grados Kelvin, unidad de temperatura.
m:	Metros, unidad de longitud.
m ² :	Metros cuadrados, unidad de área.
m/s:	Metros sobre segundos, unidad de velocidad.
m ³ /s:	Metros cúbicos sobre segundo, unidad de caudal.
qq:	Quintales, unidad de masa.
Watt:	Watts unidad de calor.
Watt/m ² - °C:	Watts sobre metros cuadrados y grados centígrados, unidad de Coeficiente convectivo de transferencia de calor.

SIMBOLOGÍAS

V _c :	Volumen de cama compacta.
h:	Espesor o altura de secado.
V _s :	Volumen de sólido.
E:	Fracción de vacío.
ρ :	Densidad del cacao.
%:	Razón de tiempo, medido en porcentaje.
a:	Altura vista frontal.
b:	Ancho vista frontal.
c:	Distancia de hipotenusa de inclinación vista lateral.
d:	Ancho vista lateral.
e:	Altura vista lateral.
f:	Distancia del centro del boquete del ventilador hacia la pared.
g:	Altura del boquete.
h:	Ancho del boquete.
α :	Ángulo de inclinación.
D:	Distancia mayor de elipse.
d':	Distancia menor de elipse.
π :	Perímetro de elipse, aproximación.
S _p :	Área interfacial.
V _p :	Volumen del grano.
Re:	Número de Reynolds.
rh:	Radio hidráulico.
v':	Velocidad.
μ _d :	Viscosidad dinámica del fluido.
a':	Superficie mojada.
a _v :	Superficie específica.
D _p :	Diámetro de la partícula.
∂P :	Caída de presión.
Q:	Caudal.
E ₁ :	Energía que entra al volumen de control.
E ₂ :	Energía que sale del volumen de control.
E _{at} :	Energía almacenada en el volumen de control.
E _g :	Energía generada en el volumen de control.
h _o :	Coeficiente convectivo de transferencia de calor.
A:	Superficie de transferencia de calor entre el secador y el Ambiente.
A _c :	Área de carga de secado.
q:	Calor q sale a través de las paredes del secador.

SIMBOLOGÍAS

\dot{m} :	Flujo másico de aire.
C_p :	Calor específico del aire.
T_1 :	Temperatura del aire a la entrada del volumen de control.
T_2 :	Temperatura del aire a la salida del volumen de control.
T_w :	Temperatura de la pared del secador.
N :	Rapidez de secado.
L_v :	Calor latente de evaporización.
Gr_f :	Número de Grashoff.
Pr_d :	Número de Prandtl.

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág
Figura 1.1	Proceso de secado.....	4
Figura 1.2	Reducción de humedad.....	5
Figura 1.3	Rapidez de secado en fases.....	5
Figura 1.4	Rapidez de secado vs. Tiempo.....	6
Figura 1.5	Clasificación de las operaciones de secado.....	7
Figura 2.1	Comparación de alturas de secado.....	14
Figura 2.2	Vista lateral del plenum de la secadora.....	17
Figura 2.3	Vista frontal del plenum de la secadora.....	17
Figura 2.4	Dimensiones del plenum de la secadora.....	19
Figura 3.1	Dimensiones de elipse.....	22
Figura 3.2	Medidas aproximadas de granos de cacao sobre una hoja milimetrada.....	22
Figura 3.3	Vista superior de granos de cacao y aproximaciones.....	23
Figura 3.4	Presión estática vs flujo de aire.....	30
Figura 3.5	Volumen de control alrededor de la secadora.....	31
Figura 3.6	Rapidez de secado experimental y valores de eficiencia.....	37
Figura 3.7	Selección del tipo de flujo.....	40
Figura 3.8	Ingreso de valores de presión y temperatura. Sentido de flujo y restricciones del modelo.....	41
Figura 3.9	Ingreso de valor de flujo.....	42
Figura 3.10	Distribución de flujo visualización.....	43
Figura 4.1	Diseño exterior del secador vista frontal.....	45
Figura 4.2	Diseño exterior del secador vista lateral.....	46
Figura 4.3	Proceso de diseño de secadora.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tabla de densidades de granos de cacao dependiendo del estado.....	11
Tabla 2 Valores experimentales del estudio de referencia.....	13
Tabla 3 Valores de dimensionamiento de la secadora.....	18
Tabla 4 Valores de caída de presión en base a la figura 3.4.....	29
Tabla 5 Resultado de diseño-capacidades.....	44

INTRODUCCIÓN

Los lotes de las cosechas de granos de cacao son receptados en el centro de acopio con una humedad entre el 50% y el 60% (se establece este rango debido a los diferentes tipos de cosecha y a los diferentes procesos de fermentación de los proveedores). La reducción de humedad debe de estar en el rango del 12% hasta el 7% de humedad, para que el lote sea aprobado para la exportación.

Se opta por elegir una forma cuadrada de secadora a diferencia de la forma rectangular que se encontraba en planta. Para alcanzar las cantidades de producto procesadas, se implementó una inclinación en el área de plataforma de la secadora.

Los estudios encontrados sobre este tema indican modelos de experimentación para geometrías similares, más no se encontró modelos con variaciones de inclinaciones, por lo cual se utiliza los utilitarios de dibujo y simulación para inferir un resultado óptimo con el objetivo de minimizar errores y demostrar que esta variación es válida.

Se evalúan las diferentes condiciones de diseño como: distribución total de flujo de aire para el secado, altura máxima de producto, volumen de carga, área de secado, cantidad de energía necesaria para el secado. Con estas

condiciones, debidamente establecidas por términos técnicos de ingeniería se respalda el diseño.

Exponer un diseño inclinado de secadora para aprovechar el espacio para secar, fue una de las principales condiciones para realizar este proyecto.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Concepto de Secado

El secado es definido como la reducción de humedad en un sólido.

Para el secado es necesario utilizar aire seco, para este objetivo se eleva la temperatura a través de un mecanismo de calentamiento.

El 60% de líquido en el sólido se refiere a la humedad conocida como Agua Ligada correspondiente a las pequeñas porciones de líquido presentes entre los espacios entre granos, agua contenida entre pequeños vasos capilares y en sus superficies.

1.2 Proceso de Secado

En la figura 1.1 se muestra el proceso de secado por fases, sustentado por las gráficas que explican el comportamiento de los

diferentes períodos de este proceso en sus intervalos de tiempo correspondientes:

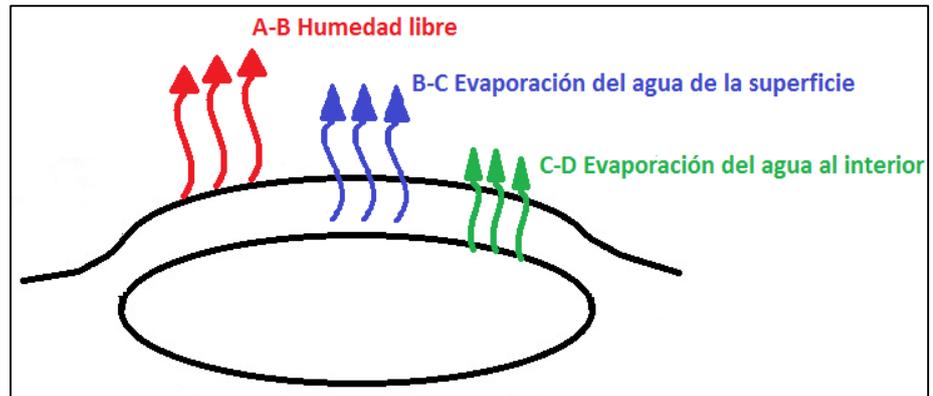


FIGURA 1.1 PROCESO DE SECADO

La figura 1.2 indica la reducción de humedad a medida que pasa el tiempo de secado del grano. Los varios tramos reflejan las fases de reducción de la humedad ligada en el grano.

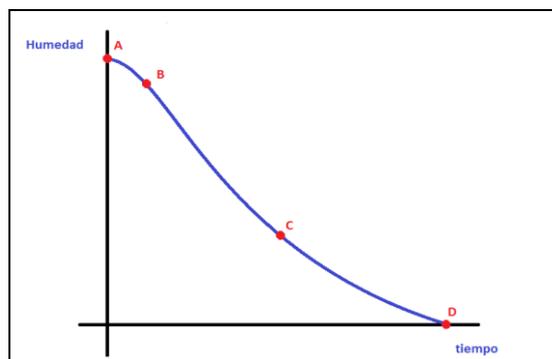


FIGURA 1.2 REDUCCIÓN DE HUMEDAD

En la figura 1.3 se muestra la rapidez de secado vs. la humedad, delimitando las siguientes fases:

- En el tramo A-B precalentamiento.
- En el tramo B-C representa el periodo de secado constante en el que ocurre la mayor parte de este proceso.
- En el tramo C-D empieza a disminuir la intensidad de secado.

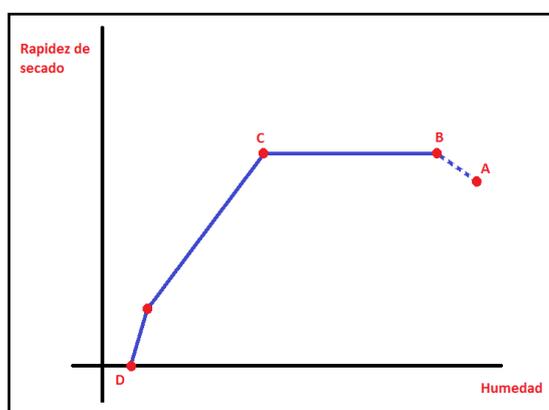


FIGURA 1.3 RAPIDEZ DE SECADO EN FASES.

