ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"DISEÑO DE UNA PLANTA DE DESHIDRATACIÓN DE HIERBAS AROMÁTICAS"

INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

INGENIEROS MECÁNICOS

Presentada por:

Richard Eduardo Calle Benites

Jaime Julio Aparicio Baidal

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2011

AGRADECIMIENTO

A Dios, a nuestra familia que ha sido un gran apoyo siempre y a todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A NUESTROS PADRES

A NUESTROS HERMANOS

A NUESTROS BUENOS AMIGOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gustavo Guerrero M.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Marcelo Espinosa L.
DIRECTOR DE TESIS

Msc. Gonzalo Zabala O.
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Informe de Proyecto de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Richard Eduardo Calle Benites

Jaime Julio Aparicio Baidal

RESUMEN

El presente informe despliega la decisión de diseñar un sistema de deshidratado de hierbas aromáticas enfocándose en la Hierba Luisa como materia prima, que pueda ser usado por pequeños productores para mejorar su productividad y participación en el mercado nacional.

Los datos de secado de la Hierba Luisa son obtenidos mediante pruebas realizadas en el Laboratorio de Ingeniería en Alimentos de la ESPOL y bajo diferentes condiciones de apilado y tamaño de hojas, en base a los resultados se realiza la selección de equipos y diseño de la cámara de secado, conforme a la demanda nacional estimada del producto.

Se realizarán todos los cálculos necesarios, desde el cortado del producto, intercambiador de calor, selección de ventilador, selección del quemador, que permitan hacer posible el secado del producto con la calidad necesaria para competir con los productos existentes en el mercado.

Como resultado de lo detallado anteriormente, se obtiene un sistema de secado completo que cumple con las características necesarias para obtener

un producto de calidad, se presentará los costos estimados de la construcción e instalación mecánica del proyecto.

Índice General

RESUMEN II

ÍNDICE GENERAL IV

ABREVIATURAS VI

SIMBOLOGÍA VII

ÍNDICE DE FIGURAS VIII

ÍNDICE DE TABLAS IX

ÍNDICE DE PLANOS X

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1 3

1. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES 3
1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS HIERBAS AROMÁTICAS. 3
1.1.1. HIERBA LUISA 4
1.2. PRODUCCIÓN DE HIERBAS AROMÁTICAS EN EL ECUADOR. 5
1.3. CULTIVO DE HIERBAS AROMÁTICAS EN ECUADOR 6
1.4. FUNDAMENTOS DE DESHIDRATADO 7
1.4.1. DESHIDRATADO DE HIERBAS AROMÁTICAS 7
1.4.2. VELOCIDAD DE SECADO 10
1.4.3. ACTIVIDAD DE AGUA E ISOTERMAS 12
1.4.4. TIPOS DE SECADORES 13
1.4.4.1. SECADOR DE BANDEJAS. 13
1.4.4.2. SECADOR DE TÚNEL 15
1.4.4.3. SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL 18
1.4.4.4. SECADOR A CINTA TRANSPORTADORA 19

CAPÍTULO 2 21

2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO DE DESHIDRATADO 21
2.1. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE DESHIDRATADO 21

2.1.1. ISOTERMA DE ADSORCIÓN....22
2.2. CÁLCULOS Y CURVAS DE DESHIDRATADO....22
2.2.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS....23
CAPÍTULO 3....34

3. DISEÑO DE PLANTA Y EQUIPOS....34
3.1. CANTIDAD DE PRODUCTO A DESHIDRATAR....34
3.2. FORMA DE PRODUCTO Y TAMAÑO DE PICADO....35
3.3. BALANCE DE ENERGÍA DEL SISTEMA....45
3.3.1. BALANCE DE MASA EN LA CÁMARA DE SECADO....46
3.3.2. BALANCE DE MASA EN EL CALENTADOR....53
3.3.3. BALANCE DE ENERGÍA EN EL CALENTADOR....54
3.3.4. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SECADO....56
3.4. CÁLCULO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR....57
3.4.1. CÁLCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR....58
3.4.2 CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR....71
3.5. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS....72
3.5.1. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL VENTILADOR....72
3.5.2. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL QUEMADOR....80
3.6. CÁLCULO Y DIMENSIÓN DEL DESHIDRATADOR....81
CAPÍTULO 4....89

4. ANÁLISIS DE COSTOS....89
CAPÍTULO 5....92

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....92

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

Abreviaturas

FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Standard Testing Material
LMDT	Diferencias de temperatura media logarítmica
U	Coeficiente global de transferencia de calor
GLP	Gas licuado de petróleo

Simbología

m	metro
t	tiempo
m/s	metros por segundo
Aw	Actividad de agua
cm	centímetros
Kg/ha	kilogramos por hectárea
MPa	Mega pascales
Kg	kilogramos
Ø	diámetro
ºC	grados Celsius
Mm	milímetros
m²	metros cuadrados
Q	calor
Iy	Momento de inercia alrededor del eje y
A	Área
Sy	Resistencia a la fluencia
E	Módulo de rigidez del acero
Re	Número de Reynolds
Nu	Número de Nusselt
Φ	Potencia

Índice de Figuras

FIGURA 1.1: ESQUEMA DEL SECADOR DE BANDEJAS 14
FIGURA 1.2: ESQUEMA DEL SECADOR DE TÚNEL CONCURRENTE 16
FIGURA 1.3: ESQUEMA DEL SECADOR DE TÚNEL CONTRACORRIENTE 17
FIGURA 1.4: ESQUEMA DEL SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL 18

FIGURA 2.1 HUMEDAD LIBRE VS TIEMPO (PRUEBA 1) 25
FIGURA 2.2: CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO (PRUEBA 1) 25
FIGURA 2.3: HUMEDAD LIBRE VS TIEMPO (PRUEBA 2) 27
FIGURA 2.4: *CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO (PRUEBA 2)* 28
FIGURA 2.5: HUMEDAD LIBRE VS TIEMPO (PRUEBA 3) 29
FIGURA 2.6: CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO (PRUEBA 3) 30
FIGURA 2.7: HUMEDAD LIBRE VS TIEMPO (PRUEBA 4) 31
FIGURA 2.8: CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO (PRUEBA 4) 32

FIGURA 3.1: ESQUEMA MESA DE CORTE 37
FIGURA 3.2: ANÁLISIS DE ESFUERZOS MESA DE CORTE (INVENTOR) 43
FIGURA 3.3: DESPLAZAMIENTOS MESA DE CORTE (INVENTOR) 44
FIGURA 3.4: FACTOR DE SEGURIDAD MESA DE CORTE (INVENTOR) 45
FIGURA 3.5: CONFIGURACIÓN DE CÁMARA DE SECADO 46
FIGURA 3.6: CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO 50
FIGURA 3.7: BALANCE DE ENERGÍA CÁMARA DE SECADO 53
FIGURA 3.8: FACTOR DE CORRECCIÓN PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN FLUJO CRUZADO 58
FIGURA 3.9: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DE FLUJO CRUZADO 60
FIGURA 3.10: ARREGLO DE BANCO DE TUBOS 66
FIGURA 3.11: CONFIGURACIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AIRE 74
FIGURA 3.12: COEFICIENTES DE PÉRDIDAS DE PRESIÓN PARA DUCTOS (CODOS) 78
FIGURA 3.13: DISTRIBUCIÓN DE VARILLAS SOPORTES EN CÁMARA DE SECADO 84
FIGURA 3.14: DISTRIBUCIÓN DE VARILLAS SOPORTES EN CÁMARA DE SECADO 88

Índice de Tablas

TABLA 1 PRODUCCIÓN DE HIERBAS AROMÁTICAS EN ECUADOR.....7
TABLA 2 VALORES PARA CONTENIDO DE HUMEDAD DE ALGUNAS HIERBAS ACEPTADAS EN EL MERCADO 9
TABLA 3 DATOS DE SECADO PRUEBA 1 23
TABLA 4 RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 1..23
TABLA 5 DATOS DE SECADO PRUEBA 2 26
TABLA 6 RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 2..27
TABLA 7 DATOS DE SECADO PRUEBA 3 28
TABLA 8 RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 3..29
TABLA 9 DATOS DE SECADO PRUEBA 4 30
TABLA 10 RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 4..31
TABLA 11 FACTOR DE FIJACION DE LOS EXTREMOS (COLUMNAS).....39
TABLA 12 DATOS PARA EL CÁLCULO 55
TABLA 13 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....59
TABLA 14 DIMENSIONES DE TUBERIA PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR.....61
TABLA 15 CONSTANTE DE LA ECUACION DE NUSSELT.....69
TABLA 16 ITERACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA ...71
TABLA 17 RESULTADOS OBTENIDOS PARA SELECCIÓN DE VENTILADOR 73
TABLA 18 VALORES DE κ´.....76

Índice de Planos

PLANO 1. LAYOUT GENERAL DE PLANTA.

INTRODUCCIÓN

Un aspecto crítico de calidad en las hierbas es su aroma, el cual es muy sensible de que se pierda en tratamientos como el secado, por lo que habrá que buscar la combinación adecuada de tiempo y temperatura para minimizar su pérdida ya que esta es la principal característica de calidad que tienen las hierbas aromáticas.

Otro objetivo es la conservación de las hierbas, entonces el deshidratado se convierte en un factor importante para conservarlas frescas el mayor tiempo posible, por lo tanto la primera parte de este proyecto consistirá en obtener los parámetros de proceso de forma experimental usando un secador de escala piloto que servirá para obtener dichos resultados. Este proyecto de graduación se enfoca al deshidratado de la hierba Luisa que es muy usada en nuestro medio con fines medicinales.

Se utilizará distintas metodologías como las Isotermas de adsorción de la cual se obtendrá la Humedad de Equilibrio del producto, luego se obtendrá las curvas de velocidad del secado mediante la cual se obtiene los datos de la Humedad crítica que será de mucha importancia para los cálculos de tiempo de secado del producto.

Entonces se analizarán los parámetros referentes al diseño de deshidratadores, se realizarán los cálculos necesarios para determinar la validez de los elementos a utilizar y se elaborarán los planos para su construcción.

Para finalizar el proyecto se presentará memorias técnicas, planos de diseño, de visualización del proyecto y análisis de costos.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

La deshidratación de hierbas aromáticas es un proceso basado en la transferencia de calor y movimiento de aire en un sistema cerrado para aprovechar de mejor manera el diseño.

El deshidratado es un proceso artificial industrial, en el que se recrean los procesos que ocurren en la naturaleza. El proceso de deshidratado es la extracción de humedad mediante corrientes de aire caliente seco controladas, dirigidas y sostenidas a diversas temperaturas y velocidades dependiendo del tipo de producto.

1.1. Descripción de las hierbas aromáticas.

Las hierbas aromáticas, son unas plantas que nacen en el campo o son cultivadas en los huertos por sus cualidades aromáticas, condimentarias e incluso medicinales.

Durante mucho tiempo, y por lo general, las hierbas fueron ignoradas, excepto la menta, el perejil y el ajo. Algunas sólo eran localmente conocidas. En términos generales pertenecen a tres familias botánicas:

- Las aliáceas: ajo, cebolla, cebolleta.
- Las apiáceas: angélica, hinojo, perejil.
-Las lamiáceas: mejorana, menta, orégano.

Este proyecto de grado se enfoca en la deshidratación de la hierba Luisa que es de fácil obtención y muy conocida en el medio ecuatoriano.

1.1.1. Hierba Luisa

La Hierba Luisa cuyo nombre botánico es Lippia triphylla Kuntze, se trata de una planta medicinal que puede alcanzar dos metros de altura, cuyas hojas alargadas son puntiagudas y sus flores de color lila pálido se forman en espigas. Necesita un lugar cálido y resguardado para poder sobrevivir en épocas de frío, sus hojas son un poco rugosas y con un perfume penetrante a limón, se pueden utilizar tanto secas como frescas y tienen diversas aplicaciones tanto culinarias como medicinales e incluso industriales pues se suelen añadir trituradas a los polvos de talco. Como hierba medicinal cabe destacar su gran valor como tónico estomacal ya que resulta muy eficaz en los problemas digestivos, cuando hay gases o flatulencias,

en las digestiones lentas, dolor de estómago, vómitos y también, debido a su poder tranquilizante, en las palpitaciones o vértigos que proceden de estados de nervios o ansiedad.

1.2. Producción de Hierbas Aromáticas en el Ecuador.

El tema hierbas medicinales y aromáticas, su uso y potencial para la exportación es un tema que ha tomado fuerza últimamente en el Ecuador. Se estima que en nuestro país son conocidas aproximadamente 500 especies de plantas entre medicinales y aromáticas. De ellas, 228 son registradas como las más utilizadas y unas 125 identificadas como las más comercializadas. Su uso y comercio es extenso:

• El 80% de la población ecuatoriana depende de la medicina tradicional y por consiguiente de las plantas o productos naturales, basados en estas para la salud y bienestar.

• Aunque faltan cifras de las exportaciones (como también de las importaciones, sobre las que se realiza reexportaciones en frecuentes casos) por la informalidad de todo el comercio con las plantas medicinales y sus derivados, se estima que alguna demanda internacional es suplida por Ecuador debido a la diversidad de hierbas encontradas en el medio.

A pesar de esta importancia global del tema, no existen datos oficiales reales sobre las importaciones y exportaciones realizadas por el país en materia de hierbas aromáticas, plantas medicinales y productos derivados, dadas estas limitaciones, es bastante complicado hacer un perfil de la producción nacional y su potencial para la diversificación de las exportaciones no tradicionales, sin antes contar con un estudio a fondo por un equipo profesional interdisciplinario.

1.3. Cultivo de Hierbas Aromáticas en Ecuador

A continuación se presentan algunos sitios tanto en la Sierra como en la Costa que han sido identificados como zona de cultivo en el Ecuador para este estudio. En la Tabla 1 se presenta los sitios de mayor producción de hierbas aromáticas, así como los productores registrados para realizar el proceso de secado y comercialización.

En realidad, la producción se da en todos los sitios agroecológicos y microclimas, dependiendo de la variedad. Así por ejemplo, los páramos del país son zonas con buena aptitud para ciertas especies que desarrollan en la altura mayor aroma o concentran un porcentaje más alto de aceites esenciales.

TABLA 1

PRODUCCIÓN DE HIERBAS AROMÁTICAS EN ECUADOR

En la Sierra	
Provincia	**Productores/Procesadores**
Loja	ILE
Chimborazo	CEDEIN, ERPE, JAMBI KIWA
Bolivar	Casa Cayambe
Imbabura	AGROALEGRE
Pichincha	Asociación Mujeres de Olmedo
Cotopaxi Tungurahua	Aromas del Tungurahua
En la Costa	
Guayas	Península de Santa Elena
Los Ríos	AGROTRADING

Estudio de Oferta y Demanda del sector de productos naturales. Corpei

Sobre la superficie cultivada con estas especies no existen datos reales del número de hectáreas que posee el Ecuador. Algunas plantas pueden adaptarse a diferentes climas y sitios, lo que permite cultivarlas de acuerdo a las posibilidades de producción, demanda y cercanía a los mercados o lugares de procesamiento.