En la figura 1.4 se observa la rapidez de secado vs el tiempo en donde el tiempo indicado en el tramo B-C corresponde a donde ocurre la mayor intensidad de secado, luego de eso el valor de la rapidez comienza a decrecer.

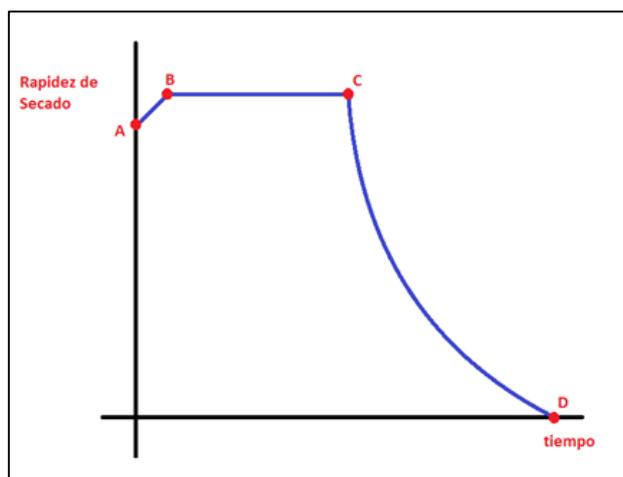


FIGURA 1.4 RAPIDEZ DE SECADO VS. TIEMPO.

1.3 Condiciones de secado

La operación de secado incluye dos procesos:

- Cantidad de energía necesaria para evaporar el líquido: aire necesario, energía requerida adicionada a ese aire.
- Cantidad de masa evaporada: líquido evaporado de la masa a secar.

El secado reúne las siguientes variables externas necesarias para el diseño:

- Temperatura: rangos para verificar las fases del proceso.
- Humedad: cantidad de líquido a evaporar, condiciones iniciales y finales.

- Ventilación: cantidad de aire requerido por el secado.

1.4 Clasificación de las operaciones de secado

En el diagrama mostrado en la figura 1.5 se indica las operaciones de secado:

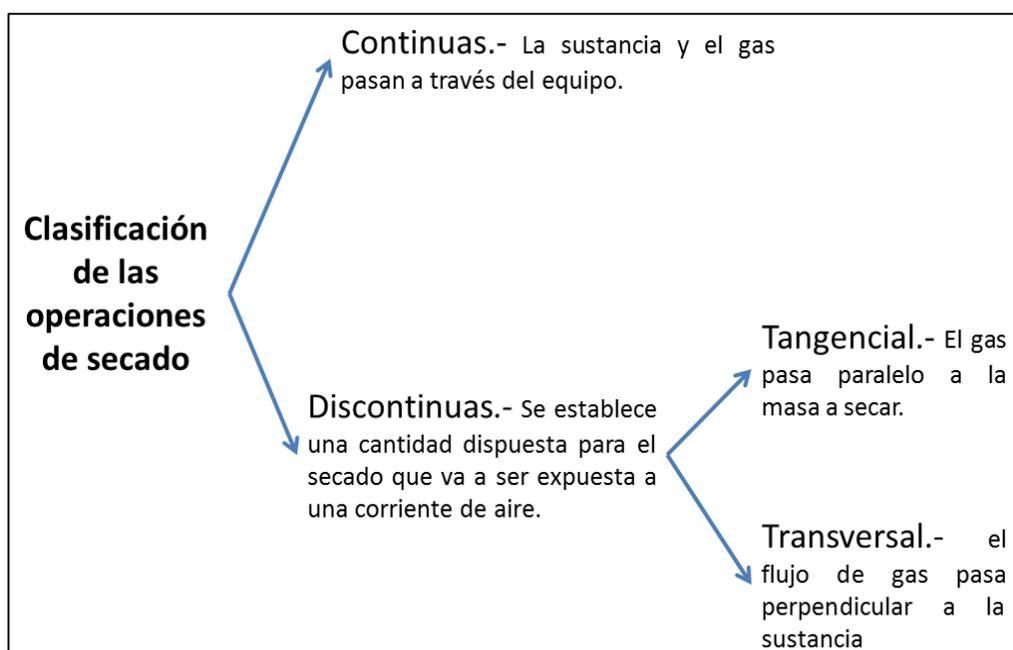


FIGURA 1.5 CLASIFICACIÓN DE LAS OPERACIONES DE SECADO.

El tipo de secadora elegida para el diseño es del tipo discontinua transversal.

CAPÍTULO 2

2. CÁLCULOS DE DIMENSIONES DE SECADORA

El diseño que se planteo estuvo basado en el dimensionamiento total de la secadora para lograr este objetivo se divide el proceso en dos partes:

- Cálculos para el dimensionamiento de área.
- Cálculos para el dimensionamiento de cuerpo.

2.1 Cálculos para el dimensionamiento de área

Correspondiente al área de secado basado en la capacidad máxima de carga de la secadora. Siguiendo los estudios publicados por la tesis del Ing. Manuel Fierro en 1990, las pruebas experimentales, dieron como resultado ecuaciones que sirven para calcular y diseñar el dimensionamiento de área de secado. Para presentar el modelo inclinado propuesto fue necesario introducir otras variables

tales como ángulo de inclinación (α), distancia (d) de ubicación de ventilador (mencionados como detalles adicionales), cada uno de estos valores fueron justificados por los principios físicos de ingeniería y diseño. El área de la carga se evalúa a través de la ecuación (2.1)

$$A_{carga} = \frac{V_c}{h} \quad (2.1)$$

Donde:

V_c : *Volumen de cama compacta.*

h : *Espesor o altura de secado.*

El volumen de la cama compacta se calcula a través de la ecuación (2.2)

$$V_c = \frac{V_s}{1 - E} \quad (2.2)$$

Donde:

V_s : *Volumen de solido.*

E : *fracción de vacío.*

El volumen de sólido es calculado con la ecuación (2.3)

$$V_s = \frac{\text{masa a secar}}{\rho \text{ de cacao humedo}} \quad (2.3)$$

Reemplazando la ecuación (2.3) en la ecuación (2.2) y ésta en la ecuación (2.1), se obtiene área de carga, mostrada en la ecuación (2.4).

$$A_{carga} = \frac{\text{masa a secar}}{\rho \times (1 - E) \times (h)} \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) muestra el área de carga en función de la masa a secar, la densidad del cacao húmedo, la fracción de vacío y el espesor o altura de secado.

La capacidad requerida de secado es 350 quintales. Haciendo la conversión a kilogramos se tiene lo siguiente: (asumiendo que los sacos son de medida estándar y obedecen a esta conversión)

$$1qq = 45,45 \text{ kg}$$

$$350qq \times \frac{45,45 \text{ kg}}{1qq} = 15907.5 \text{ kg}$$

De [Ref 2] mostrado en la tabla 1, presentan las densidades del cacao húmedo y seco.

TABLA 1
TABLA DE DENSIDADES DE GRANO DE CACAO
DEPENDIENDO DEL ESTADO

Estado del grano	Densidad (kg/m ³)
Cacao fresco	900
Cacao grano fermentado	775
Cacao grano seco	635

Los procesos por los que pasa la fruta indican que luego del fermentado sigue el secado del grano, con lo que la densidad a elegir sería la del grano fermentado 775 kg/m³, sin embargo tomando como referencia la experiencia del personal que manipula diariamente el producto, más la pruebas realizadas en campo, dio como resultado que la densidad de cacao húmedo para la variedad que se está secando es de:

$$\rho_{cacao\ húmedo} = 898 \frac{kg}{m^3}$$

La fracción de vacío (E) es un valor que corresponde a la forma geométrica del grano y el espacio que hay entre ellos; según el estudio de la Referencia [1] se estableció una prueba la cual fue llenar un recipiente del volumen dado con granos de cacao más agua, con lo que se concluye que la cantidad de agua equivale al espacio de vacíos entre granos, calculada de la siguiente manera:

$$E = \frac{\text{volúmen de vacios}}{\text{volúmen del recipiente}} = \frac{220 \text{ cm}^3}{525 \text{ cm}^3}$$

$$E = 0.42$$

La altura de secado (h) esta tabulada en la Tabla 2 [Ref 1], de esta información se justificará el valor escogido para el diseño presentado en este proyecto:

TABLA 2
VALORES EXPERIMENTALES DEL ESTUDIO DE REFERENCIA

Prueba	Espesor (cm)	Velocidad del aire (m/s)	Temp del aire (°C)	N _c (kg/m-min)	T total de secado (hrs)	Tiempo hasta que sea la humedad crítica (h)	Razón del tiempo (%)
1	8,3	0,26	60	0,230	12,42	1,4	11
2	4,6	0,26	60		10,70		
3	11,0	0,14	75	0,287	9,17	1,2	13
4	3,5	0,14	75	0,290	4,35	0,4	9
5	20,0	0,03	75	0,260	36,5	20,0	55

La razón de tiempo introduce un concepto adicional y se lo representa mediante la ecuación (2.5):

$$\text{razón del tiempo (\%)} = \frac{\text{tiempo que se demora el grano hasta alcanzar la humedad crítica}}{\text{tiempo total de secado}} \quad (2.5)$$

Este valor tiene como objetivo elegir el espesor más conveniente para cierta velocidad de aire.

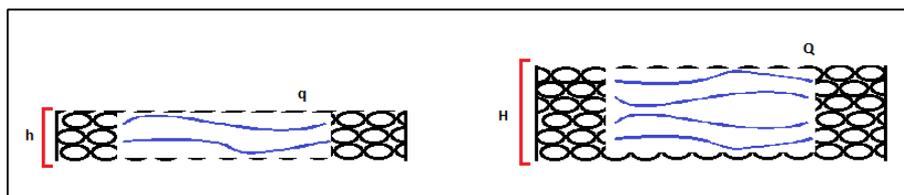


FIGURA 2.1 COMPARACIÓN DE ALTURAS DE SECADO.