1.4. Fundamentos de Deshidratado

1.4.1. Deshidratado de Hierbas Aromáticas

Las hierbas aromáticas son plantas que se pueden encontrar en diferentes tipos de climas e incluso se puede disfrutar de ellas en nuestro propio hogar.

La razón más importante desde el punto de vista técnico por la que se seca las hierbas es su conservación; por este método se promueve el mantenimiento de sus componentes y se evita la proliferación de microorganismos, se debe tener en cuenta la presentación para la comercialización del producto, por lo tanto la desecación debe llevarse a cabo en las mejores condiciones para que las hierbas no pierdan nada del aspecto que deben presentar, para que cautiven y ejerzan la mayor atracción, así serán más apreciadas, más demandadas y sobre todo mejor pagadas.

La cantidad de agua a extraer no debe superar ciertos valores, la planta no debe presentarse al comercio reseca y quebradiza, tal que al manipularla se convierta en polvo. En general, en el comercio existen valores establecidos de contenido de humedad para cada hierba o sus partes.

TABLA 2

VALORES PARA CONTENIDO DE HUMEDAD DE ALGUNAS HIERBAS ACEPTADAS EN EL MERCADO

HIERBA	HUMEDAD MAXIMA
Albahaca	0.1
Laurel	0.09
Orégano	0.11
Romero	0.09
Estragón	0.1
Tomillo	0.09

Estudio de Oferta y Demanda del sector de productos naturales. Corpei

El aire es el que absorbe el vapor de agua que se retira de las hierbas por lo que no debe estar saturado, es decir, su humedad relativa debe ser baja, sea tanto que se utilice secado al aire libre como secado mecánico, y deberá renovarse a medida que sea necesario en tanto el producto no haya cedido el agua que contiene en exceso.

Cada producto reclama una desecación diferente, no solamente por la cantidad de agua que contiene, sino por el aspecto que debe presentar; las hierbas y las hojas deben secarse generalmente a temperatura moderada, en presencia de una cantidad grande de agua.

Se pueden utilizar diversos métodos para el secado, sea que se efectúe en forma natural o mecánica; de ésta última el más utilizado es el secado por aire caliente forzado.

1.4.2. Velocidad de Secado

Se define como el parámetro que relaciona la cantidad de agua que se elimina durante un tiempo determinado en un área de secado definida.

Para calcular la velocidad de secado, se determina primero el peso de sólidos secos por medio de la siguiente relación:

$$Ws = m\ (\%s.s.) \qquad \text{(Ecuación 1.1)}$$

Donde:

Ws = Peso de sólidos secos

m = Masa inicial de la muestra

%s.s.= Porcentaje de sólidos secos en la muestra

Luego se realizan los cálculos para obtener la humedad base seca, mediante la siguiente fórmula, considerando que Ws es constante:

$$Xt = \frac{W - Ws}{Ws} \qquad \text{(Ecuación 1.2)}$$

Donde:

Xt = Humedad en base seca de la muestra

W = Peso de la muestra

Ws = Peso de sólidos secos

Adicionalmente, para determinar la velocidad de secado, se debe calcular el parámetro de humedad libre, el cual se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$X = Xt - X^* \qquad \text{(Ecuación 1.3)}$$

Donde:

X = Humedad Libre

Xt = Humedad en base seca de la muestra

X* = Humedad de equilibrio de la muestra

La determinación de la X* (humedad de equilibrio que alcanzará el producto), está en función de la HR del ambiente de trabajo y se obtiene de la isoterma.

Posteriormente se calcula la humedad media, promediando los valores de humedad libre previamente obtenidos. Finalmente la velocidad de secado se obtiene relacionando la cantidad de agua que se elimina durante un tiempo determinado en el área de secado definida. Es decir, se calcula un diferencial de X y del tiempo (t) para calcular la velocidad de secado mediante la siguiente fórmula:

$$R = \frac{Ws}{A} x \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right) \qquad \text{(Ecuación 1.4)}$$

Donde:

Ws = Peso de sólidos secos

A = Área superficial de la muestra

Δx = Diferencial de humedad libre media

Δt = Diferencial de intervalos de tiempo

1.4.3. Actividad de Agua e Isotermas

La actividad de agua (Aw) es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas (Por ejemplo oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacción de Maillard y desarrollo microbiano).

La isoterma de un producto relaciona gráficamente, a una temperatura constante, el contenido en humedad de equilibrio de un producto con la actividad del agua del mismo. Las isotermas son importantes para el análisis y diseño de varios procesos de transformación de alimentos, tales como secado, mezcla y envasado de los mismos.

La obtención de la isoterma de adsorción de la hierba Luisa es de suma importancia para la determinación de condiciones óptimas de secado.

1.4.4. Tipos de Secadores

A continuación están enumerados diferentes tipos de secadores existentes en el mercado:

1.4.4.1. Secador de Bandejas.

Esencialmente consisten en una cabina aislada provista interiormente de un ventilador para circular aire a través de un calentador; el aire caliente sale por una rejilla de láminas ajustables y es dirigido, horizontalmente entre bandejas cargadas de hierba, o verticalmente a través de las bandejas perforadas y el producto.

Estos secaderos pueden disponer de reguladores para controlar la velocidad de aire nuevo y la cantidad de aire de recirculación. Los calentadores del aire pueden ser quemadores directos de gas, serpentines calentados por vapor o, en los modelos más pequeños, calentadores de resistencia eléctrica.

Generalmente, en los sistemas de cabina se utilizan velocidades de aire de 2 a 5 m/seg., para los de flujo transversal y de 0,5 a 1,25 m/seg., en los de flujo ascendente por cada metro cuadrado de bandeja.

Los secadores de cabina resultan relativamente baratos de construcción y de mantenimiento además son muy flexibles.

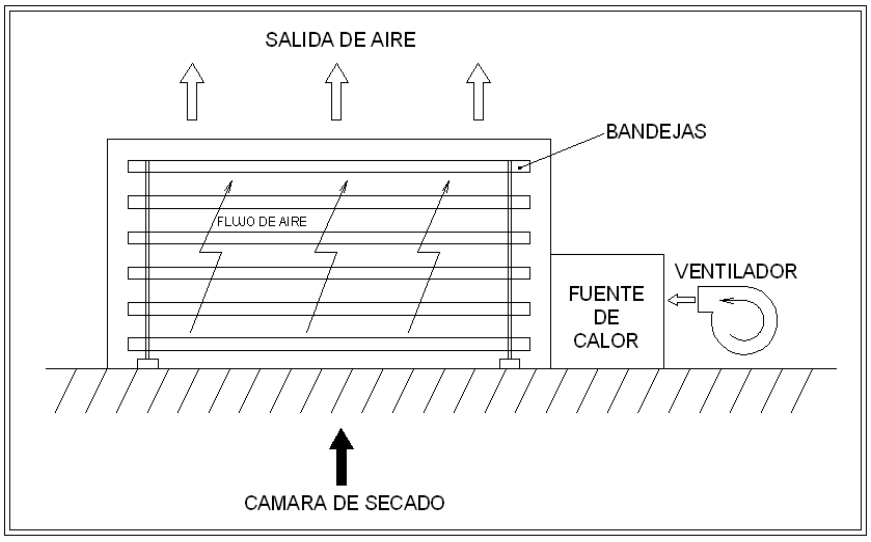


Figura 1.1: Esquema del secador de bandejas

1.4.4.2. Secador de túnel

Este modelo mostrado en la Figura 1.2, permite desecar en forma semicontínua con una gran capacidad de producción. Consiste en un túnel que puede tener hasta un poco mas de 20 metros de longitud con una sección transversal rectangular de, mas o menos, hasta 2 x 2 metros.

El producto a secar se extiende en capas uniformes sobre bandejas de malla metálica, listones de madera, etc. Las bandejas se apilan sobre carros o vagonetas dejando espacios entre las bandejas para que pase el aire de desecación, las vagonetas cargadas se introducen una a la vez, a intervalos adecuados, en el túnel de desecación; a medida que se introduce una carretilla por el “extremo húmedo" del túnel se retira otra carretilla de producto seco por el "extremo seco". El aire se mueve mediante ventiladores que lo hacen pasar a través de calentadores y luego fluye horizontalmente entre las bandejas, aunque también se produce cierto flujo a través de las mismas. Normalmente se emplean velocidades del aire del orden de 2,5 a 6,0 m/s.

Los túneles de desecación suelen clasificarse basándose en la dirección relativa del movimiento del producto y del aire.

a) Secador de túnel concurrente: Las principales características de esta clase de túnel son:

1) Las direcciones de la corriente del aire y del producto en desecación son las mismas.

2) Permite alcanzar elevadas velocidades de evaporación inicial debido a que pueden utilizarse temperaturas del aire relativamente altas sin riesgo de sobrecalentar el producto.

3) A medida que el producto avanza a lo largo del túnel se va poniendo en contacto con aire cada vez más frío, por lo cual se evita que el calor dañe al producto.

4) Es difícil conseguir contenidos en humedad muy bajos debido a que al final del túnel las condiciones de desecación son pobres.

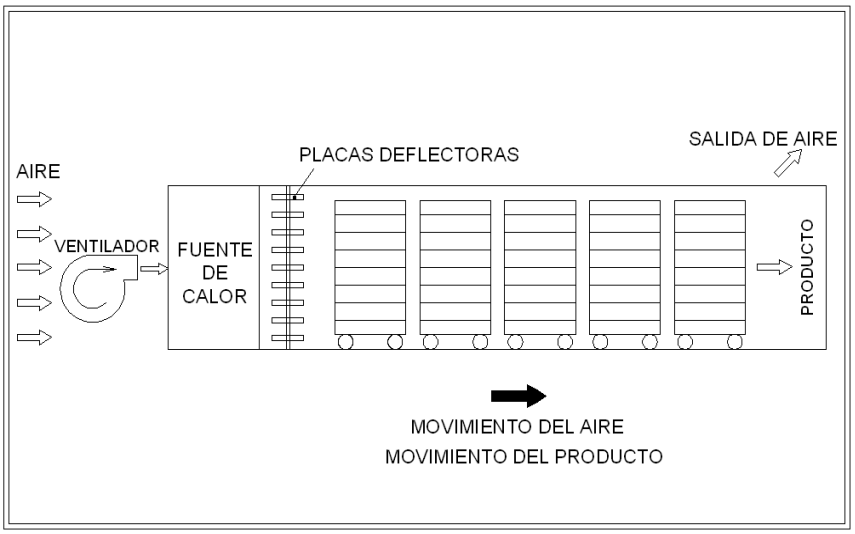


Figura 1.2: Esquema del secador de túnel concurrente

b) Secador de túnel contracorriente: En el modelo mostrado en la Figura 1.3, las direcciones de la corriente del aire y del producto en desecación son contrarias. Las principales características de esta clase de túnel son:

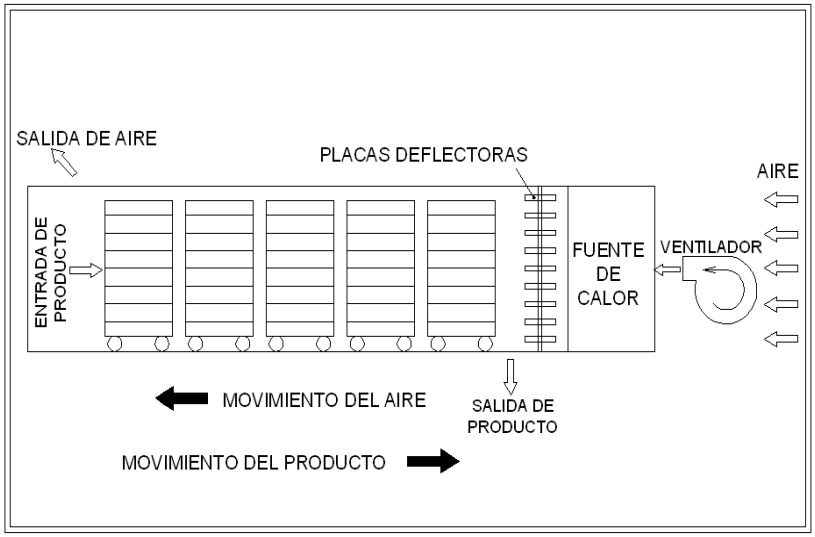


Figura 1.3: Esquema del secador de túnel contracorriente

1) La velocidad de desecación es relativamente pobre en la parte inicial del túnel.

2) Las condiciones en el final de túnel - aire seco y caliente - permiten conseguir contenidos de humedad bajos, pero existe el riesgo de sobrecalentamiento del material vegetal.

3) Este sistema es generalmente más económico en el uso del calor que el concurrente.

Estos sistemas pueden combinarse para lograr mejor control de las variables, la combinación más empleada consta de un túnel primario concurrente seguido de un túnel a contracorriente. Las ventajas de este sistema es un acabado más rápido y un contenido de humedad final bajo.

1.4.4.3. Secador de flujo transversal

En el modelo presentado en la Figura 1.4, la corriente de aire caliente fluye desde los costados del túnel. Se encuentran, desde los que proveen calor desde un solo lateral, no son los más convenientes, y los que suministran calor desde ambos lados del túnel y a lo largo del recorrido. Las principales características de este sistema son:

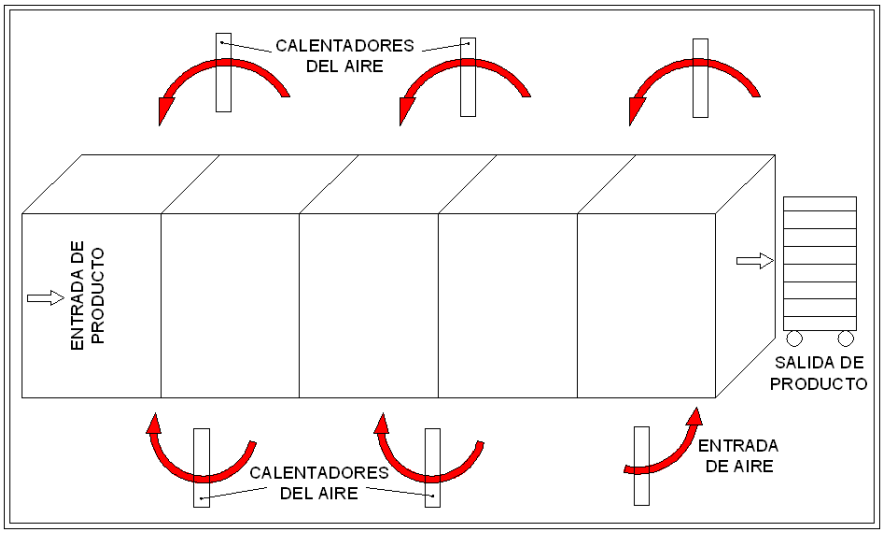


Figura 1.4: Esquema del secador de flujo transversal

1) Puede conseguirse un buen control pues dispone de calentadores de aire entre las distintas fases.