En la figura 2.1 se muestra la comparación de dos alturas de secado siendo $h < H$, también se muestra la cantidad de aire dentro del lecho de granos de cacao en la cual $q < Q$; en la se puede apreciar que a mayor altura se obtendrá mayor cantidad de aire dentro del lecho de granos.

Esto da como resultado un periodo de secado constante mayor, con lo que logra una mayor velocidad de secado y por ende un tiempo menor.

Según las razones expuestas se selecciona el espesor de 20 cm. de la prueba 5 (Tabla 2).

En el diseño inclinado, uno de los objetivos es secar la mayor cantidad de cacao en el espacio designado, tomando como base el espesor de la prueba 5. Para secar esa cantidad y en base a la información empírica obtenida de los trabajadores de planta, se obtuvo un rango de 0,8 m. a 1,20 m.

Se escogió el máximo de espesor (1,20 m.), debido a que se tiene una mayor masa húmeda a secar, se aumenta el % de humedad superficial, por lo cual la rapidez de secado se mantiene alta y constante, con esto permite que el aire este más tiempo dentro del lecho de granos y por lo mismo la transferencia de masa del grano al aire sea mayor. El rango obtenido de los datos empíricos crea un limitante basado en la experiencia, que permite seleccionar una altura adecuada para el diseño.

Una vez obtenido estos valores se procede a reemplazarlos en la ecuación (2.4):

Datos:

Masa a secar=15907,5 kg

$\rho_{\text{cacao húmedo}}=898 \text{ kg/m}^3$

$E=0,42$

$h=1.20 \text{ m}$

$$A_{\text{carga}} = \frac{15907,5 \text{ kg}}{898 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (1 - 0,42) \times 1,20 \text{ m}}$$

$$A_{\text{carga}} = 30,754 \cong 31 \text{ m}^2$$

Se redondea el resultado a 31 m², y se aumenta 1 m² llegando a 32 m², para ocupar la mayor área para el secado.

2.2 Cálculos para el dimensionamiento de cuerpo

Corresponde al espacio físico que va a ocupar la secadora basado en los cálculos de dimensionamiento de área sumado a los detalles adicionales incluidos en este diseño los cuales son: Ángulo de inclinación (α), distancia (d) de ubicación de ventilador, mostrados en la figura 2.2.

El espacio físico introduce nuevas dimensiones en las cuales se ubica el área calculada, la vista lateral (figura 2.2) de diseño inclinado de la secadora. Esta tiene forma de trapecio en donde se ubica uno de los lados del área de secado designado como distancia c. Las distancias d y e que dimensionan parte del área de trabajo, son valores redondeados por motivos prácticos, las dimensiones del área donde se ubica la tobera (accesorio que viene con el ventilador para distribución de flujo) son tomadas de la misma y se indican en la figura 2.2 como (g) y (h), y la ubicación de esta área es centrada a una distancia (f) desde cualquiera de los límites de las dimensiones.

El ángulo de inclinación α es tomado en base a la referencia de otra secadora construida para granos de arroz y sustentado por el modelo de simulación de flujo en el utilitario de Solidworks.

Para dimensionar el secador se seleccionó una inclinación de 9° . En caso de que el modelado de simulación de flujo presente un valor no satisfactorio, se variará el ángulo hasta encontrar el adecuado.

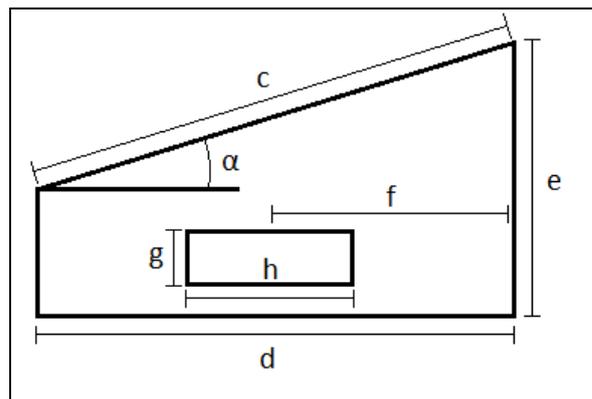


FIGURA 2.2 VISTA LATERAL DEL PLENUM DE LA SECADORA.

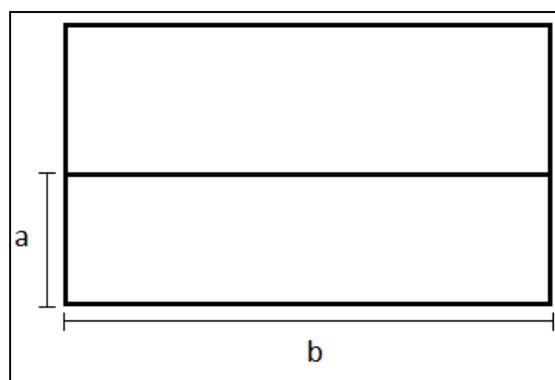


FIGURA 2.3 VISTA FRONTAL DEL PLENUM DE LA SECADORA.

La vista frontal de la figura 2.3, contiene el lado complementario (b) del área de secado calculada. La altura de esta dimensión designada como distancia (a), corresponde a una sugerencia de operadores de altura de trabajo la cual es 0.8 m, aplicando el mismo criterio de simulación de selección de ángulo de inclinación, en caso de observar alguna irregularidad se modificara la altura (a).

Se toman las siguientes opciones para el dimensionamiento a fin de establecer los lados del área calculada y se proponen los siguientes valores en la Tabla 3:

TABLA 3
VALORES DE DIMENSIONAMIENTO DE LA SECADORA.

Opciones	Resultados
1	$8 \times 4 = 32 \text{ m}^2$
2	$7 \times 4,8 = 33.6 \text{ m}^2$
3	$6,5 \times 5 = 32.5 \text{ m}^2$

Se selecciona la opción 3 para empezar a darle forma al diseño, tomando los datos iniciales mencionados y haciendo uso de los utilitarios de dibujo se obtienen las dimensiones para el plenum, que

corresponde al espacio cerrado donde se alojara el aire que servirá para el proceso de secado y se encuentra debajo de la cama de granos el cual se muestra en la figura 2.4.

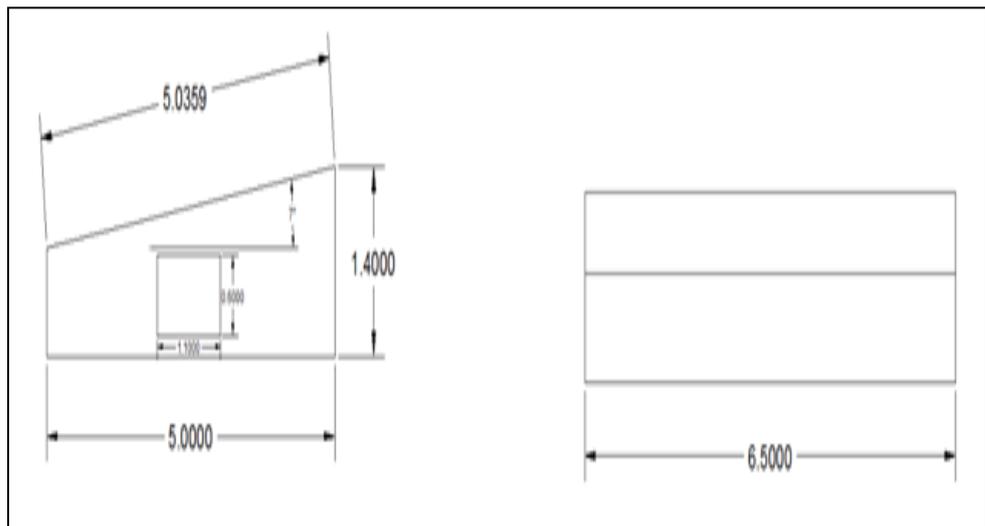


FIGURA 2.4 DIMENSIONES DEL PLENUM DE SECADORA.

Donde:

a = 0.80 m.

b = 6.5 m.

c = 5.0549 m.

d = 5 m.

e = 1.4 m.

f = 2.50 m.

g = 0.60 m.

h = 1.10 m.

Con estos resultados se procede a calcular el flujo necesario para la cantidad a secar solicitada y su comprobación a través del utilitario de simulación de flujo.

CAPÍTULO 3

3. CÁLCULOS DE DISEÑO DE SECADORA

3.1. Cálculo de la capacidad del ventilador

Es necesario tomar en cuenta las caídas de presión en la camada de granos.

3.1.1. Cálculo del área interfacial

Para este caso se recurre a una comparación del grano de cacao con una elipse como se muestra en la figura 3.1.

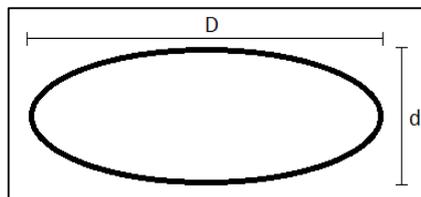


FIGURA 3.1 DIMENSIONES DE ELIPSE.