2) Como consecuencia de la frecuencia con que cambia la dirección del aire se obtiene un producto de humedad uniforme.

3) Su funcionamiento y mantenimiento son más complejos y el costo es mayor.

1.4.4.4. Secador a cinta transportadora

Es también un túnel de desecación pero el producto húmedo es conducido a través del sistema sobre una cinta transportadora que sustituye a las vagonetas.

Estos túneles pueden utilizar cualquiera de los sistemas antes mencionados, si bien el método más corriente en la práctica es el flujo a través o vertical en el cual el aire atraviesa la cinta transportadora y la capa de producto.

Las principales características son:

1) El producto debe estar bien subdividido para que permita un buen flujo de aire a través de la capa de producto.

2) Se consiguen altas velocidades de desecación.

3) El equipo es para volúmenes medianos a grandes de producto y se consiguen valores de humedad relativa entre 10 y 15%.

Muchas veces el producto sufre un fenómeno de contracción, formación de costra y deformación. Otra desventaja es también el alto costo de operación de este tipo de secadores, debido a las pérdidas en carga, descarga y mano de obra, lo cual se podría reducir con el tratamiento previo del producto.

CAPÍTULO 2

2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO DE DESHIDRATADO

Los parámetros a obtener para el proceso de deshidratado en este capítulo servirán como guía y datos iniciales para el análisis y diseño del secador de hierbas aromáticas.

2.1. Determinación de las curvas de deshidratado

Para la obtención de las curvas de deshidratado deberá conocerse que los datos experimentales fueron logrados con un secador que consiste en un sistema de calentamiento con resistencias eléctricas y un ventilador de 60 Hz, 220 V, 5600 W, ubicado en el Laboratorio de Secado de Alimentos de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción de la ESPOL. La información obtenida que hace referencia al efecto de las condiciones externas del secado, son el contenido de humedad del producto (que en este proyecto es la hierba Luisa) en función del tiempo, bajo condiciones de secado constantes; tales como, velocidad del aire, temperatura, humedad y presión.

Se han obtenido las curvas de secado en base a diferentes tamaños de hoja, la primera tiene 3.5 cm x 1.5 cm y luego el secado de una hoja de 2 cm x 1.5 cm para poder compararlas y obtener el valor óptimo para el proceso de secado, además se han hecho análisis a diferentes condiciones de apilamiento de hojas, es decir, se han puesto unas sobre otras para analizar distintas condiciones de secado.

Para obtener el peso de la muestra en cada análisis se utilizo una balanza electrónica de precisión calibrada.

2.1.1. Isoterma de Adsorción

Para el análisis se obtiene la humedad de equilibrio mediante la isoterma de adsorción, con estos datos se realizan las curvas de deshidratado y se procede al cálculo del deshidratador en base a la velocidad de secado y la humedad libre del producto.

2.2. Cálculos y curvas de deshidratado

Con los datos obtenidos se graficaron las curvas de secado y la isoterma de adsorción de todas las pruebas efectuadas en el secador de bandejas de la ESPOL. Se analizaron 4 tipos de muestras de hierba Luisa en diversas condiciones mencionadas anteriormente, en la primera prueba

se procede a analizar los datos, y en los cálculos obtenidos en las siguientes pruebas se colocan los valores para mayor simplicidad.

2.2.1. Resultados experimentales obtenidos

La primera prueba se realiza con hojas de dimensiones de 3.5 cm. x 1.5 cm. colocadas sobre una malla metálica de 8.8 cm x 11 cm.

TABLA 3
DATOS DE SECADO PRUEBA 1

DATOS	
Ws	0,67972332
%solidos	37,56
Xequilibrio	0.002
Area (m2)	0,0147
Lado 1	0,035
Lado2	0,015

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

TABLA 4
RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 1

t (min)	Peso(g)	Xt	Xlibre	Xprom	ΔX	Δt	R
0	1,8097	1,662407	1,662207				
5	1,6297	1,397593	1,397393	1,5298	0,264814	-5	2,4489796
15	1,4097	1,073932	1,073732	1,235563	0,323661	-10	1,4965986
25	1,2197	0,794407	0,794207	0,933969	0,279525	-10	1,292517
35	1,1997	0,764983	0,764783	0,779495	0,029424	-10	0,1360544
45	1,1397	0,676712	0,676512	0,720647	0,088271	-10	0,4081633
65	1,1097	0,632576	0,632376	0,654444	0,044136	-20	0,1020408
85	1,0397	0,529593	0,529393	0,580884	0,102983	-20	0,2380952
105	0,9997	0,470745	0,470545	0,499969	0,058847	-20	0,1360544
135	0,8497	0,250067	0,249867	0,360206	0,220678	-30	0,3401361
165	0,7997	0,176508	0,176308	0,213088	0,073559	-30	0,1133787
195	0,7197	0,058813	0,058613	0,117461	0,117695	-30	0,1814059
225	0,6797	-3,4E-05	-0,00023	0,029189	0,058847	-30	0,0907029

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

En la tabla 4 se muestran los valores obtenidos en las pruebas (tiempo y peso) de la hierba Luisa en cada intervalo y los resultados obtenidos mediante una hoja de cálculo usando las ecuaciones de deshidratado descritas en el capítulo anterior, de donde se tiene:

El tiempo en que la muestra ha estado en el proceso de secado y los resultados de peso, humedad en base seca (Xt), humedad libre (Xlibre), humedad promedio (Xprom), diferencial de humedad (ΔX), diferencial de tiempo (Δt) y la velocidad de secado (R).

Los valores de humedad en base seca y humedad libre que se encuentran en la Tabla 4 se obtienen mediante las ecuaciones presentadas en el Capítulo 1, (ecuaciones 1.2 y 1.3). Para calcular la humedad promedio se utiliza la siguiente ecuación:

$$Xpromi = \frac{Xlibrei + Xlibrei - 1}{2} \qquad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Para el cálculo de la velocidad de secado (R) se utiliza la ecuación 1.4 mostrada en Capítulo 1.

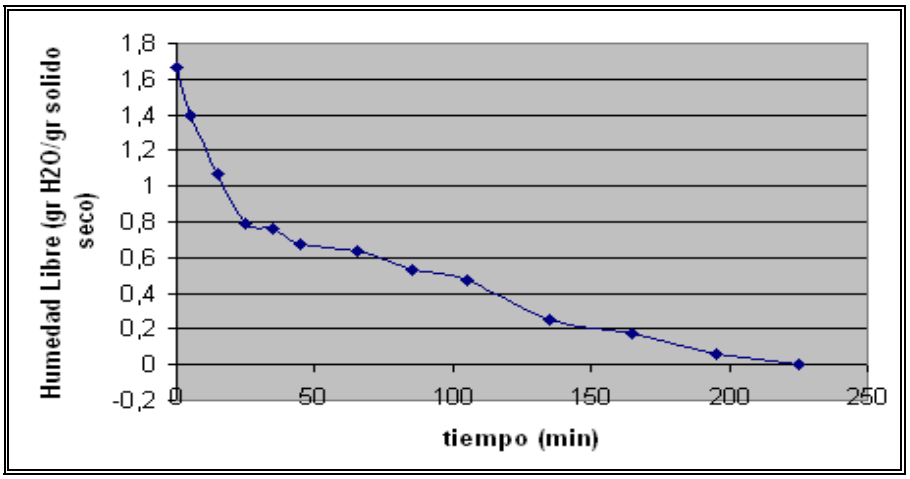


Figura 2.1 Humedad Libre vs Tiempo (Prueba 1)

En la Fig. 2.1 se muestra el contenido de humedad libre en función del tiempo de secado donde se aprecia el descenso de la humedad mientras la hierba Luisa está más tiempo en el secador, obteniendo un constante descenso de humedad durante todo el proceso.

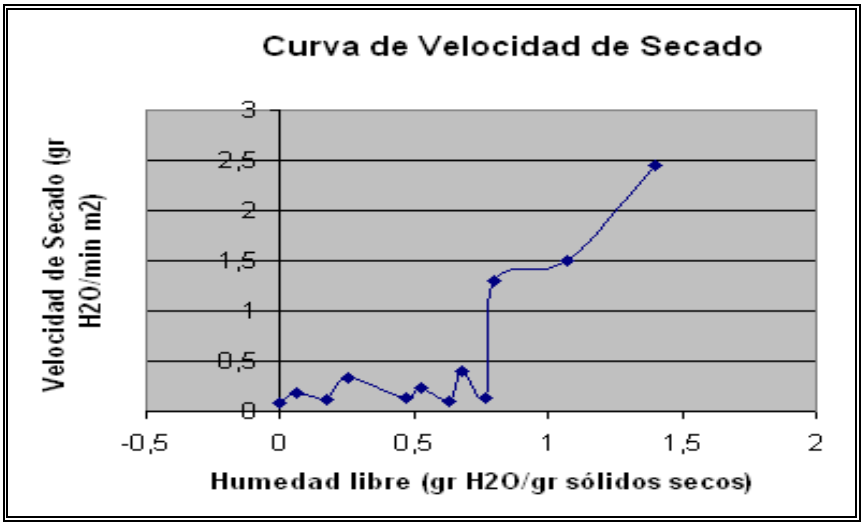


Figura 2.2: Curva de velocidad de secado (Prueba 1)

En la Figura 2.2 se muestra la curva de la velocidad de secado, donde se aprecia que no tiene un patrón definido, tiene puntos donde aumenta la velocidad y en otros disminuye, no se encuentra un tramo de velocidad constante en el producto totalmente determinado y luego se produce una caída de velocidad de secado en el punto entre 0.5 y 1 de humedad libre, lo que infiere a que la superficie del producto está seca completamente.

Se realiza un segundo análisis usando hojas con medidas de 2 cm. x 1.5 cm. colocadas sobre la misma malla metálica usada en la primera prueba.

TABLA 5
DATOS DE SECADO PRUEBA 2

DATOS	
Ws	0,51072817
%solidos	34,01
Xequilibrio	0,002
Area (m2)	0,0084
Lado 1	0,02
Lado2	0,015

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

TABLA 6
RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 2

t(min)	Peso(g)	Xt	Xlibre	Xprom	DX	Dt	R
0	1,5017	1,940312	1,940112				
5	1,3407	1,625075	1,624875	1,782494	0,315236	-5	3,8333333
15	1,0807	1,115998	1,115798	1,370337	0,509077	-10	3,0952381
25	0,9807	0,9202	0,92	1,017899	0,195799	-10	1,1904762
35	0,8807	0,724401	0,724201	0,8221	0,195799	-10	1,1904762
45	0,8607	0,685241	0,685041	0,704621	0,03916	-10	0,2380952
65	0,8207	0,606921	0,606721	0,645881	0,07832	-20	0,2380952
85	0,7907	0,548182	0,547982	0,577352	0,05874	-20	0,1785714
105	0,7107	0,391543	0,391343	0,469662	0,156639	-20	0,4761905
135	0,6107	0,195744	0,195544	0,293443	0,195799	-30	0,3968254
165	0,5907	0,156584	0,156384	0,175964	0,03916	-30	0,0793651
195	0,5707	0,117424	0,117224	0,136804	0,03916	-30	0,0793651
225	0,5107	-5,5E-05	-0,00026	0,058485	0,117479	-30	0,2380952

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

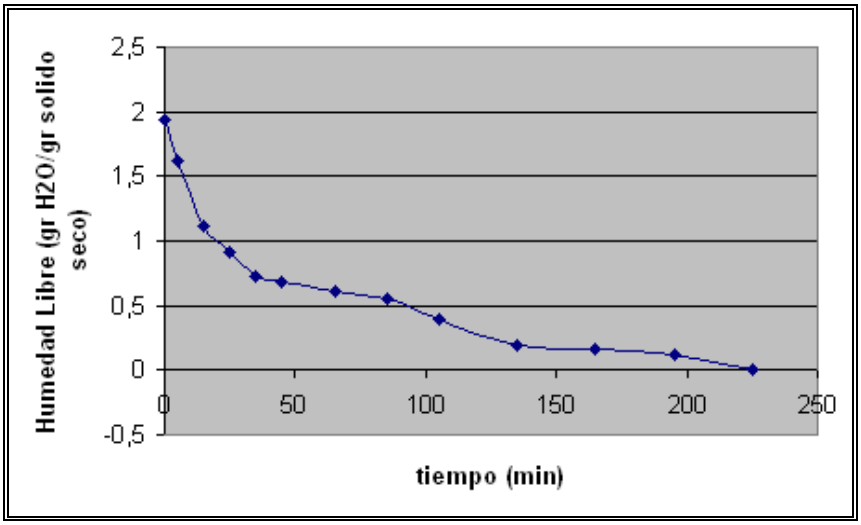


Figura 2.3: Humedad Libre vs Tiempo (Prueba 2)

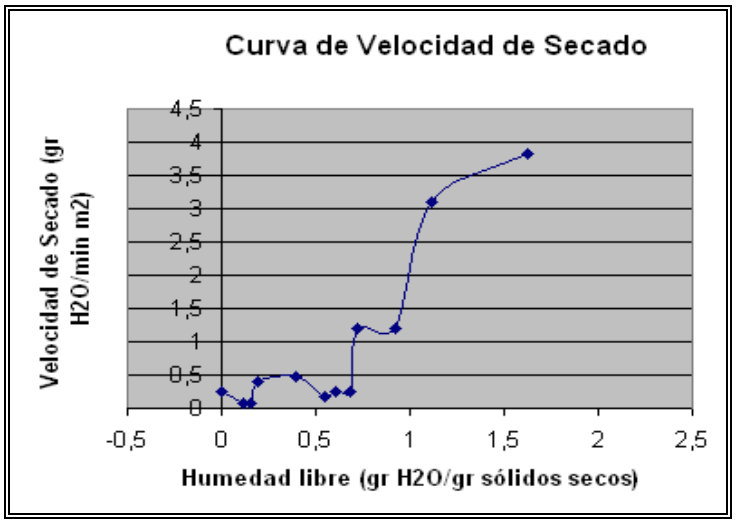


Figura 2.4: ***Curva de velocidad de secado (Prueba 2)***

Para efectuar un tercer análisis se utiliza hojas con medidas normales encontradas en el mercado, colocadas sobre la misma malla metálica, apiladas unas sobre otras alcanzando un espesor de 1 cm.