El área superficial de una elipse se la calcula con la ecuación (3.1):

$$\text{Area Superficial} = \frac{\pi}{4} \times D \times d \quad (3.1)$$

Para el cálculo del perímetro existe una aproximación basada en las longitudes de los ejes mayores y menores de la elipse, la ecuación (3.2) mostrará el cálculo de dicho valor:

$$\pi = \frac{D + d}{2} \quad (3.2)$$

Para tener una idea de la geometría de los granos de cacao y a su vez poderlos comparar con la elipse, se toma la aproximación de geometría utilizada en la Ref [1], la cual indica que se escogen cuatro granos al azar y sus formas son dibujadas en un papel milimetrado con el objetivo de obtener promedios de las dimensiones de la elipse, espesor promedio y promedio de cuadros ocupado por cada grano, como se muestra en la figura 3.2

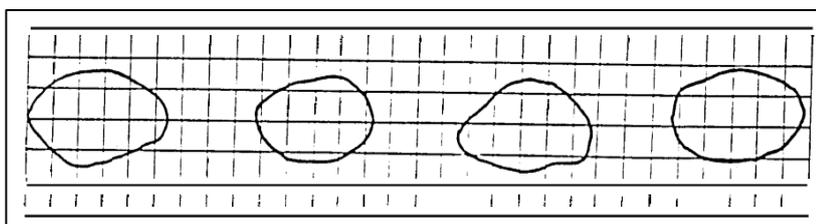


FIGURA 3.2 MEDIDAS APROXIMADAS DE GRANOS DE CACAO SOBRE UNA HOJA MILIMETRADA

Una vez realizada la aproximación se tiene los valores promedio:

Promedio de cuadros ocupados por el grano: 12.5 cm.

Promedio de espesor de grano (e): 0.8 cm.

Promedio de eje menor de grano-elipse (d): 1,5 cm.

Promedio de eje mayor de grano-elipse (D): 2.8 cm.

La figura 3.3 indica la vista superior del grano, la cual dará el área completa, que corresponde al área interfacial y se lo detalla de la siguiente manera:

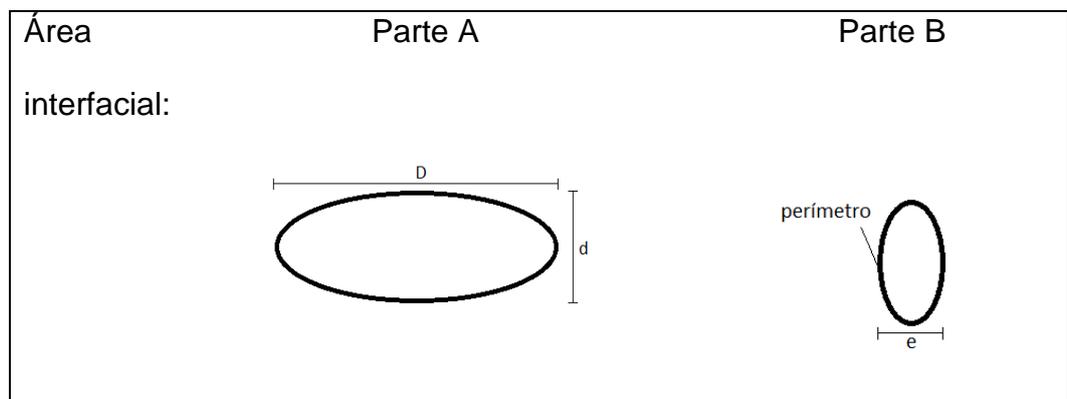


FIGURA 3.3 VISTA SUPERIOR DE GRANOS DE CACAO Y APROXIMACIONES

$$S_p = (\#de\ cuadros\ promedio \times s' \times \#de\ caras) + perimetro \times e \quad (3.3)$$

Donde S_p = área interfacial

Para el cálculo de la parte A se necesita el número de cuadros promedio que ocupa la forma dibujada del grano en el papel milimetrado, el área de cada cuadro el cual se llamará s' cuyo valor es $0,25 \text{ cm}^2$, y el número de caras será multiplicado por dos para tomar en cuenta ambos lados del grano. El cálculo de la parte B se realiza con la multiplicación del espesor del grano por el perímetro, dando como resultado la ecuación (3.3) que calcula el área interfacial. El valor calculado es aproximado en el cual se asume algunos datos, tomando como referencia siempre la geometría del grano. Reemplazando los valores en la ecuación (3.3) el resultado es el siguiente:

$$S_p = [12.5 \times 0.25 \times 2] + \left[\left(\pi \times \frac{2.8 + 1.5}{2} \right) \times 0.825 \right]$$

$$S_p = 11.84 \text{ cm}^2$$

3.1.2. Cálculo del volumen del grano

Según las referencias de las figuras 3.2 y 3.3, el volumen de grano se define según la ecuación (3.4) como:

$$V_p = \text{número de cuadros promedio} \times s' \times e \quad (3.4)$$

Estableciendo que el número de cuadros que ocupa la geometría dentro del papel milimetrado multiplicado por el valor de cada cuadro (s') y multiplicado por el espesor reemplazando en la ecuación (3.4) el resultado es el siguiente:

$$V_p = 12.5 \times 0.25 \times 0.8$$

$$V_p = 2.5 \text{ cm}^3$$

Cálculo del número de Reynolds

La Ref [1] proporciona ciertos criterios teóricos los cuales serán utilizados para continuar el cálculo del flujo.

Para el cálculo del número de Reynolds se utiliza la ecuación (3.5) de la Ref [1]:

$$R_e = \frac{4 \times rh \times v'}{E \times \mu_d} \quad (3.5)$$

Donde:

rh: radio hidráulico.

v' : velocidad.

μ_d : viscosidad dinámica del fluido, para este caso es tomada a temperatura de 20°C.

La fórmula del radio hidráulico para flujo, también es conocida de la Ref [1] (ecuación 3.6) y se define como:

$$r_h = \frac{\text{volumen de vacios}}{\text{superficie mojada}} = \frac{E}{a'} \quad (3.6)$$

Donde a' es calculada mediante la ecuación (3.7):

$$a' = a_v \times (1 - E) \quad (3.7)$$

Para realizar los cálculos se asumirá que la cama compacta de producto, en toda su extensión, es uniforme con el cual se establecerá el concepto de superficie específica, el cual se define con la ecuación (3.8):

$$a_v = \frac{S_p}{V_p} \quad (3.8)$$

Donde:

S_p : superficie interfacial de la partícula.

V_p : volumen de la partícula.

El concepto de área específica determina una porción del área a la cual está sometido al proceso de secado, se reemplaza en la ecuación (3.5) y se calcula el del número de Reynolds en función de la velocidad:

$$a_v = \frac{S_p}{V_p} = \frac{11.84}{2.5}$$

$$a_v = 4.53 \text{ cm}^{-1}$$

$$a = a_v \times (1 - E) = 4.53 \times (1 - 0.42)$$

$$a = 2.66 \text{ cm}^{-1}$$

$$r_h = \frac{E}{a} = \frac{0.42}{2.66}$$

$$r_h = 0.16 \text{ cm} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$R_e = \frac{4 \times r_h \times v'}{E \times \mu_d} = \frac{4 \times (1.6 \times 10^{-3}) \times v'}{0.42 \times (1.79 \times 10^{-5})}$$

$$R_e = 840v'$$

3.1.3 Cálculo de la caída de presión

Una vez conocido el área interfacial y el volumen de grano también es necesario conocer el diámetro de la partícula el cual se obtiene

al comparar el área interfacial con el área de una esfera la expresión queda de la siguiente manera (ecuación 3.9 y 3.10):

$$S_p = D_p^2 \quad (3.9)$$

$$D_p = \sqrt{11.84/\pi} \quad (3.10)$$

$$D_p = 1.99 \times 10^{-2} \text{ m}$$

En la Ref [1] se indica la ecuación (3.11) para calcular la caída de presión tomando la densidad promedio de la temperatura de entrada y de salida, con lo que se establece que esta expresión sirve para bajo, medio y alto flujo. Reemplazando los datos y simplificando se obtienen las ecuaciones (3.11) y (3.12):

$$\partial P = \frac{32 \mu d (v'/E) \partial l}{(4 r_h)^2} + \frac{1.75 d (v')^2 \partial l (1 - E)}{D_p E^3} \quad (3.11)$$

$$\partial P = v' \partial l (37.2 + 749.7 v') \quad (3.12)$$

En la Ref [3] tesis de “diseño de una secadora de arroz con intercambiador de calor para una piladora” del Ing. Manuel Chicaiza

Rivera, se encuentra la figura (3.4), presión estática vs. Flujo de aire.

Se toman valores para reemplazar en la ecuación (3.12) y así obtener una curva que se la ubicará en la figura 3.4. Se escoge un valor de altura (h) basados en el rango de altura escogido para el proyecto, luego se varía la velocidad (v). Dando como resultados varias presiones mostradas en la Tabla 4, esta información es graficada en la figura 3.4. Con esta información se calcula la velocidad y posteriormente el flujo.

TABLA 4
VALORES DE CAIDA DE PRESIÓN
(en base a la figura 3.4)

V (m/s)	h (m)	∂ (Pa)
0.30	1	78.63
0.10	1	11.217
0.06	1	4.93

La figura 3.4 está normalizada por el área y por la unidad de masa para que estos valores no sean una condición influyente.