TABLA 7

DATOS DE SECADO PRUEBA 3

DATOS	
Ws	23,80972
%solidos	23,32
Xequilibrio	0,002
Area (m2)	1,4812
Lado 1	0,23
Lado2	0,23

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

TABLA 8

RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 3

t(min)	Peso(g)	Xt	Xlibre	Xprom	DX	Dt	R
0	102,1	3,288165	3,287765				
5	96,65	3,059267	3,058867	3,173316	0,228898	-5	0,7358898
15	88,71	2,725789	2,725389	2,892128	0,333477	-10	0,5360518
25	79,9	2,355772	2,355372	2,540381	0,370017	-10	0,594788
35	72,3	2,036575	2,036175	2,195774	0,319197	-10	0,5130975
45	65,01	1,730398	1,729998	1,883086	0,306177	-10	0,4921685
65	53,76	1,257901	1,257501	1,493749	0,472496	-20	0,3797597
85	47,81	1,008003	1,007603	1,132552	0,249898	-20	0,2008507
105	41,29	0,734166	0,733766	0,870685	0,273838	-20	0,2200918
135	34,54	0,450668	0,450268	0,592017	0,283498	-30	0,1519039
165	29,79	0,25117	0,25077	0,350519	0,199498	-30	0,1068953
195	26,82	0,126431	0,126031	0,1884	0,124739	-30	0,0668377
225	24,82	0,042431	0,042031	0,084031	0,083999	-30	0,0450086
240	23,81	1,18E-05	-0,00039	0,020822	0,04242	-15	0,0454586

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

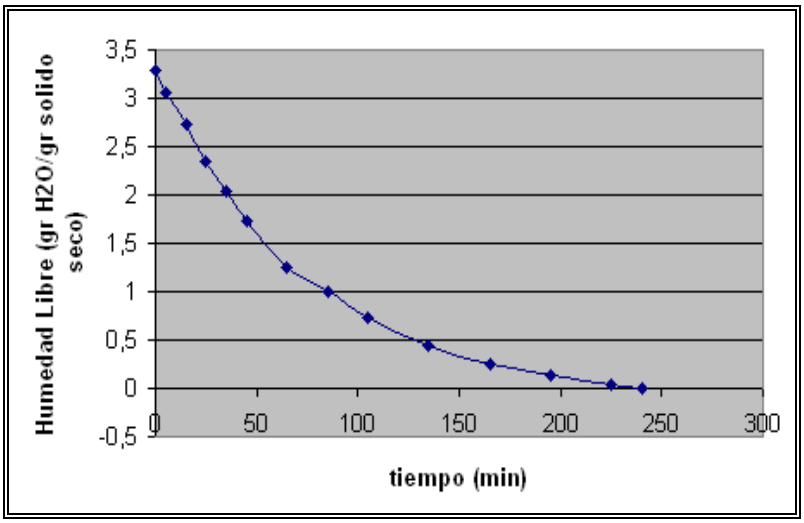


Figura 2.5: Humedad Libre vs Tiempo (Prueba 3)

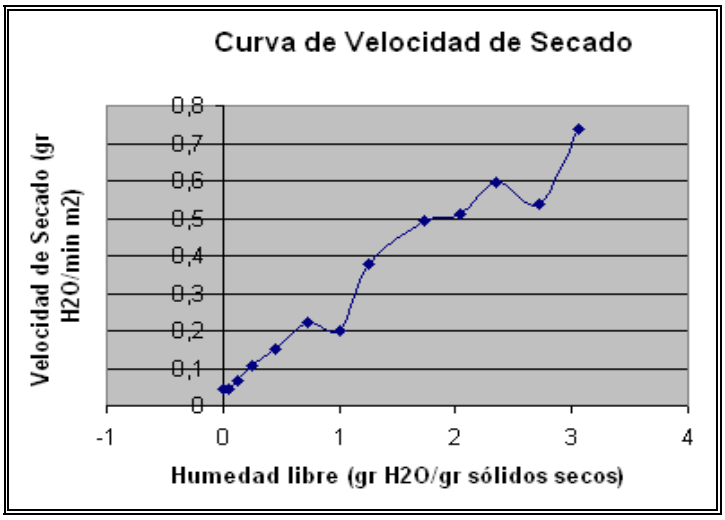


Figura 2.6: Curva de velocidad de secado (Prueba 3)

En el cuarto análisis se utiliza hojas con medidas estándar, colocadas sobre la misma malla metálica, apiladas unas sobre otras alcanzando un espesor de 2 cm.

TABLA 9

DATOS DE SECADO PRUEBA 4

DATOS	
Ws	33,94344
%solidos	27,96
Xequilibrio	0,002
Area (m2)	1,4812
Lado 1	0,23
Lado2	0,23

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

TABLA 10

RESULTADOS DEL SECADO DE HIERBA LUISA PRUEBA 4

t(min)	Peso(g)	Xt	Xlibre	Xprom	DX	Dt	R
0	121,4	2,576538	2,576138				
5	110,29	2,249229	2,248829	2,412483	0,327309	-5	1,500135
15	99,58	1,933704	1,933304	2,091066	0,315525	-10	0,7230624
25	96,42	1,840608	1,840208	1,886756	0,093096	-10	0,2133405
35	85,89	1,530386	1,529986	1,685097	0,310222	-10	0,7109101
45	78,5	1,312671	1,312271	1,421128	0,217715	-10	0,4989198
65	65,3	0,923789	0,923389	1,11783	0,388882	-20	0,4455847
85	56,67	0,669542	0,669142	0,796265	0,254246	-20	0,2913179
105	50,24	0,480109	0,479709	0,574426	0,189433	-20	0,2170537
135	44,57	0,313067	0,312667	0,396188	0,167043	-30	0,1275992
165	40,86	0,203767	0,203367	0,258017	0,109299	-30	0,0834909
195	37,85	0,11509	0,11469	0,159029	0,088677	-30	0,0677379
225	36,32	0,070015	0,069615	0,092153	0,045075	-30	0,0344315
255	34,28	0,009915	0,009515	0,039565	0,0601	-30	0,0459087
275	34,26	0,009326	0,008926	0,009221	0,000589	-20	0,0006751
290	33,95	0,000193	-0,00021	0,00436	0,009133	-15	0,0139527

Datos experimentales para obtención de curvas de secado

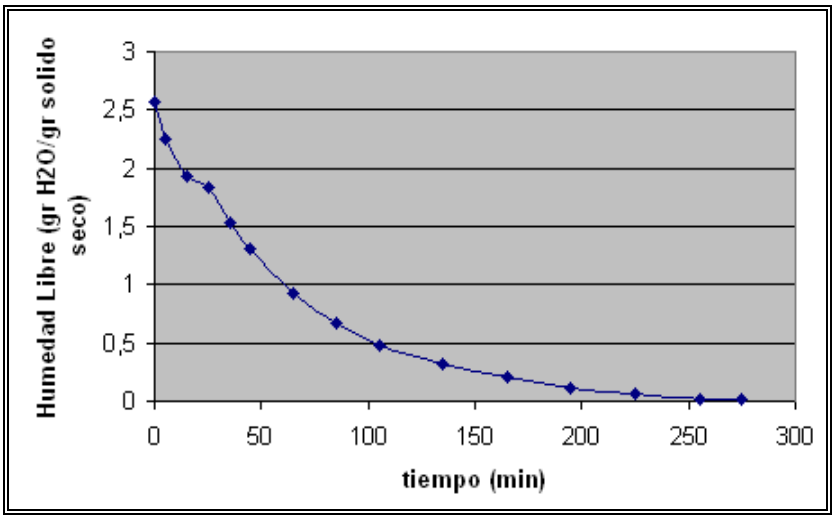


Figura 2.7: Humedad Libre vs Tiempo (Prueba 4)

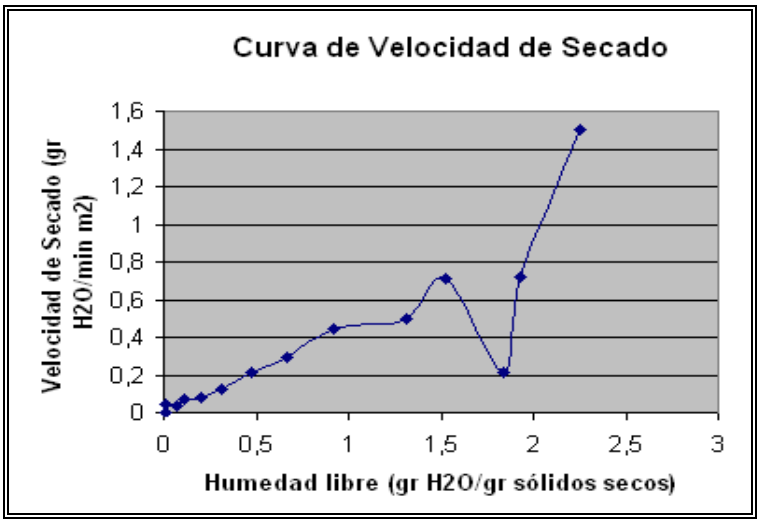


Figura 2.8: Curva de velocidad de secado (Prueba 4)

En esta última muestra se obtiene que la velocidad de secado disminuye considerablemente al inicio del deshidratado por el apilado del producto y luego se observa un periodo de velocidad constante pero bajo en comparación con las dos primeras pruebas.

Conclusiones de las Pruebas Realizadas

Con los datos y pruebas realizadas a diferentes condiciones de la hierba Luisa se concluye que el comportamiento del producto depende de la disposición de este en los gabinetes de deshidratado, ya que a medida que se aumenta el volumen de hierba en el gabinete, el tiempo necesario para obtener un producto deshidratado con las condiciones finales necesarias es mayor.

Por consiguiente para efectos del estudio, es recomendable partir de la anterior conclusión tomando como punto de partida los volúmenes de hierba Luisa a deshidratar, ya con esta información se puede definir los parámetros a considerar para el diseño de la cámara y los gabinetes a utilizar en el proceso de deshidratado.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE PLANTA Y EQUIPOS

En este capítulo se procede al diseño del secador que mejor se ajuste a las necesidades del mercado, con la demanda aproximada del producto y tomando en cuenta las propiedades de la hierba Luisa presentadas en el capítulo 2.

En el diseño del secador de bandejas, se va a enfocar desde el cortado del producto, diseño del intercambiador de calor y selección de equipos como ventilador y quemador.

3.1. Cantidad de producto a deshidratar

Como se indico anteriormente no hay información real de la producción de la hierba Luisa en el Ecuador, incluso en la información del Banco Central del Ecuador no se encuentran datos exactos de la demanda, sin embargo de fuente de un productor ILE del Ecuador el rendimiento total de hojas frescas de hierba Luisa es de 12500 Kg/ha y se cosechan 250 sacos del producto en un periodo de 2 meses con un total de 2600

plantas, con este dato se deduce la cantidad de producto con la que se compite en el mercado.

Se tiene un tiempo de 2 meses para poder secar la materia prima, es decir 40 días laborables, de donde se obtiene:

$$\text{cantidad de producto a secar diario} = \frac{12500\,\text{Kg}}{40\,\text{días}} \qquad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Dando como resultado la cantidad de secado diario que es de 312.5 Kg/día en 2 jornadas de 156.25 Kg cada una.

3.2. Forma de producto y tamaño de picado

La hierba Luisa es una planta con hojas puntiagudas de aproximadamente dos metros de altura, por lo que para iniciar el proceso de secado debe tener una preparación del producto mediante un sistema de cortado sencillo con navajas manejadas manualmente en una mesa diseñada para un producto alimenticio, cuidando que el corte de la hierba no exceda los dos centímetros de longitud para su posterior deshidratado. Este dato se define en base a las múltiples pruebas realizadas en los deshidratadores utilizados en el proyecto, ya que favorece en el proceso de deshidratado y en su envase.

Las plantas aromáticas tienen que ser cosechadas cuando el nivel de aceites esenciales y otros componentes están en su más alta concentración. En la hierba Luisa la concentración de estos aceites se encuentra cuando la hoja esta tierna y el tallo central alcanza apenas a una cuarta parte de la longitud total de la hoja. Es necesario observar la altura de la zona de producción, la forma y época más adecuadas para su cosecha, para conservar sus propiedades en especial su aroma y sabor ya sea frescas o deshidratadas.

Para el cortado de los 156.25 Kg de hierba Luisa se utilizará una mesa hecha en su parte superior con planchas de Acero Inoxidable AISI 316 tipo alimenticio para que cumpla con requisitos de tratamiento de producto para el consumo humano. Los soportes de la mesa serán de material ASTM A36. En la Figura 3.1 se presenta un esquema de la mesa de corte.

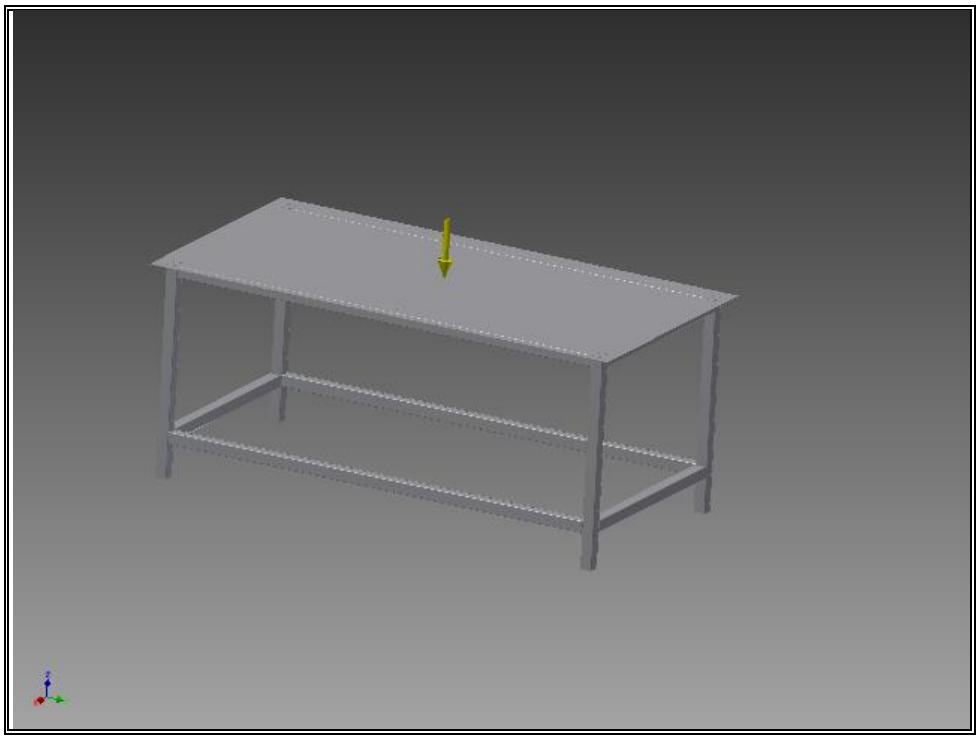


Figura 3.1: Esquema mesa de corte

DISEÑO POR COMPRESIÓN

El análisis y diseño de los elementos a compresión pueden diferir significativamente de los miembros en tensión y torsión; por esta razón, es conveniente clasificar a la compresión de acuerdo a su función (columna larga o corta) y de acuerdo a la carga aplica (central o excéntrica). Las columnas pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Columnas largas con carga central
2. Columnas intermedias con carga central
3. Columnas con carga excéntrica

Esta clasificación de columnas hace posible el diseño y desarrollo de métodos para cada categoría. Una columna es un elemento relativamente largo cargado a compresión, una columna alta esbelta falla por pandeo, nombre común que recibe la inestabilidad elástica de las columnas.