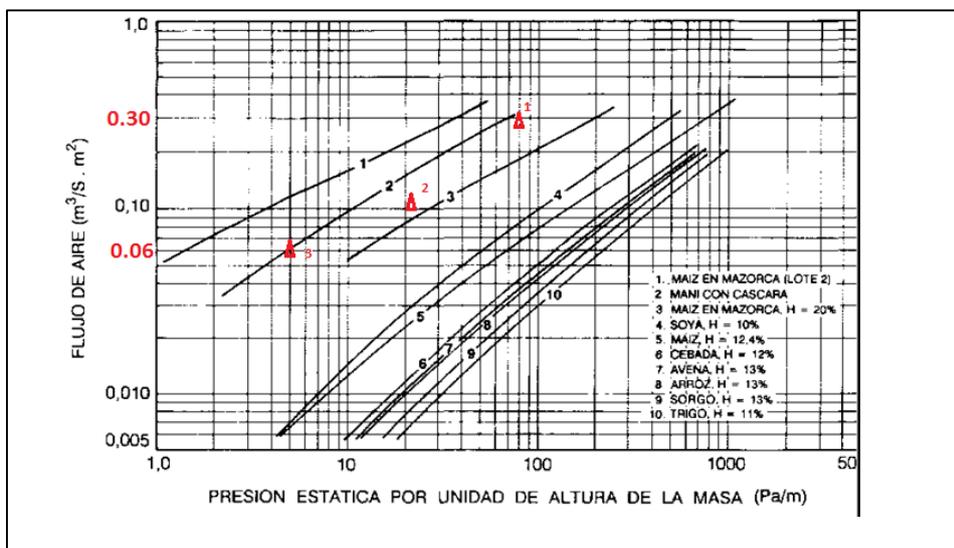


FIGURA 3.4 PRESIÓN ESTÁTICA VS. FLUJO DE AIRE

Ubicando los valores en la figura 3.4 se obtiene una curva que se ubica entre dos productos (maíz de mazorca y maní con cascara); conociendo el tamaño del grano es de suponerse que la curva del cacao estará ubicada entre las curvas de los productos 1 y 2.

Tomando las condiciones de diseño y el gráfico dispuesto para el cacao, se escoge el primer valor de la tabla 3, el cálculo del caudal está dado por la ecuación (3.13):

$$Q = v \times A_p \quad (3.13)$$

$$Q = 0.30 \times 32.5$$

$$Q = 9.75 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.2 Cálculo de la energía térmica de secado

Para el cálculo de la energía térmica de secado se asume los valores de temperatura de la Ref [1] ubicando los rangos de estas en el volumen de control, además se asumirá el sistema como un intercambiador de calor, teniendo en cuenta estos detalles se procederá a realizar los cálculos y ubicar los límites del volumen de control, mostrados en la figura (3.5):

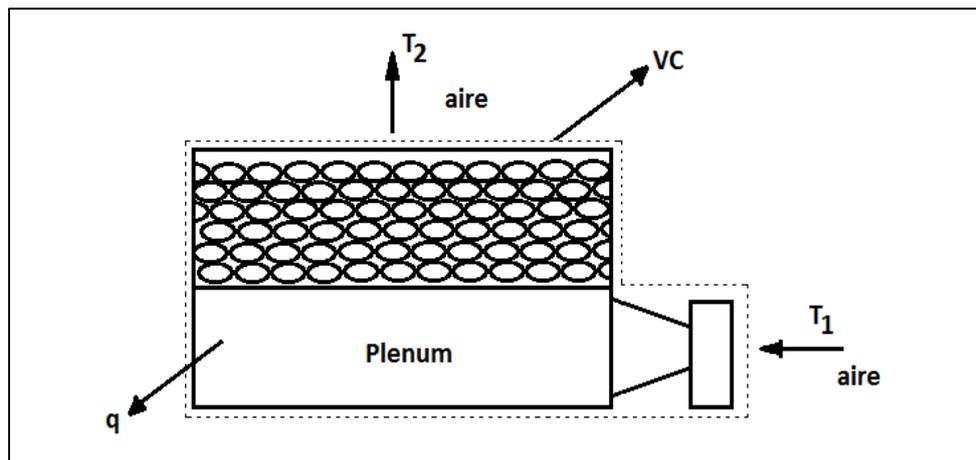


FIGURA 3.5 VOLUMEN DE CONTROL ALREDEDOR DE LA SECADORA.

Disponiendo el volumen de control alrededor de la geometría seleccionada para el diseño, se realiza el balance de energía mediante la ecuación (3.14):

$$E_1 - E_0 + E_g = E_{at} \quad (3.14)$$

$$E_g = E_0 - E_1 + E_{at}$$

$$E_g = \dot{m}C_p T_2 - \dot{m}C_p T_1 + q + NL_v A_c$$

$$E_g = \dot{m}C_p (T_2 - T_1) + q + NL_v A_c$$

Despejando la energía generada del volumen de control se obtiene la ecuación (3.15).

$$E_g = \underbrace{\dot{m}C_p (T_2 - T_1)}_{1era\ parte} + \underbrace{h_o A (T_w - T_1)}_{2da\ parte} + \underbrace{NL_v A_p}_{3era\ parte} \quad (3.15)$$

Donde:

E_1 : Energía que entra al volumen de control.

E_0 : Energía que sale al volumen de control.

E_{at} : Energía almacenada en el volumen de control.

E_g : Energía generada en el volumen de control.

h_o : Coeficiente convectivo de transferencia de calor. (Watt/m²-°C)

A : Superficie de transferencia de calor que existe entre el secador y el ambiente. (m²)

A_c : Área de plataforma de secado. (m^2)

q : Calor que sale a través de las paredes del secador. (Watt)

m : Flujo másico de aire. (kg/s)

C_p : Calor específico del aire a la temperatura promedio entre los valores de entrada y de salida. ($J/kg \cdot ^\circ K$)

T_1 : Temperatura del aire a la entrada del volumen de control. ($^\circ C$)

T_2 : Temperatura del aire a la salida del volumen de control. ($^\circ C$)

T_w : Temperatura de la pared del secador. ($^\circ C$)

N : Rapidez de secado. (kg de agua/s- m^2)

L_v : Calor latente de evaporación. (kJ/kg)

El calor latente, calor sensible y densidad se los toma a la temperatura promedio de $50^\circ C$, con respecto a las condiciones del aire en el flujo:

$$q_{lat} = 2409.7 \text{ kJ/kg}$$

$$C_p = 1005 \text{ J/kg} \cdot ^\circ K$$

$$\rho = 1.10 \text{ kg/m}^3$$

Estos valores han sido tomados de la tabla A4 (Apéndices) de la Ref [4].

Resolviendo cada una de las partes de la ecuación se obtiene lo siguiente:

Primera parte de la ecuación (3.15):

$$\dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

Cálculo de \dot{m} , flujo másico viene dado por la velocidad del flujo y el área de secado.

Multiplicado por el valor del calor sensible y por la diferencia de temperatura, que según los registros de las pruebas (Ref [1]) realizadas luego de 18 y 24 horas para la entrada fueron de 27 y 23°C y para la salida de 61 y 69°C respectivamente.

El valor de la temperatura promedio de las paredes del secador es tomado del valor de temperatura de las paredes del secador experimental y su valor es 53°C.

Remplazando los datos en la primera parte de la ecuación (3.15):

$$0,3 \frac{m}{s} \times 32 m^2 \times 1.10 \frac{kg}{m^3} \times 1005 \frac{J}{kg - ^\circ K} \times (334 - 300) ^\circ K$$

$$= 366473.25 \text{ Watt}$$

Segunda parte de la ecuación (3.15):

$$h_o A (T_w - T_1)$$

El cálculo de h_o , en la Ref [1] se toman los valores experimentales y las dimensiones del secador de prueba, siendo la convección libre la transferencia de calor que predomina entre la superficie externa del secador y el medio ambiente, el h_o se lo puede usar la siguiente correlación:

$$h_o = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{l} \right) \quad \text{para } 10^4 < Gr \ Pr < 10^9$$

$$h_o = 0.95 (\Delta T) \quad \text{para } Gr \ Pr > 10^9$$

Donde:

El número de Grashof (Gr) y el número de Prantdl (Pr) es calculado a la temperatura de la película.

El valor de ΔT es la diferencia de temperatura entre la pared y el medio y está dada en $^{\circ}\text{C}$, y l que es la longitud vertical de la pared en metros (m).

Estimando que la temperatura en la pared es 53°C y la temperatura del ambiente es de 27°C se calcula la temperatura de la película:

$$T_f = \frac{53 + 27}{2} = 40^{\circ}\text{C}$$

De la tabla A4 de la Ref [4] se obtiene que el número de Prandtl a 40°C es 0.72, realizando los cálculos se obtiene el número de Grashof que es 7.2×10^6 , y el valor de la longitud vertical de la pared es de 0.15 m; habiendo obtenido estos resultados se utiliza la primera correlación mencionada en la Ref [1]:

$$h_o = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{l} \right)$$

$$h_o = 1.42 \left(\frac{53 - 27}{0.15} \right)$$

$$h_o = 5.5 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 - ^{\circ}\text{C}}$$

Una vez obtenido el valor de h_o , se multiplica por el área de superficie de la transferencia de calor, la cual es menor que el área de plataforma; debido a la irregularidad del grano se ha asumido un

valor de 29 m^2 . La diferencia de temperatura entre la pared y el medio tomando los valores utilizados para la resolución de la primera parte de la ecuación 3.15, con lo que se obtiene lo siguiente:

$$5.5 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \times 29\text{m}^2 \times (53 - 27)^\circ\text{C} = 4147 \text{ Watt}$$

Tercera parte de la ecuación (3.15): NL_vA_c

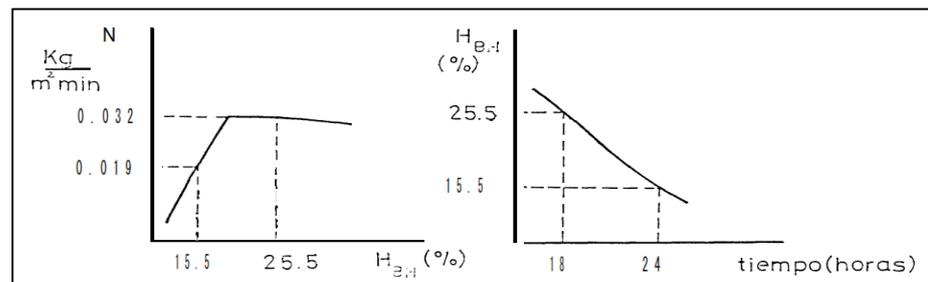


FIGURA 3.6 RAPIDEZ DE SECADO EXPERIMENTAL Y VALORES DE EFICIENCIA

La rapidez de secado es tomada de la figura 3.6 generada del proceso experimental de la Ref [1], en el cual se basa el diseño. Se toman los valores promedios de eficiencia para el periodo constante y el periodo decreciente de secado, respectivamente.

$$N_c = 0.032 \text{ kg/m}^2\text{-min}$$

$$N_c = 0.019 \text{ kg/m}^2\text{-min}$$

Se deben realizar los cálculos para el periodo constante y el periodo decreciente respectivamente.