La razón de esbeltez se calcula de la siguiente manera:

$$k = C\frac{L}{R} \qquad \text{(Ecuación 3.2)}$$

Donde:

L = Longitud real de la columna

C = Factor de fijación en los extremos

R = Radio de giro mínimo de la sección transversal de la columna

La razón de esbeltez también se puede representar por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{Le}{R} \qquad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Donde:

Le = Longitud efectiva (LxC)

Para calcular el radio de giro R se utiliza la siguiente ecuación;

$$R = \sqrt{\frac{Iy}{A}} \qquad \text{(Ecuación 3.4)}$$

El factor de fijación de los extremos (C), es un factor que mide el grado de limitación contra rotación de cada extremo.

TABLA 11
FACTOR DE FIJACION DE LOS EXTREMOS (COLUMNAS)

CONDICION	Ambos extremos articulados	Ambos extremos fijos	Un extremo fijo y otro libre	Un extremo fijo y otro articulado
Valor Teórico	1	0,5	2	0,7
Valor Práctico	1	0,65	2,1	0,8

Datos para cálculo de columnas (fijación de los extremos). Proyecto de tesis

Para determinar si una columna se comporta como columna larga o intermedia (corta), se utiliza un parámetro conocido como razón de esbeltez de transición (Cc), el cual se calcula,

$$Cc = \sqrt{\frac{2\pi^2 CE}{Sy}} \qquad \text{(Ecuación 3.4)}$$

Si k>Cc, entonces la columna es larga y se utiliza la fórmula de Euler.

Si k<Cc, entonces la columna es corta o intermedia entonces se utiliza la fórmula de J.B. Johnson.

Se verifican las condiciones iniciales del diseño, asumiendo que la mesa va a tener una longitud de 2 metros de largo y 1 metro de ancho, las columnas serán diseñadas por compresión y tendrán un perfil estructural cuadrado de 50x50x3 mm de espesor, la longitud será de 90 cm, las vigas transversales para soportar la plancha tendrán el mismo perfil cuadrado 50x50x3 de longitud 1.9 m y la plancha para la mesa será de acero inoxidable tipo alimenticio AISI 316 de 3 mm de espesor.

Datos:

Iy = 21.20 cm^4

A = 5.61 cm^2

E = 207x10^9 Pa

Sy = 248.2 MPa

La relación de esbeltez se calcula mediante las ecuaciones 3.2 y 3.4

$$k = C\frac{L}{R}$$

$$R = \sqrt{\frac{21.20}{5.61}} = 1.94 \text{ cm} = 19.4 \text{ mm}$$

El valor de C se determina de la tabla 11, la mesa será simulada como columna con un extremo fijo y otro libre C=2,

$$k = 2\frac{900}{19.4} = 92.78$$

A través de la ecuación 3.4, tomando como material acero ASTM A36 (Sy= 248.2 MPa) y el módulo de rigidez del acero E=207x10^9 Pa, se obtiene:

$$Cc = \sqrt{\frac{4x207x10^9 2\pi^2}{248.2x10^6}} = 181.45$$

En base a los resultados obtenidos k<Cc, se trata de una columna corta en la cual se utiliza la fórmula de J.B. Johnson para determinar la carga que resiste antes del pandeo.

$$Pcr = A * Sy * \left[1 - \frac{Sy*\left(C*\frac{L}{R}\right)^2}{4*\pi^2*E}\right] \qquad \text{(Ecuación 3.5)}$$

Reemplazando los datos en la ecuación, se obtiene:

$$Pcr = 561 * 248.2 * \left[1 - \frac{248.2x10^6*92.8^2}{4*\pi^2*207x10^9}\right] = 24825.4 \text{ [N]}$$

La carga total que va a soportar la mesa es de 156.25 [Kg] x 9.8 [m/s²] = 1531.25 [N], entonces para cada columna la carga aplicada va a ser:

$$F = \frac{1531.25}{4} = 382.8 \text{ [N]}$$

El factor de seguridad de cada columna esta dado por:

$$n = \frac{Pcr}{F} = \frac{24825.4}{382.8} = 64.8$$

El factor de seguridad es elevado al utilizar un tubo 50x50x3 que se puede adquirir en el mercado local. Se efectúa el análisis de elementos finitos en toda la estructura con ayuda del programa INVENTOR 2010, colocando la estructura completa con sus respectivos materiales (Esfuerzos de fluencia) y cargas.

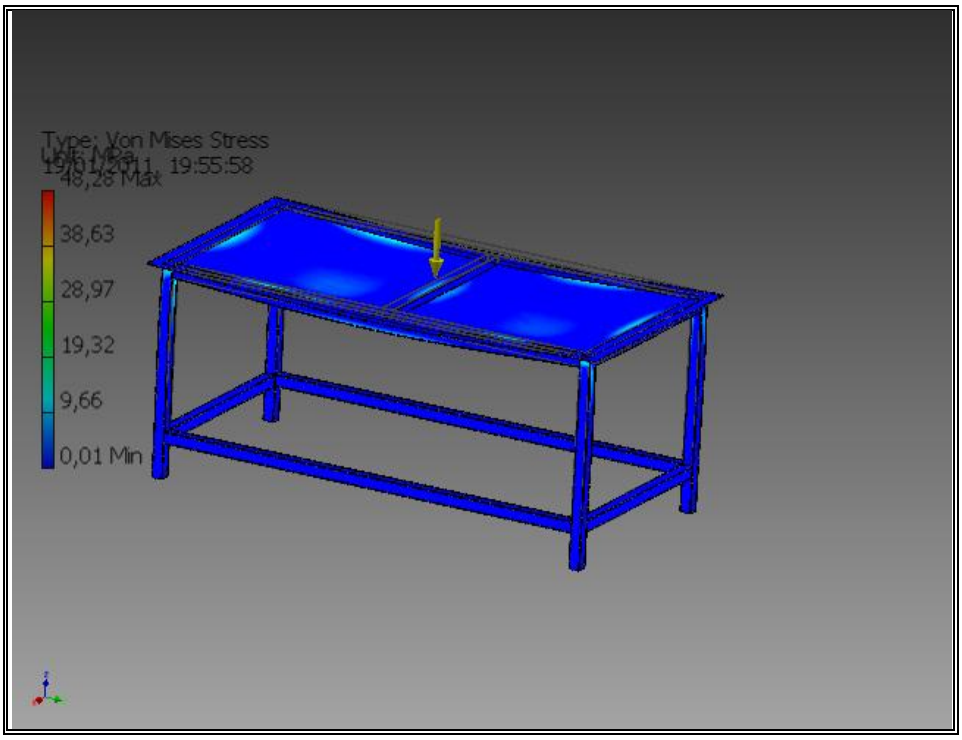


Figura 3.2: Análisis de Esfuerzos mesa de corte (INVENTOR)

En la Figura 3.2 se hace el análisis de la mesa mediante el programa INVENTOR 2010, utilizando este método se obtiene como un solo conjunto el análisis promedio del esfuerzo de Von Misses, con el que el valor de máximo esfuerzo es 48.28 MPa, se concluye que la estructura de la mesa soporta esfuerzos bajo las condiciones deseadas, ya que el esfuerzo de fluencia del material es mucho mayor al esfuerzo máximo debido a las cargas aplicadas.

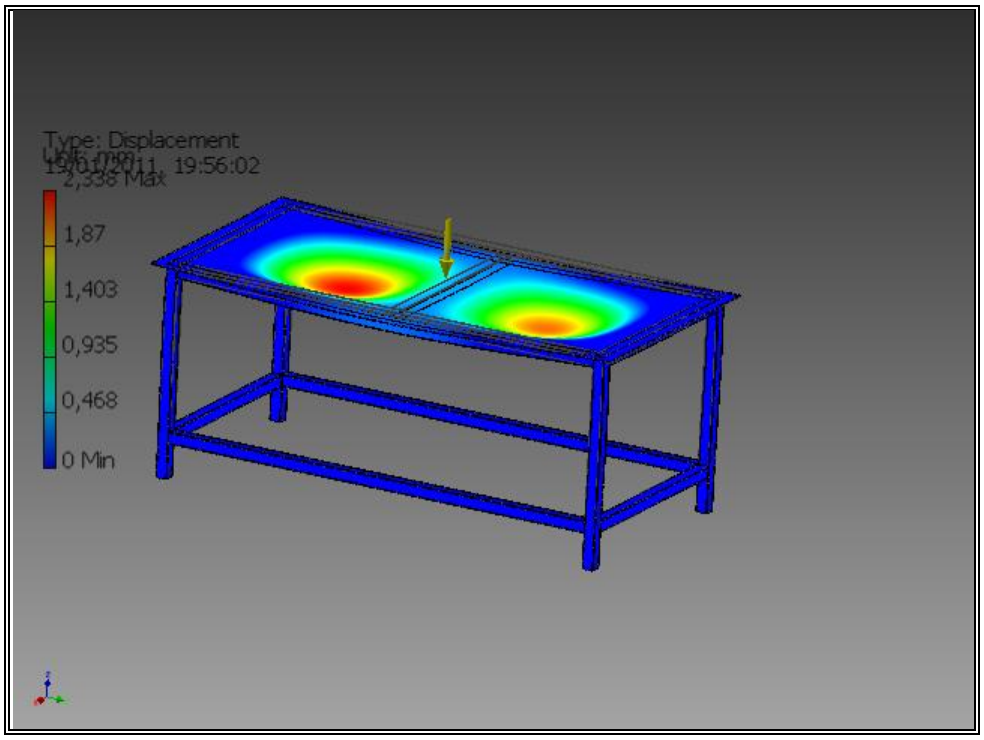


Figura 3.3: Desplazamientos mesa de corte (INVENTOR)

En la figura 3.3 se hace el análisis de la mesa mediante el programa INVENTOR 2010, con este método se obtiene como un solo cuerpo ensamblado el desplazamiento total del conjunto debido a las cargas aplicadas, alcanzando el mayor desplazamiento en el centro con un valor de 2.4 mm que, es aceptable para el diseño de la mesa.

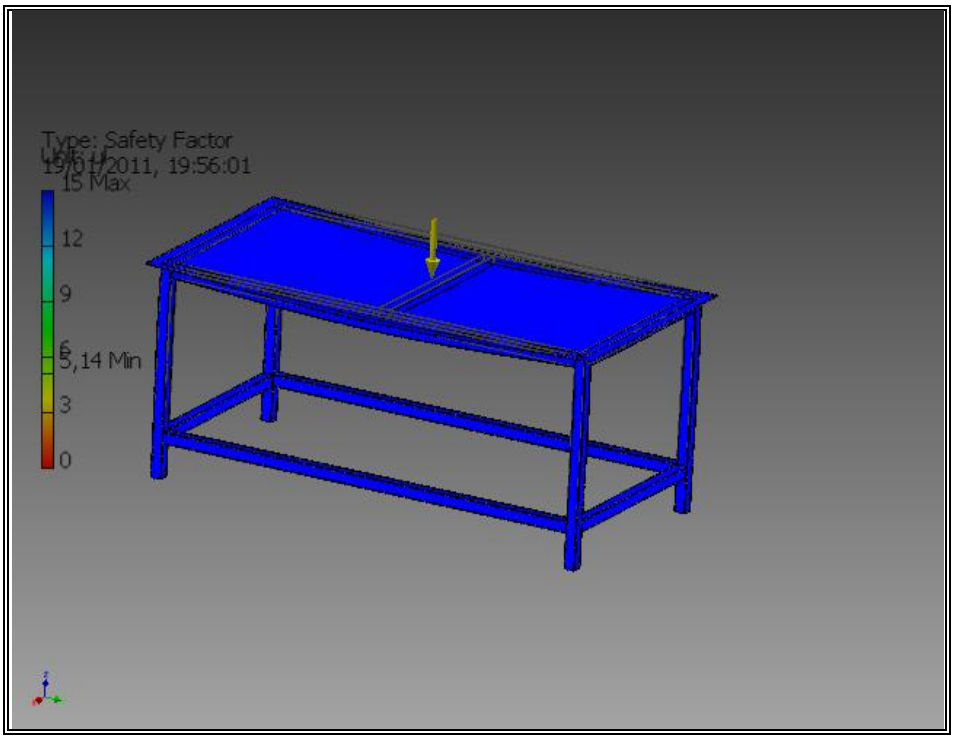


Figura 3.4: Factor de seguridad mesa de corte (INVENTOR)

En la figura 3.4 se muestra el factor de seguridad que se obtiene mediante el programa INVENTOR 2010, donde se observa que en la mayor parte de la mesa se tiene un color azul lo que indica que tiene un factor de seguridad mayor a 15 y en la parte crítica el factor de seguridad es de 5.2, el cual es el mínimo en todo el análisis, por lo que se concluye que el diseño es correcto.

3.3. Balance de Energía del sistema

Para los fines pertinentes se realizarán los diferentes balances que nos permitan establecer las ecuaciones necesarias.