Para el periodo constante, se multiplica el calor latente por la rapidez de secado y por el área de plataforma de secado con lo que se obtiene:

$$0.032 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 - \text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \left(2409.7 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{s}} \right) \times 32 \text{ m}^2 = 41080.1 \text{ Watt}$$

Y para el periodo decreciente se tiene el siguiente cálculo:

$$0.019 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 - \text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \left(2409.7 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{s}} \right) \times 32 \text{ m}^2 = 25128.35 \text{ Watt}$$

Siguiendo el cálculo de energía requerida para el periodo constante es:

$$E_g = 366473.25 + 4147 + 41080.1 = 411700.35 \text{ Watt}$$

Para el periodo decreciente:

$$E_g = 366473.25 + 4147 + 25128.35 = 395748.6 \text{ Watt}$$

Se toma el mayor de los valores que se corresponde a la cantidad de energía térmica necesaria, para este caso 411.7 kW.

3.3 Simulación de flujo

La simulación de flujo se incluyó en el diseño para garantizar la distribución completa del aire a través del área calculada, debido a que en nuestro diseño la geometría es diferente al diseño rectangular enunciado en la referencia de estudio. (Ref [1])

Para esto se utilizó el utilitario de SOLIDWOKS, dentro de esas herramientas se encuentran los parámetros de diseño iniciales, entrada y salida de flujo; para así poder obtener una aproximación del flujo dentro del plenum.

Las dimensiones para la simulación son tomadas de las figuras 2.2 y 2.3, los pasos realizados se muestran en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9:

1. Se selecciona el tipo de flujo que se va a analizar, se selecciona aire. (figura 3.7)

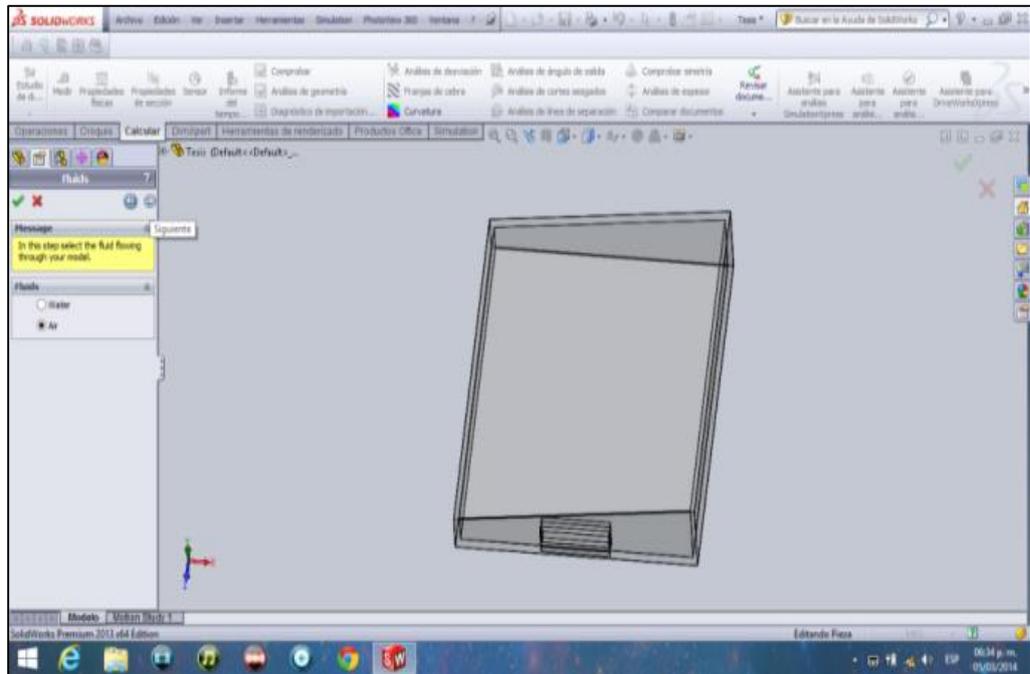


FIGURA 3.7 SELECCIÓN DEL TIPO DE FLUJO.

2. En la figura 3.8 se ingresan los valores de presión y temperatura referenciales del aire, estos valores fueron tomados de la Ref [1] y los equipos utilizados para este tipo de procesos. Estos valores se ubicaron en la guía de ingreso y salida del aire para limitar el plenum e indicar el recorrido de flujo en la secadora.

El modelo asume que no hay pérdidas por transferencia de calor en las paredes, totalmente aislado.

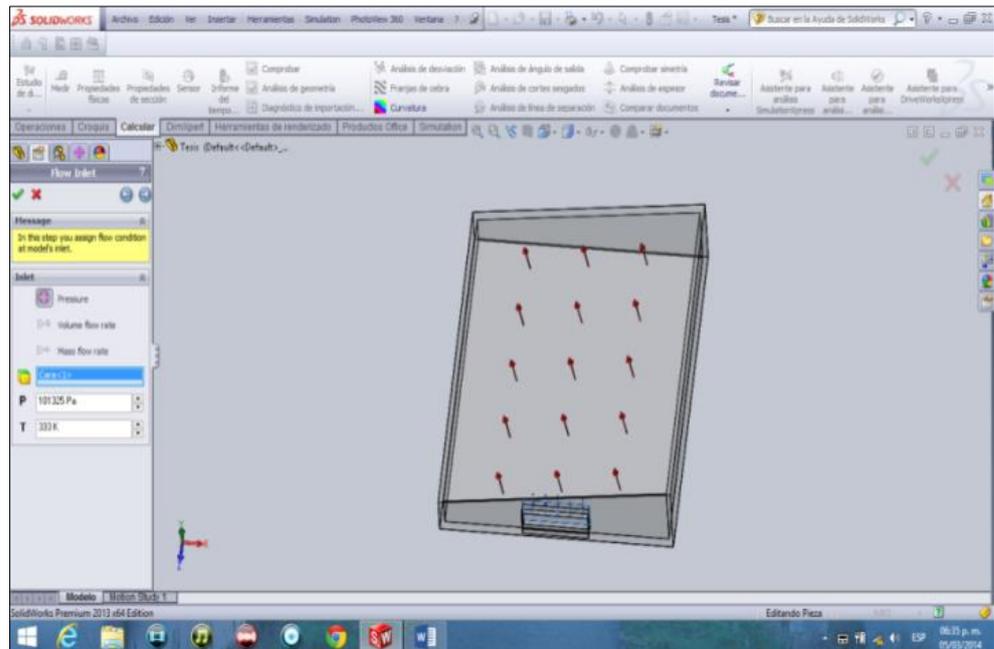


FIGURA 3.8 INGRESO DE VALORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA. SENTIDO DE FLUJO Y RESTRICCIONES DE MODELO

3. Luego en la figura 3.9 se muestra donde se introduce el valor calculado del flujo que es una de las condiciones de diseño

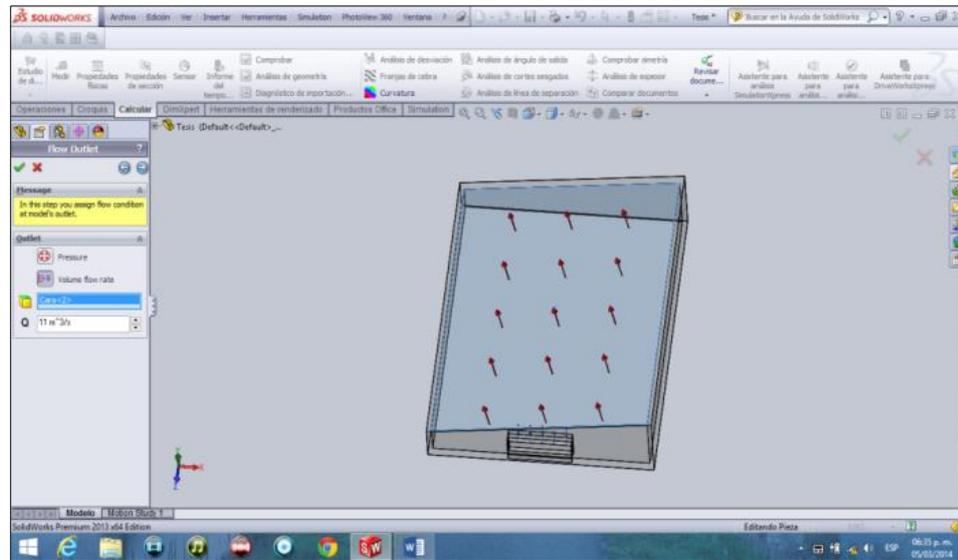


FIGURA 3.9 INGRESO DEL VALOR DE FLUJO

En la figura 3.10 se aprecia el despliegue del flujo a lo largo de la línea central del boquete donde el aire ingresa, y luego se distribuye en el resto del área de secado, obteniéndose la aproximación de la distribución de flujo.