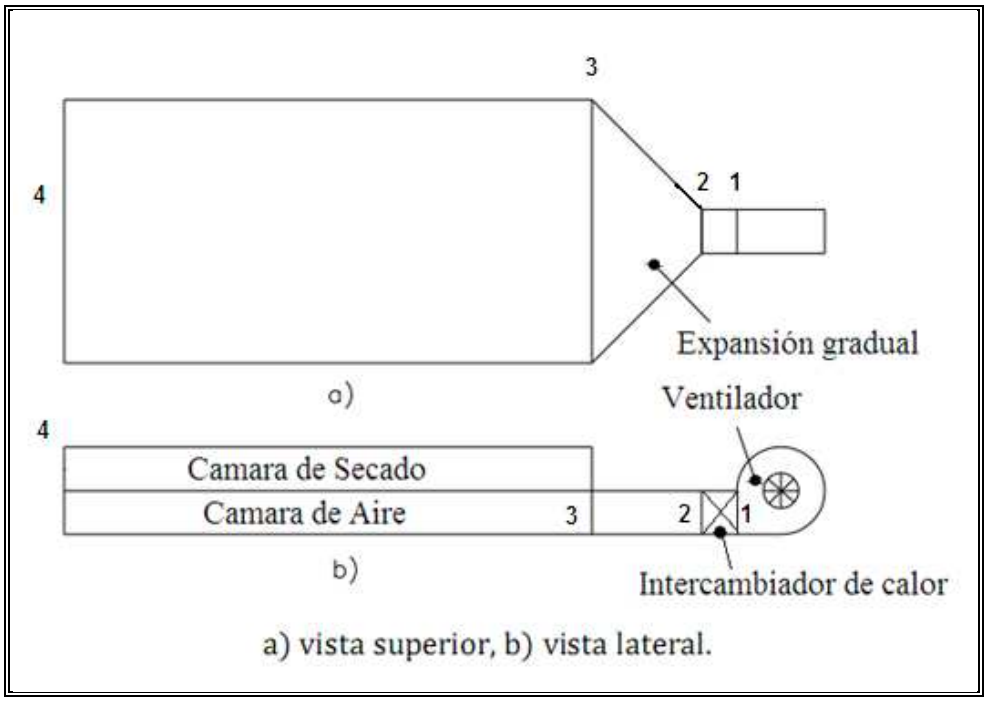


Figura 3.5: Configuración de Cámara de Secado

3.3.1. Balance de masa en la cámara de secado

La cámara de secado debe estar diseñada para satisfacer la necesidad de producir 312.5 kg de hierba Luisa deshidratada diaria, para lo cual se acondiciona una cámara de secado con capacidad 156.25 kg por jornada con un total de dos jornadas diarias, dando a lugar para los cálculos, la capacidad de cada secador con una reducción de humedad que va de 54% al 14% de humedad final en el producto.

En la ecuación siguiente se presenta el balance de masa total, de donde se obtiene la cantidad de agua a remover.

	Masa H_2O	+	Masa seca	=	Masa Total
Inicial	0.54	+	0.46	=	1
Final	0.14x	+	0.46	=	X

Despejando la ecuación:

X – 0.14X= 0.46, despejando “X” queda:

X= 0.5349 Unidades de masa

Entonces, se han eliminado 0.4651 unidades de agua

Para una capacidad de secado de 156.25 kg la capacidad de H_2O a evaporar será:

Cantidad de H_2O a evaporar = Capacidad de secar * Unidades de H2O

Cantidad de H_2O a evaporar = 156.25 kg * 0.4651 U. de H_2O

Cantidad de H_2O a evaporar = 72.67 kg de H_2O

La cantidad de aire seco que necesita el sistema para evaporar el agua contenida en la hierba es:

$$m_{as} = \frac{m_w}{(w_4 - w_3)}$$

Donde:

m_w: Cantidad de H_2O a evaporar

w_3, w_4: Contenido de Humedad del aire a la entrada y a la salida de la cámara de secado.

- Entrada de aire:

  $T_3 = 45°C$

  $H_{r3} = 35\%$

- Salida de aire:
- $T_4 = 35°C$
- $H_{r4} = 73\%$

Según la tabla el contenido de Humedad a la entrada y a la salida del aire

$$W_3 = 0.02076\ (kg\ de\ agua/kg\ de\ aire\ seco\ )$$

$$W_4 = 0.02685\ (kg\ de\ agua/kg\ de\ aire\ seco\ )$$

Por lo tanto:

$$m_{as} = \frac{72.67\ kg\ de\ agua}{(0.02685 - 0.02076)\ \frac{kg\ de\ agua}{kg\ de\ aire\ seco}}$$

$$m_{as} = 11932.67\ kg\ de\ aire\ seco$$

El volumen de aire seco es:

$$V_{as} = \frac{m_a * R * T}{P}$$

$$V_{as} = \frac{11932.67\ kg * 0.287\ \frac{kPa.m^3}{kg.ºK} * 318°K}{101.35\ kPa}$$

$$V_{as} = 10745.4\ m^3\ de\ aire\ seco$$

La masa de aire ambiente que se necesita es:

$$m_a = \frac{V_{as}}{v_1}$$

$$m_a = \frac{10745.4\ m^3\ de\ aire\ seco}{0.8875\ \frac{m^3}{kg}}$$

$$m_a = 12107.5\ kg$$

Tiempo de secado

El tiempo de secado es función de la velocidad y temperatura de secado, la velocidad de secado se definió que será de 2 m/s, es decir que para disminuir el tiempo de secado se debe aumentar la temperatura de secado, así en el análisis de campo se midió que la

temperatura de secado es de 40ºC, por lo que para justificar el objetivo del proyecto, ésta se aumenta y se trabaja con la temperatura de secado de 45ºC. El tiempo de secado se determina a partir de la curva de velocidad de secado que se muestra en la figura siguiente.

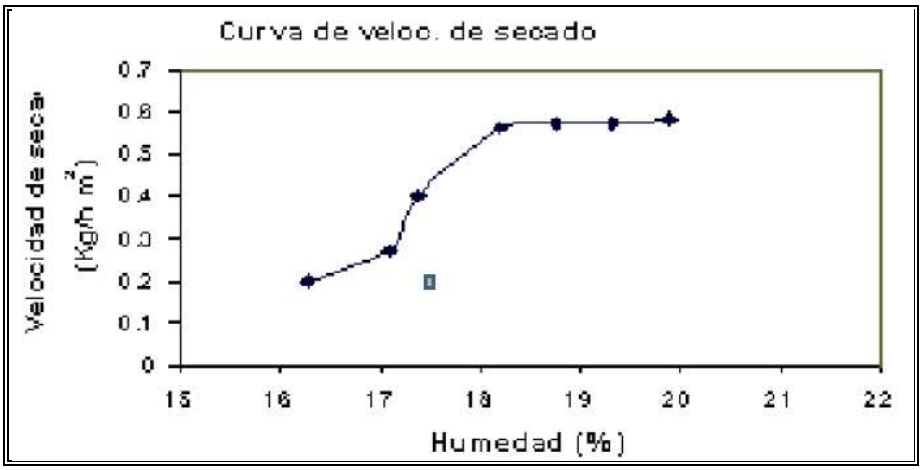


Figura 3.6: Curva de Velocidad de Secado

La ecuación para estimar el tiempo de secado es:

$$t_s = \frac{m_f}{A_{tt} * R_c}\left(\phi_i - \phi_c - \phi_c ln\frac{\phi_c}{\phi_f}\right)$$

Donde el área total de transferencia del aire y la hierba es:

$$A_{tt} = \eta * A_h$$

$$A_{tt} = 2708333 * (0.02m * 0.005m)$$

$$A_{tt} = 270.8\, m^2$$

Y el diámetro equivalente de la hierba es:

$$D_{mm} \cong \frac{4A}{P} = \frac{4(2 * 0.5)}{5}$$

$$D_{mm} \cong 0.8 \text{ cm} = 0.008\text{m}$$

Numero de Reynolds:

$$R_e = \frac{D_{mm} * \upsilon_s * \rho_a}{\mu_a} = \frac{0.008m * 2\frac{m}{s} * 1.077\ \frac{kg}{m^3}}{193.6\ N.\frac{s}{m^2}}$$

$$R_e = 890.08$$

La ecuación para obtener el coeficiente de convección en lechos con flujo perpendicular al lecho es:

$$\boldsymbol{Nu}_D = \frac{h * D_{mm}}{k} = 1.17\ Re^{0.585} * Pr^{1/3}$$

Donde:

$$\frac{h * (0.008)}{27.63x10^{-3}} = 1.17 * 890{,}08^{0.585} * 0.702^{1/3}$$

$$h = 190.84\ \left(\frac{W}{m^{2\circ}K}\right)$$

La velocidad de secado es:

$$\boldsymbol{R}_c = \frac{h(T_s - T_{abh})}{h_{f\ g@Ts}} = \frac{190.41(45 - 35)}{2394.19}$$

$$R_c = 0.797x10^{-3}\ \left(\frac{kg}{m^2.s}\right)$$

La humedad crítica es de 18% y se obtiene de la Figura 3.6:

$$t_s = \frac{83.58\ kg}{270.8m^2 * 0.797x10^{-3}}\left(54 - 18 - 18ln\frac{18}{14}\right)$$

$$t_s = 12190.74\ s$$

$$t_s = 3.38\ h = 3\ horas\ 23\ minutos.$$

El flujo de aire es:

$$\dot{m}_a = \frac{m_a}{t_s}$$

$$\dot{m}_a = \frac{m_a}{t_s} = \frac{12107.5\ kg}{3.38\ h}$$

$$\dot{m}_a = 3582.1\ \frac{kg}{h} = 0.995\ \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q}a = 0.995\ \frac{kg}{s} * 0.8875\ \frac{m^3}{kg} =\ 0.883\ \frac{m^3}{s}$$

3.3.2. Balance de masa en el calentador.

Para el siguiente análisis se asumió la siguiente temperatura inicial para los gases de combustión:

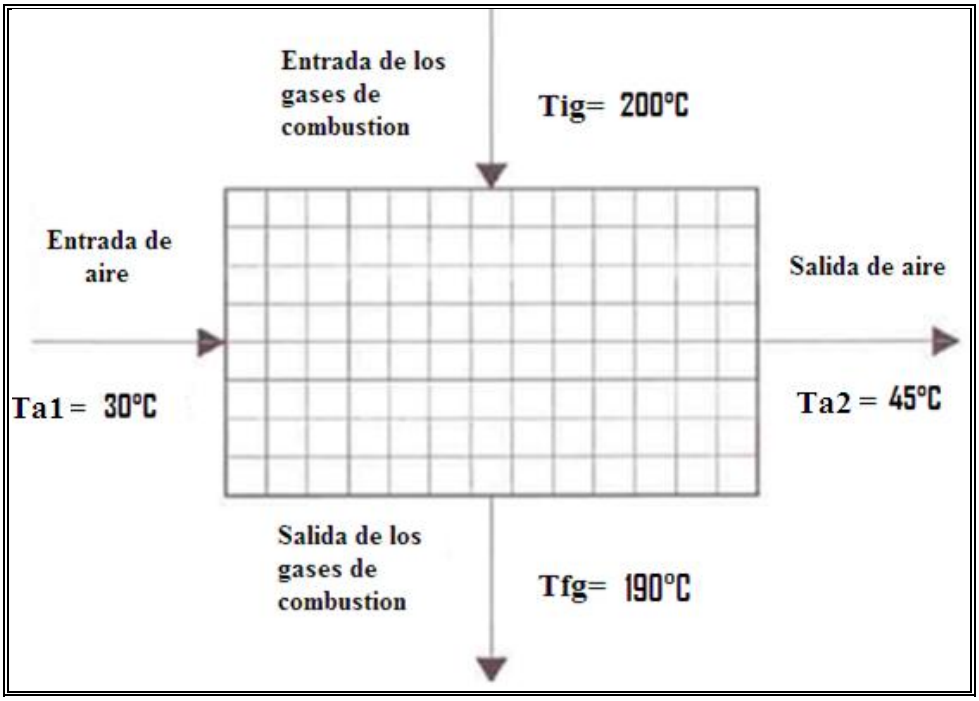


Figura 3.7: Balance de energía cámara de secado

Donde:

Ta1= Temperatura inicial del aire

Ta2= Temperatura final del aire

Tig = Temperatura inicial de gas

Tfg = Temperatura final del gas

Se asume una diferencia de temperatura de 10ºC a la salida de los gases, partiendo con estos datos se obtiene la temperatura media y se determina por interpolación el calor específico, viscosidad, número de Prandtl, etc.

- Entrada de aire:

  Ta1 =30°C

  Hr1 = 90%

- Salida de aire:

  Ta2 = 45°C

  Hr2 (según tabla psicométrica) = 35% son:

Según la tabla el contenido de Humedad a la entrada y a la salida del aire

W1 = 24,5 (g/ kg de aire seco)

W2 = 26,8 (g/ kg de aire seco)

3.3.3. Balance de Energía en el calentador

TABLA 12
DATOS PARA EL CÁLCULO

	AIRE		GASES DE COMBUSTION	
Temperatura Media	Tma	310,5°K	Tmg	468°K
Calor Especifico	Cpa	1,007 KJ/Kg°K	Cpg	1,057 KJ/Kg°K
Viscosidad	μa	190,5 x 10^{-7} N*S/m^2	μg	242,8 x 10^{-7} N*S/m^2
Número de Prandtl	Pra	0,706	Prg	0,712
Conductividad Térmica	Ka	26,96 x 10^{-3}	Kg	36,2 x 10^{-3}

Con los datos mostrados en la Tabla 12 se procede a realizar un balance de energía y a calcular el calor que se requiere suministrar al aire para elevar su temperatura de 30ºC a 45ºC

$$\boldsymbol{Q_{aire}} = \boldsymbol{\dot{m}_{aire}} * \boldsymbol{Cpa} * \Delta \boldsymbol{ta} \qquad \text{(Ecuación 3.7)}$$

Haciendo un balance energético se calcula el flujo másico.

$$\boldsymbol{Q_{gas}} = \boldsymbol{\dot{m}_{gas}} * \boldsymbol{Cpg} * \Delta \boldsymbol{tg} \qquad \text{(Ecuación 3.8)}$$

Calor que requiere el aire para elevar su temperatura 15°.

$$Q_{aire} = 0.995 \left(\frac{kg}{s}\right) * 1.007 \left(\frac{kj}{kg^{o}K}\right) * 15°K$$

$$Q_{aire} = 15.03 \left(\frac{kj}{s}\right)$$

Como:

$$\boldsymbol{Q_{aire} = Q_{gas}} \quad \text{(Ecuación 3.9)}$$

$$15.03 \left(\frac{kj}{s}\right) = \dot{m}_{gas} * 1.057 \left(\frac{kj}{kg\text{º}K}\right) * 10°K$$

$$\dot{m}_{gas} = 1.42 \left(\frac{kg}{s}\right)$$

3.3.4. Determinación de la velocidad de secado

Generalmente, en los sistemas de cabina se utilizan velocidades de aire de 2 a 5 m/s, para los de flujo transversal, y de 0,5 a 1,25 m/s en los de flujo ascendente.

En la sección 3.3.1 se calculó el flujo másico y caudal de aire del sistema:

$$\dot{m}_a = 0.995 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q}a = 0.883 \frac{m^3}{s}$$

Para mejorar el diseño del proyecto se utiliza una velocidad de aire en flujo ascendente de 2 m/s.