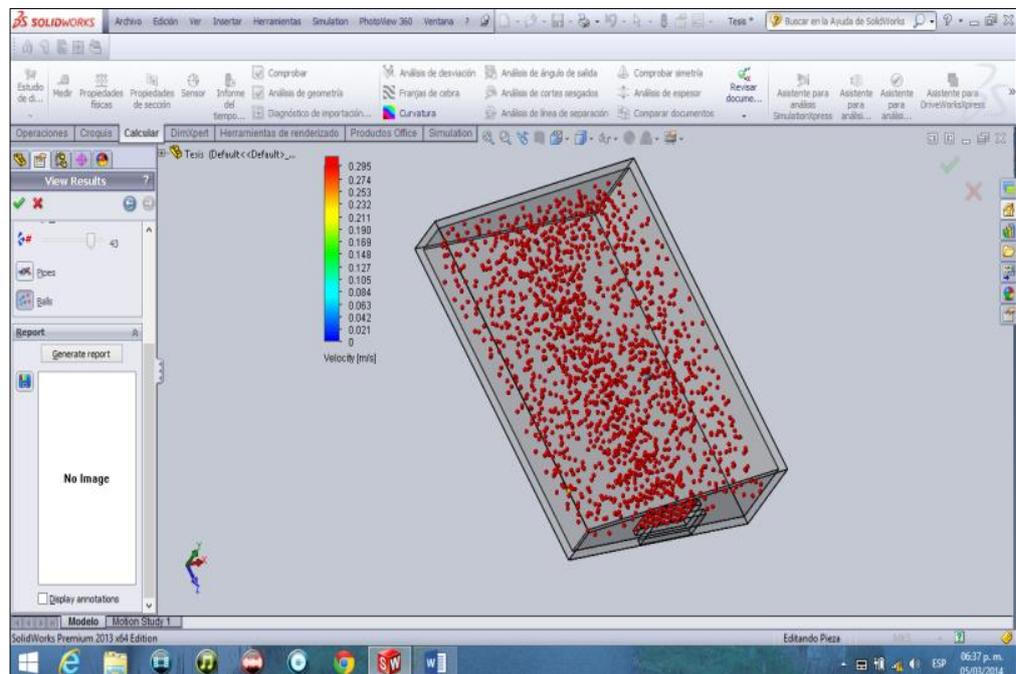


FIGURA 3.10 DISTRIBUCIÓN DE FLUJO VISUALIZACIÓN

Por lo que se confirma que, a pesar del cambio de geometría de la secadora, la distribución de flujo es la adecuada, sin embargo, es necesario realizar mayor pruebas experimentales para diversas geometrías, para garantizar estos resultados.

Finalmente los resultados del diseño se presentan en la Tabla 4, que corresponde a un resumen de las capacidades calculadas y la geometría del diseño para el proyecto.

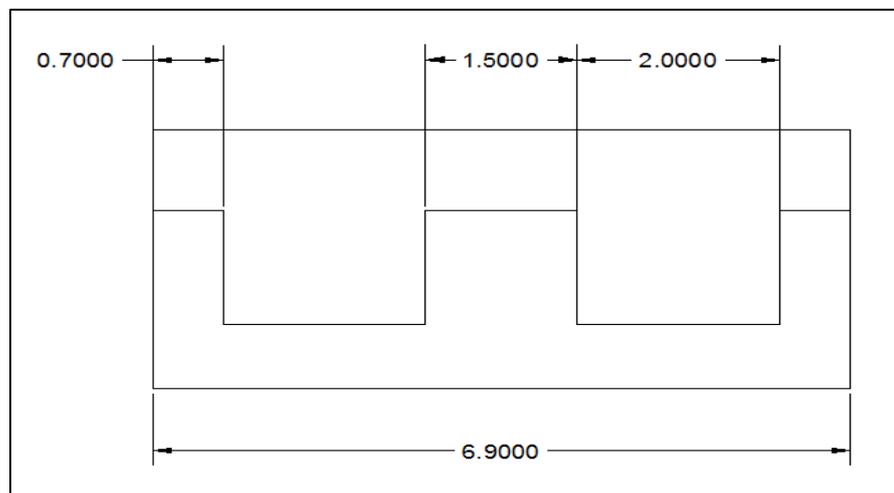
TABLA 4
RESULTADO DE DISEÑO, CAPACIDADES

	Según su operación	Sub clase
Tipo de secadora:	Discontinua	Transversal
Capacidad:	350 qq	
	Inicial	Final
Humedad	50% - 60%	7% - 12%
Tiempo de secado	36 horas	
	Geometría de plataforma	Angulo de inclinación
Geometría:	Cuadrada	9 ⁰
	Area calculada	Area de diseño
Area de carga	31 m ²	32.5 m ²
	Caudal	Energía térmica
Energía y capacidad de aire	9.75 m ³ /s	411 kW

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO EXTERIOR DEL SECADOR

En la figura 4.1 se muestra el diseño externo del secador con las medidas dispuestas para la aprobación final del diseño propuesto.



**FIGURA 4.1 DISEÑO EXTERIOR DEL SECADOR VISTA
FRONTAL**

El aumento de medida de 0.40 m es debido al espesor del ladrillo de construcción, la carga de la secadora se da en la parte frontal, se utiliza una pala mecánica de aproximadamente 1.70 m por lo que se designa el espacio de 2.0 m para el área de carga.

En la figura 4.2 se muestra la vista lateral del diseño externo del secador mostrando las medidas complementarias del diseño final.

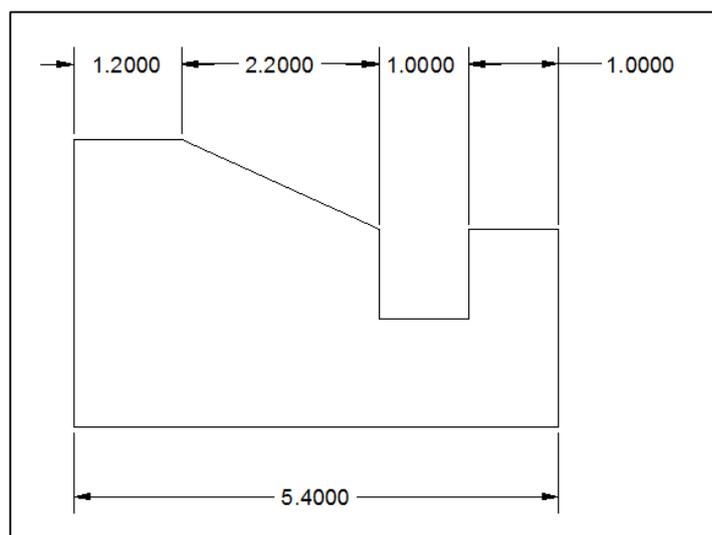


FIGURA 4.2 DISEÑO EXTERIOR DEL SECADOR VISTA LATERAL

El aumento de dimensión en la vista lateral es por la misma razón del aumento de la vista frontal, se adicionó una sección de

inspección de producto de área 1x1 m para poder llevar el control del producto, el resto de medidas se establecen por conveniencia.

Proceso de diseño

Para la presentación del proyecto de la secadora se optó por el siguiente proceso de diseño mostrado en la figura 4.3, basada en la investigación de los procesos de secado, y se desarrolló los siguientes pasos de diseño como normativa para la construcción de futuras secadoras independientemente de su geometría.

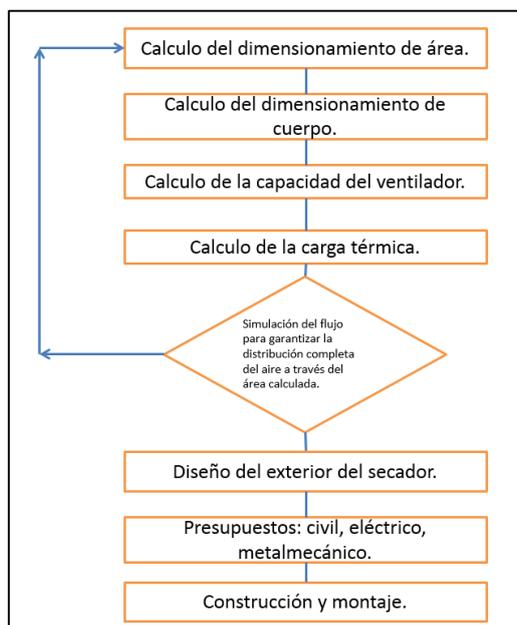


FIGURA 4.3 PROCESO DE DISEÑO DEL SECADOR

Del paso 5 se puede regresar a los primeros pasos a manera de rediseñar las dimensiones o cualquier otro parámetro necesario, con el objetivo de acondicionar a la distribución adecuada del flujo.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Al finalizar el desarrollo de este proyecto se pudo resaltar varios detalles que no fueron sometidos a comprobación y que están sustentados con principios técnicos. Estos se muestran a continuación:

- La geometría escogida se asemeja a un cuadrado, por la extensión de esta área existe la posibilidad que el volumen de aire generado debido al ángulo escogido, no afecte en el desarrollo del fluido, y que el volumen del plenum se asemeje más al de un cuadrado con una altura de 80 cm, es decir que ese volumen generado por el ángulo estaría siendo hasta cierto punto despreciado y el dato fundamental es la distancia en donde estaría ubicada el boquete de entrada de flujo para el secado.

- El área de carga debe ser soportada por vigas que varían su altura conforme la longitud avanza hacia el hombro de la secadora (parte más alta de la inclinación de la secadora), estos elementos podrían estar funcionando como turbulenzadores de flujo, su función sería la de distribuir todo el flujo en el volumen del plenum para que pueda fluir en todo el área de carga para que el aire pueda atravesar la masa de cacao a secar. Estos puntos deben ser comprobados y sometidos a experimentación para poder afirmarlos, aunque los resultados de secado del producto indican que las inferencias sobre estos detalles están correctas ya que los pedidos han sido aprobados por los organismos reguladores de exportaciones de cacao.

Recomendaciones

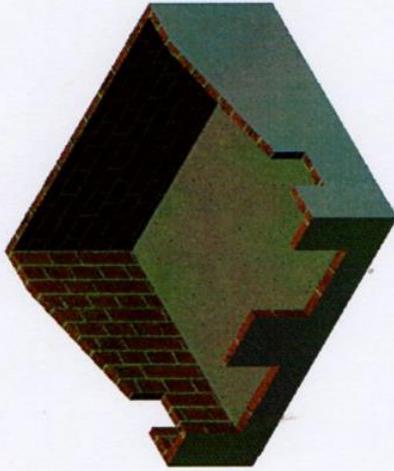
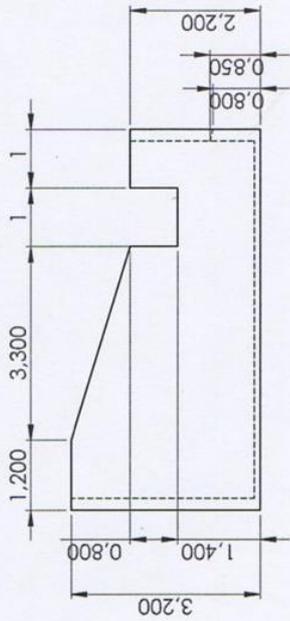
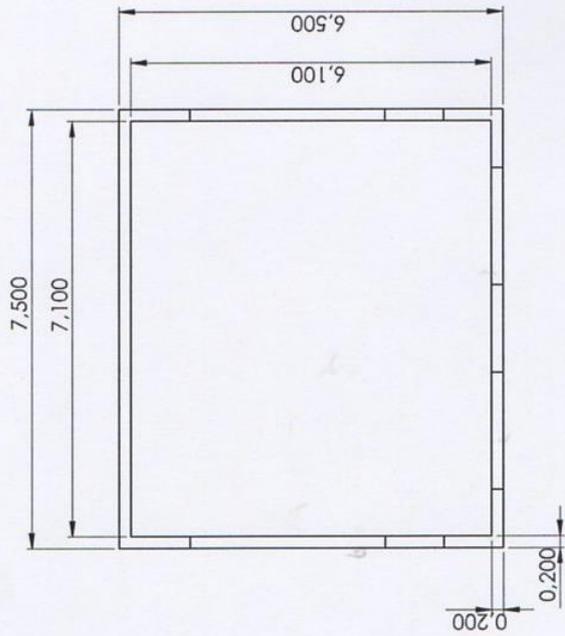
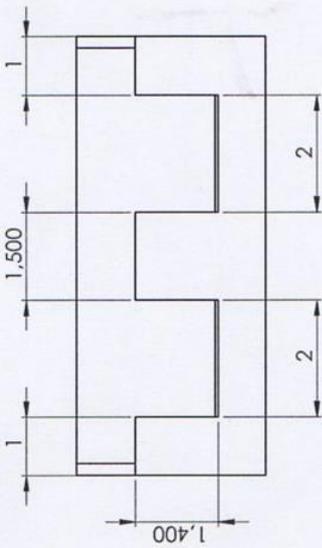
Cualquier cambio de geometría realizado a este tipo de secadores debe ser sometido a experimentación para poder hallar las curvas de secado y establecer eficiencias, tomando el muestreo recomendado por el protocolo de experimentación diseñado para cada una de las geometrías ya sean cuadradas o circulares.

- Es importante recopilar las características de la fruta para poder supervisar de manera correcta el diseño del equipo de secado,

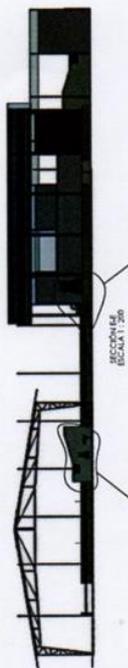
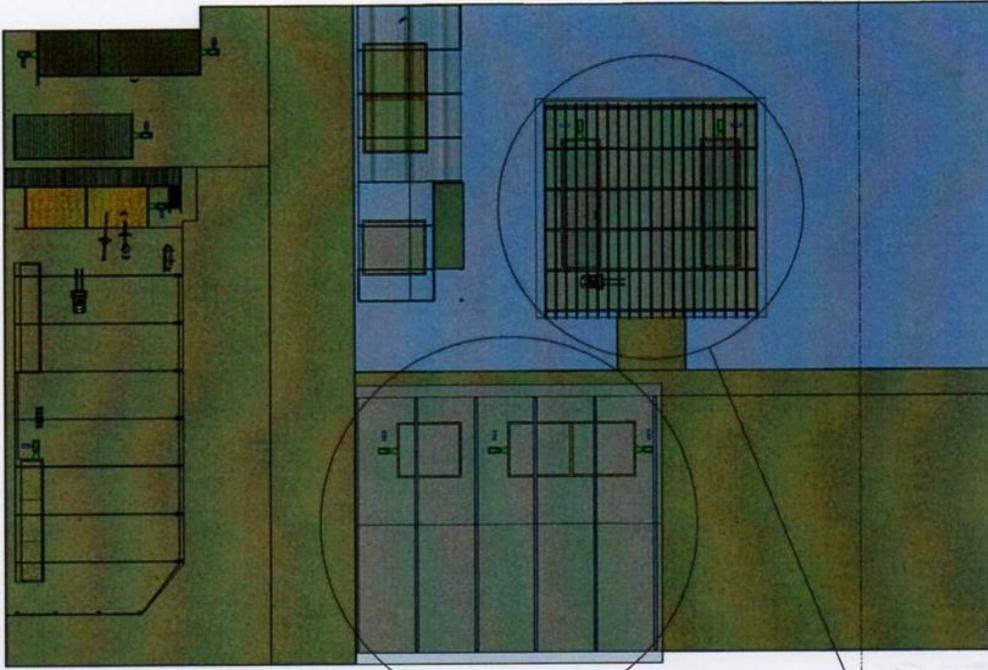
existen valores que varían dependiendo del tipo de variedad de cacao que se vaya a secar, el proceso al cual va a ser sometido, el tipo de cosecha y el proceso previo.

- En el secado ocurre un fenómeno llamado revenido, que corresponde a un ligero aumento de humedad de los lotes de producto, por lo que es recomendado realizar el seguimiento de la humedad que es la principal variable de control del producto procesado.
- El secado es uno de los últimos procesos por los que pasa la fruta, por lo que solo después de haberlo terminado se podrá conocer si los procesos anteriores fueron realizados con éxito. Por lo que el secado se convierte en el regulador de todo el proceso de preparación del cacao para la exportación.

APÉNDICES



FIN DE BURCALO COBRIRDO: ACABADO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ANGULARES:		REVISION	
NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA: 1:100	
REVISIONES Y CAMBIOS ARBITRARIOS		TITULO:	
NOMBRE:	FIRMA:	FECHA:	N° DE DIBUJO: 350 qq
DIBUJ.:	VERIF.:	APROB.:	ESCALA: 1:100
FABR.:	CALIF.:	MATERIAL:	HOJA 1 DE 1
MATERIAL:		A3	



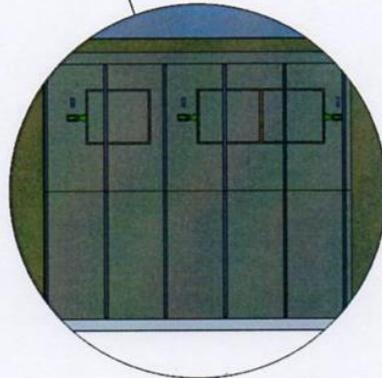
SECCIONES
ESCALA 1:200



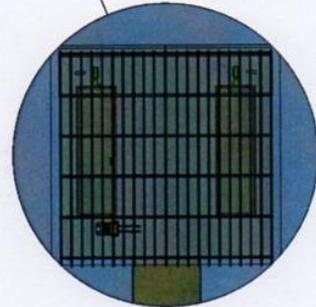
DETALLE C
ESCALA 1:500



DETALLE B
ESCALA 1:500



DETALLE D
ESCALA 1:200



DETALLE E
ESCALA 1:200

Proyecto: Edificio Cuernavaca 2012		Planta y Bravancia	
Escala: 1:200		2	
Autor: [Blank]		[Blank]	
Fecha: [Blank]		[Blank]	
Lugar: [Blank]		[Blank]	
Materia: [Blank]		[Blank]	
Curso: [Blank]		[Blank]	
Módulo: [Blank]		[Blank]	
Asignatura: [Blank]		[Blank]	
Tutor: [Blank]		[Blank]	
Alumno: [Blank]		[Blank]	
Matrícula: [Blank]		[Blank]	
Fecha de entrega: [Blank]		[Blank]	
Fecha de recepción: [Blank]		[Blank]	
Calificación: [Blank]		[Blank]	
Observaciones: [Blank]		[Blank]	

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Manuel Kennedi Fierro Salazar. *"Diseño Termico de un Secador de Cacao del Tipo Plataforma ingeniería en el desarrollo"*. (Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1990.)
- [2]. De Lucia, M., & Assennato, D. (s.f.). *La ingeniería en el desarrollo - Manejo y tratamiento de granos poscosecha*. (Jefe, Editor) Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/docrep/x5041s/x5041s09.htm>
- [3]. Manuel Enrique Chicaiza Rivera. *"Diseño de una Secadora de Arroz con Intercambiador de calor para una Piladora"*. (Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007.)
- [4]. Frank P. Incropera - David P. DeWitt. *"Fundamentos de Transferencia de Calor cuarta edición"*. (Apendice A, Tabla A4, Propiedades Termofísicas de la materia.)