3.4. Cálculo de Intercambiador de calor

Para el cálculo del intercambiador de calor a usar en el proceso de secado se emplea el método LMTD (Diferencia de temperaturas Media Logarítmica) y a partir de la fórmula de transferencia de calor se definen las medidas que tienen, el intercambiador de calor y el tipo de material a utilizar.

$$\boldsymbol{Q = F * U * A * \Delta T_{ml}} \qquad \text{(Ecuación 3.10)}$$

- **Factor de corrección (F)**

El intercambiador de calor para esta aplicación va a ser de flujo cruzado por lo tanto se pueden usar las ecuaciones generales de intercambiadores si se corrige dichos valores por un factor.

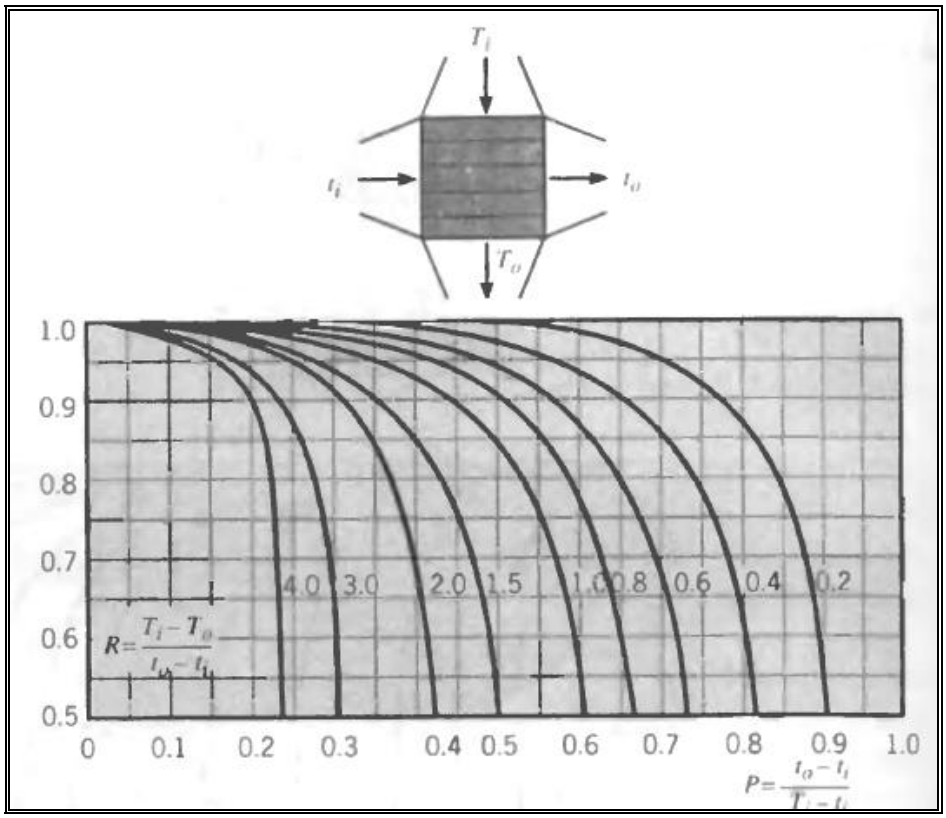


Figura 3.8: Factor de corrección para un Intercambiador de Calor en flujo cruzado

3.4.1. Cálculo del coeficiente Global de Transferencia de Calor.

Se procede a calcular las variables P y R para hallar el factor de corrección según la figura 3.6

$$P = \frac{Tfa-Tia}{Tig-Tia} = \frac{45-30}{200-30} = 0.088 \qquad \text{(Ecuación 3.11)}$$

$$R = \frac{Tia-Tfg}{Tfa-Tia} = \frac{200-190}{45-30} = 0.66 \qquad \text{(Ecuación 3.12)}$$

Utilizando la Figura 3.8 se obtiene F=1.

En primera instancia se asume un coeficiente de transferencia de calor para luego calcular el real, en base a la Tabla 11.2 del texto Incropera (Fundamentos de transferencia de calor 4ta Edición) se muestran los distintos valores de U.

TABLA 13
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

TABLA 11.2 Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor

Combinación de fluidos	U(W/m² · K)
Agua con agua	850-1700
Agua con aceite	110-350
Condensador de vapor (agua en tubos)	1000-6000
Condensador de amoniaco (agua en tubos)	800-1400
Condensador de alcohol (agua en tubos)	250-700
Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25-50

Se escoge el intercambiador de calor de tubos, aire en flujo cruzado, con un valor medio de U= 50 (W/m2°k).

Para calcular la diferencia de temperaturas media logarítmica (ΔTlm) se utiliza la ecuación

$$\frac{\Delta T1 - \Delta T2}{ln\left[\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right]} = \Delta Tml \qquad \text{(Ecuación 3.13)}$$

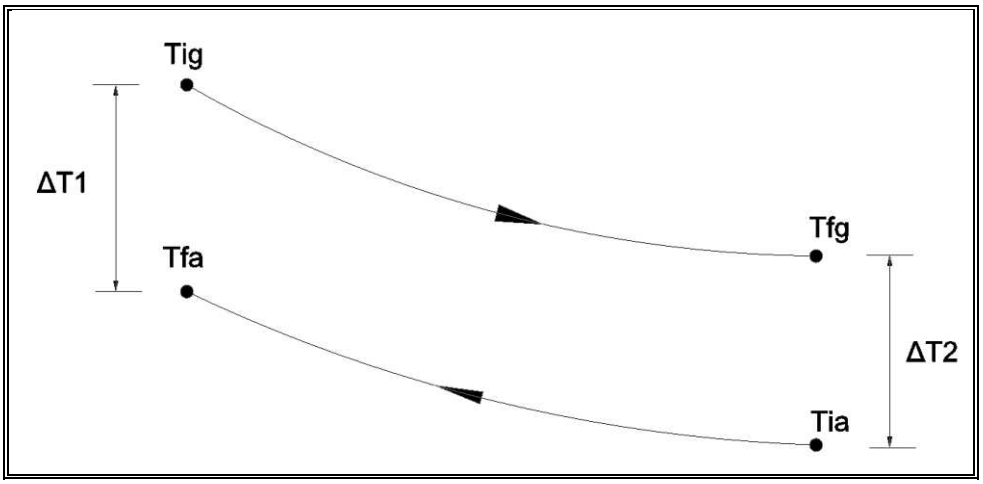


Figura 3.9: Distribución de Temperatura de Flujo Cruzado

$$\Delta T1 = Tig - Tfa = 473.15 - 318.15 = 155°K$$

$$\Delta T2 = Tfg - Tia = 463.15 - 303.15 = 160°K$$

Remplazando en la ecuación 3.13, queda:

$$\Delta Tml = \frac{155 - 160}{ln\left[\frac{155}{160}\right]} = 157.49°K$$

Ya obteniendo todos los valores se despeja el área de la ecuación 3.10 y se obtiene el área de contacto del intercambiador.

$$A = \frac{Q}{F * U * \Delta Tlm} = \frac{15.03\left[\frac{kj}{s}\right]}{1 * 50\left[\frac{W}{m^2°K}\right] * 157.49°K} = 1.91\ m^2$$

Luego se asume el diámetro de la tubería y la longitud para poder calcular el número de tubos necesarios

$$A = N * \pi * De * L \qquad \text{(Ecuación 3.14)}$$

Donde:

N= Número de tubos

De= Diámetro exterior de la tubería

L= Longitud del tubo

Se selecciona una tubería cédula 40 ASTM A 53 GR B, que es un tubo que se puede encontrar localmente, de las siguientes dimensiones:

TABLA 14
DIMENSIONES DE TUBERÍA PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR

D nominal	D exterior [mm]	Espesor [mm]
1”	33.4	3.38

Se asume una longitud de 0.50 metros de tubería con lo cual se obtiene lo siguiente:

$$\boldsymbol{N = \frac{1.91\ m^2}{\pi * 0.0334\ m * 0.5\ m} = 36.43\ \ tubos\ \approx 36\ tubos}$$

El número de tubos es pequeño y aceptable teniendo en cuenta el diámetro del tubo y la variación de temperatura que se necesita. El coeficiente de transferencia Global real se obtiene de la ecuación 3.15

$$Ureal = \frac{1}{\sum R_{Termicas}} \qquad \text{(Ecuación 3.15)}$$

Donde las resistencias térmicas son:

$$R_{Termicas} = R_{CV\ aire} + Fouling_{int} + R_{cond} + Fouling_{ext} + R_{CV\ gas}$$

El Fouling interno que produce el aire es despreciable en comparación con los otros valores, se calcular cada una de las resistencias.

Resistencias de convección del aire $\boldsymbol{R_{CV\ aire}}$.

$$\boldsymbol{R_{CV\ aire.} = \frac{1}{hi}} \qquad \text{(Ecuación 3.16)}$$

$$\boldsymbol{hi = \frac{Nu * ka}{Di}} \qquad \text{(Ecuación 3.17)}$$

Donde:

hi = Coeficiente de convección interno

Nu= Número de Nusselt

Ka= Conductividad térmica del aire

Di= Diámetro interno de tubería

Usando la ecuación de Dittus-Boelter se calcula el número de Nusselt, esta ecuación es válida para fluidos circulando por el interior de tubos y para Re>7000 y para 0.7<Pr<700

$$NuD = 0.023 * {R_{eD}}^{4/5} * Prn^{n} \quad \text{(Ecuación 3.18)}$$

n = 0.3 Si el fluido se enfría

n = 0.4 Si el fluido se calienta

Ahora se tiene que calcular el número de Reynolds para comprobar si se puede utilizar esta ecuación. De la fórmula de Reynolds para un tubo circular se tiene:

$$R_{eD} = \frac{4\left[\frac{\dot{m}_{aire}}{N}\right]}{\pi * Di * \mu} \quad \text{(Ecuación 3.19)}$$

$$\mathrm{Re_D} = \frac{4\left[\frac{0.995\left[\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{s}}\right]}{36}\right]}{\pi * 26.64\mathrm{x}10^{-3}[\mathrm{m}] * 190.5\mathrm{x}10^{-7}\left[\frac{\mathrm{Ns}}{\mathrm{m}^2}\right]} = 69342.65$$

Debido a que se obtiene un número de Reynolds mayor a 7000, se puede utilizar la ecuación de Dittus-Boelter para calcular el valor de Nusselt.

$$NuD = 0.023 * 69342.65 * 0.706^{0.4} = 149.29$$

Se reemplazan estos valores en la ecuación 3.17 y se obtiene:

$$hi = \frac{149.29 * 26.96\mathrm{x}10^{-3}\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m°K}}\right]}{26.64\mathrm{x}10^{-3}[\mathrm{m}]} = 149.3\left[\frac{W}{m^{2\circ}K}\right]$$

Al reemplazar en la ecuación 3.16 se tiene:

$$R_{CV\ aire} = \frac{1}{149.3} = 0.0067\left[\frac{m^2\ K}{W}\right]$$

Resistencia de conducción (Rcond)

Para calcular la resistencia entre el tubo y el fluido se utiliza la ecuación:

$$R_{cond} = \frac{ln\left[\frac{Dext}{Di}\right] * \left[\frac{Di}{2}\right]}{Kmat} \qquad \text{(Ecuación 3.20)}$$

La conductividad térmica del material (K_{mat}) es la del acero al carbón y se la calcula a 463 ºK, que es la temperatura que tendrá el acero al estar en contacto y al estar expuesto a la radiación con las llamas, para obtener el valor de la tabla se utiliza el valor a 600 ºK.

$$K_{mat} = 48 \ W/m°K$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left[\frac{33.4}{26.64}\right] * \left[\frac{26.64 \ x \ 10^{-3}}{2}\right]}{48} = 6.3x10^{-5} \left[\frac{m^2°K}{W}\right]$$

Resistencia de convección del gas (Rcv gas)

Para calcular la resistencia de convección del gas se usan las mismas fórmulas utilizadas en la del aire; para esto se debe realizar un análisis previo de la velocidad a la que viajan los gases.

$$R_{CV\ gas} = \frac{1}{hext} \qquad \text{(Ecuación 3.21)}$$

$$ho = \frac{Nu * Kgas}{Dext} \qquad \text{(Ecuación 3.22)}$$

Como se desea conocer el coeficiente promedio de transferencia de calor para todo el haz de tubos, para un flujo de aire a través de tubos compuestos de 10 o más líneas, se tienen las fórmulas de Grimison para el valor de Nusselt.

$$NuD = 1.13 * C1 * {Re_{Dmax}}^{m} * Prn^{1/3} \qquad \text{(Ecuación 3.23)}$$

$$Re_D = \frac{\rho * Vmax * Dext}{\mu\ gas} \qquad \text{(Ecuación 3.24)}$$

Para el número de Reynolds se tiene que calcular la velocidad a la que pasan los gases a través del banco de tubos.

En este punto se tiene que analizar la sección A_1 o A_2 y determinar donde se origina la velocidad máxima. Tal como se muestra en la Figura 3.10.

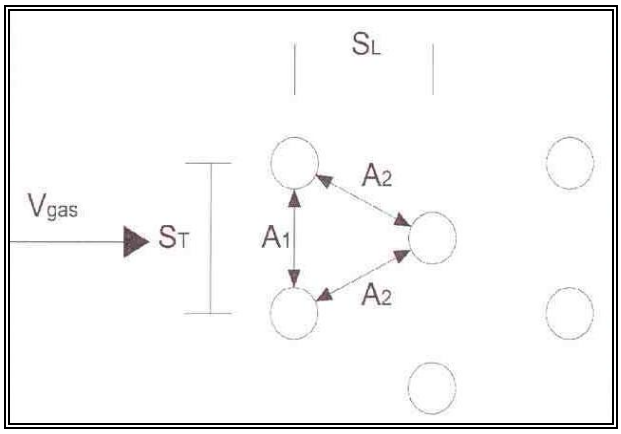


Figura 3.10: Arreglo de Banco de tubos

Se debe recalcar que el modelo de Banco de tubos tendrá un arreglo escalonado, para una mayor eficiencia en la transferencia de calor, además el espaciamiento transversal (ST), y longitudinal (SL) de los tubos, se dan de acuerdo al mínimo especificado por Norma TEMA, 9na edición, la cual indica:

“Los tubos estarán espaciados de centro a centro una distancia mínima de 1.25 veces el diámetro exterior del tubo. Cuando los parámetros de los tubos son de 5/8” (15.9mm) o menos y las juntas tubo-placas tubulares son solamente expandibles, la mínima distancia de centro a centro puede ser reducido a 1.20 veces el diámetro exterior”

Entonces:

$$S_T = S_L = 1.25 * Dext \qquad \text{(Ecuación 3.25)}$$

$$S_T = S_L = 1.25 * 33.4 = 41.75mm = 0.04175m$$

Para encontrar el plano donde ocurre la velocidad máxima se tiene, Vmax en A_2 si:

$$S_D = \left[{S_L}^2 + \left[\frac{{S_T}^2}{2} \right] \right]^{1/2} < \frac{S_T + D}{2} \qquad \text{(Ecuación 3.26)}$$

Al reemplazar los valores queda S_D= 51.13 < 37.58 por lo que Vmax se da en A_1. Con ese resultado se utiliza la fórmula de Vmax en A_1 como sigue,

$$Vmax = \frac{S_T}{S_T - D} Vg \qquad \text{(Ecuación 3.27)}$$

Para el cálculo de la velocidad de los gases se utiliza el flujo másico anteriormente hallado y el área transversal de los tubos.

$$\dot{m}_{gas} = \rho * A * Vg \qquad \text{(Ecuación 3.28)}$$

Donde el área transversal de los tubos viene dada por la expresión:

$$\mathrm{A} = \mathrm{S_T} * \mathrm{N} * \mathrm{L} = 0.04175\ \mathrm{m} * 36 * 0.5\ \mathrm{m} = 0.7515\ \mathrm{m}^2$$

La densidad del gas se toma a la temperatura inicial y se tiene:

$$V_g = \frac{1.42\ \left[\frac{Kg}{s}\right]}{0.5804\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right] * 0.7515 m^2} = 3.26\ \frac{m}{s}$$

$$V_{max} = \frac{0.04175\ m * 3.26\left[\frac{m}{s}\right]}{0.04175\ m - 0.0334\ m} = 16.27\ \frac{m}{s}$$

De la ecuación 3.24, para calcular el número de Reynolds, y la ecuación 3.23, para calcular el número de Nusselt, se obtiene:

$$Re_D = \frac{0.5804\ \frac{Kg}{m^3} * 16.27\ \frac{m}{s} * 0.0334\ m}{243.8\ x\ 10^{-7}\ \frac{Ns}{m^2}} = 12943.21$$

$$Nu_D = 1.13 * C1 * {Re_{Dmax}}^{m} * Pr^{1/3}$$

Para esto se debe calcular la constante C_1 y m de la ecuación anterior.

TABLA 15
CONSTANTE DE LA ECUACION DE NUSSELT

	S_T/D							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
S_L/D	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m
Alineado								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Escalonado								
0.600	—	—	—	—	—	—	0.213	0.636
0.900	—	—	—	—	0.446	0.571	0.401	0.581
1.000	—	—	0.497	0.558	—	—	—	—
1.125	—	—	—	—	0.478	0.565	0.518	0.560
1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

De la tabla 15 se obtiene, C_1 = 0.518 y m= 0.556, al reemplazar en la ecuación se obtiene el número de Nusselt:

$$Nu_D = 1.13 * \ 0.518 * 12943.21^{0.556} * 0.712^{\ 1/3} = 101.05$$

Ahora se puede calcular el coeficiente conectivo interno, ecuación 3.17

$$ho = \frac{101.05 * 36.2x10^{-3} \left[\frac{w}{m°K}\right]}{0.0334\ [m]} = 109.5\ \left[\frac{w}{m^{2}°K}\right]$$

La ecuación 3.16 queda:

$$R_{CVgas} = \frac{1}{109.5\ \frac{W}{m^{2}°K}} = 0.00913\ \frac{m^{2}°K}{W}$$

Fouling Externo.

Según el libro Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design de Sadik Kakaç y Hongtan Liu Capítulo 5 (Referencia 10) se aproxima al siguiente valor para gases de combustión de GLP.

$$Foulin_{\ ext} = 0.0018 \left[\frac{m^{2}°K}{W}\right]$$

Al calcular todas las resistencias térmicas se hace la sumatoria de las mismas:

$$\sum \boldsymbol{R_{TERMICAS}} = \boldsymbol{R_{CV\ aire}} + \boldsymbol{Fouling_{int}} + \boldsymbol{R_{cond}} + \boldsymbol{Fouling_{ext}} + \boldsymbol{R_{CV\ gas}}$$

$$\sum R_{TERMICAS} = 0.0067 + 0 + 0.000063 + 0.00913 + 0.0018$$

$$\sum R_{TERMICAS} = 0.0177\ \frac{m^{2\circ}K}{W}$$

De la fórmula de U real ecuación 3.18 queda:

$$U_{real} = \frac{1}{0.0177\ \frac{m^{2\circ}K}{W}} = 56.52\ \frac{W}{m^{2\circ}K}$$

3.4.2 Cálculo y selección del intercambiador

De aquí se procede a iterar hasta que el valor de U teórico se aproxime al U real, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 16

TABLA 16
ITERACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA

# PRUEBA	$\boldsymbol{U_{TEORICO}}\ \left[\frac{\boldsymbol{W}}{\boldsymbol{m^{2\circ}K}}\right]$	$\boldsymbol{U_{REAL}}\ \left[\frac{\boldsymbol{W}}{\boldsymbol{m^{2\circ}K}}\right]$	# TUBOS
1	50	56.52	36
2	56.52	60.57	32

3	60.57	62.88	30
4	62.88	64.13	29
5	64.13	65.44	28
6	65.44	65.44	28

En base a los resultados obtenidos y que se muestran en la tabla 16, se tiene que el intercambiador será conformado por 28 tubos al que se añade un factor de seguridad del 30% por evitar posibles incrustaciones y taponamientos. Al final el sistema constará de 36 tubos de 1 pulgada de diámetro con una longitud de 0.5 metros. Por lo que el intercambiador será de dimensiones 0.4m alto x 0.4m de ancho y 0.5 m de profundidad (longitud de tubo).

3.5. Cálculo y selección de Equipos

Los equipos que se necesitan para terminar el proceso de secado son el ventilador y el quemador, con los datos calculados anteriormente se va a proceder a realizar dicho análisis.

3.5.1. Cálculo y selección del ventilador

Un ventilador es una turbo máquina cuya misión es asegurar la circulación del aire con las condiciones requeridas, se clasifican en

dos grupos axiales y centrífugos, los axiales manejan altos caudales y bajas presiones, lo contrario sucede con los centrífugos.

El flujo másico necesario para la selección del ventilador fue calculado con anterioridad así como también se calculó el caudal necesario y se determinó la velocidad del aire, además se determinó la dimensión del ducto. Todos estos resultados se muestran en la tabla siguiente

TABLA 17
RESULTADOS OBTENIDOS PARA SELECCIÓN DE VENTILADOR

AREA [m²]	CAUDAL [m³/s]	VELOCIDAD [m/s]	a [m]	b [m]
0.195	0.883	4.52	0.40	0.50

Con el caudal obtenido se puede seleccionar el ventilador pero se tiene que calcular las pérdidas de presión que sufre el sistema antes de entrar en contacto con las hojas de hierba Luisa, nuestro sistema está compuesto de motor-ventilador, el intercambiador de calor y el ducto de entrada de aire a la cámara, este va a estar dividido en 2 partes como se muestra en la figura siguiente:

1.- Expansión Gradual, y

2.- Cámara de Aire.

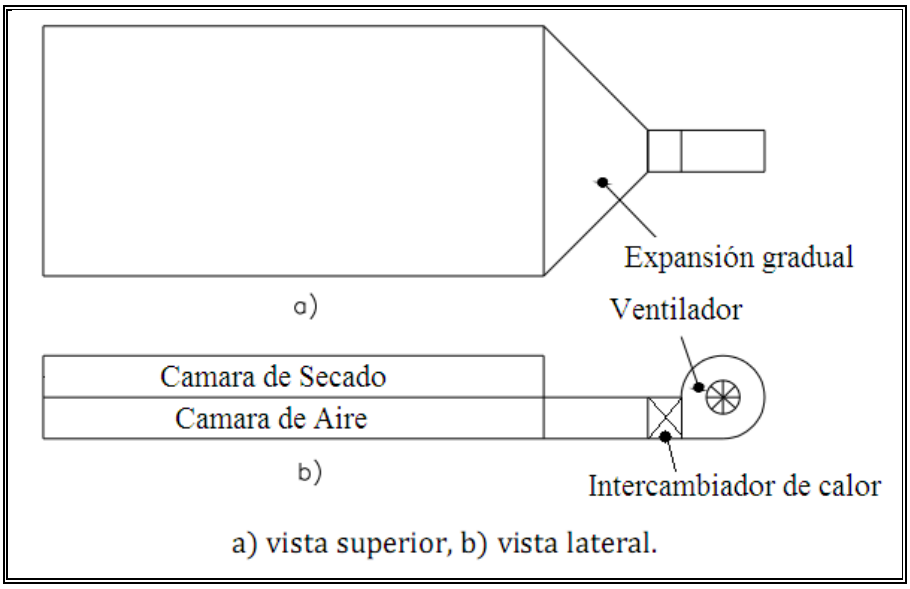


Figura 3.11: Configuración para la distribución de aire

Para determinar el área de salida del ventilador se usan las tablas de ventiladores y se toma un valor que se aproxime a la medida del ducto, y se calcula las caídas de presión en los diferentes tramos del sistema.

Caída de presión en la expansión gradual.

Diámetro hidráulico en la entrada de la expansión:

$$D_{ee} \cong \frac{4A}{P} = \frac{4(0.4 * 0.5)}{2(0.4 + 0.50)} = 0.44\ [m]$$

Diámetro hidráulico a la salida de la expansión:

$$D_{se} \cong \frac{4A}{P} = \frac{4(4 * 0.5)}{2(0.5 + 4)} = 0.88\ [m]$$

La velocidad a la entrada de la expansión es:

$$V_{ee} = \frac{\dot{Q}}{Aee} = \frac{0.883 \frac{m^3}{s}}{(0.4m * 0.5m)} = 4.42 \frac{m}{s}$$

La velocidad a la salida de la expansión es:

$$V_{se} = \frac{\dot{Q}}{Ase} = \frac{0.883 \frac{m^3}{s}}{(4m * 0.5m)} = 0.442 \frac{m}{s}$$

Entonces la velocidad media Vm es:

$$V_m = \frac{V_{ee} + V_{se}}{2}$$

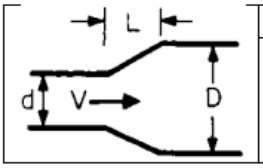
$$V_m = 2.43 \frac{m}{s}$$

La caída de presión se determina con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_e = \rho_a k' \left[1 - \left(\frac{D_{ee}}{D_{se}}\right)^2\right]^2 \frac{Vm^2}{2}$$

La longitud de la expansión es 1 m y el coeficiente k´ se toma de la tabla 18.

TABLA 18
VALORES DE k´.



(D-d)/2L	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,80
k'	0,14	0,20	0,47	0,76	0,95	1,05	1,10

Fuente: MARKS', Standard Handbook for Mechanical Engineers, Tenth Edition, McGraw-Hill, New York, 1996, pág. 3-51.

De la tabla k'=0.52.

$$\Delta P_e = 1.085 \frac{kg}{m^3} * 0.52 * \left[1 - \left(\frac{0.44\ m}{0.88\ m}\right)^2\right]^2 \frac{\left(2.43 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 0.93[Pa]$$

Caída de presión en el lecho de hierba.

La caída de presión en el lecho de hierba se calcula cuando existe mayor obstáculo para el paso del aire, este caso se encuentra cuando la columna de hojas es la máxima, es decir 0.52m.

$$Re_h = \frac{m_a \dot{} * Dg}{A_s * \mu_a} = \frac{0.995 \frac{kg}{s} * 0.008m}{19.2\ m^2 * 1.95E-5\ N.\frac{s}{m^2}} = 21.26$$

$$\Delta Ph = \left(\frac{h_h * Re_h * {\mu_a}^2}{{\rho_a}^2 * Dg^3}\right)\frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3}\left[\left(\frac{1.24 Re_h}{1-\epsilon}\right) + 368\right]$$

$$\Delta Ph = \left(\frac{0.52 * 21.26 * 1.95E-5^2}{1.085^2 * 0.008^3}\right)\frac{(1-0.3)^2}{0.3^3}\left[\left(\frac{1.24 * 21.26}{1-0.3}\right) + 368\right]$$

$$\Delta Ph = 51.34\ [Pa]$$

Caída de Presión en la plancha perforada.

La caída de presión en la plancha perforada es aproximadamente igual al 10% de la caída de presión en el lecho.

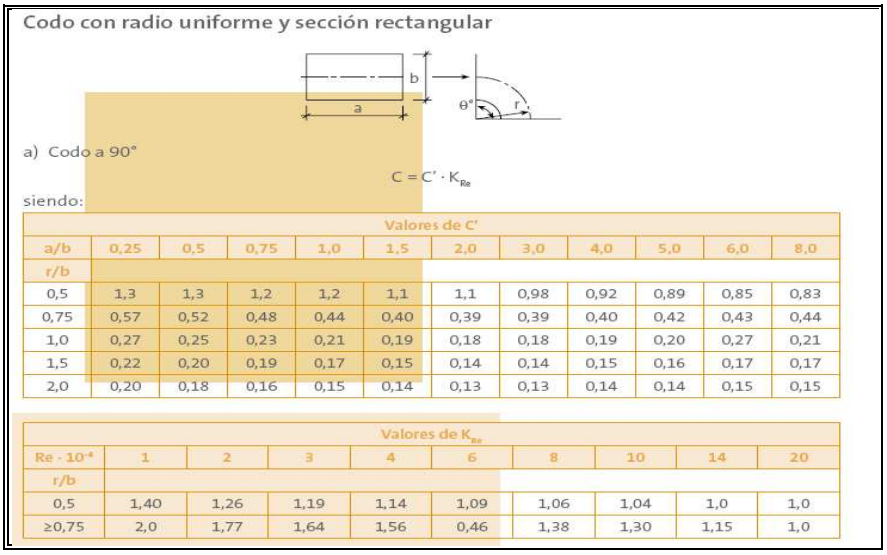
$$\Delta Ppp = 0.1 * \Delta Ph = 0.1 * 51.34[Pa]$$

$$\Delta Ppp = 5.13[Pa]$$

Caída de presión en el codo

Para la caída de presión en el codo se utilizan los coeficientes de pérdidas locales, usando la siguiente ecuación y la figura 3.12.

$$C = C' * K_{Re} \qquad \text{(Ecuación 3.29)}$$



Codo con radio uniforme y sección rectangular

a) Codo a 90°

$C = C' \cdot K_{Re}$

siendo:

Valores de C'

a/b	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0
r/b											
0,5	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	0,98	0,92	0,89	0,85	0,83
0,75	0,57	0,52	0,48	0,44	0,40	0,39	0,39	0,40	0,42	0,43	0,44
1,0	0,27	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,18	0,19	0,20	0,27	0,21
1,5	0,22	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17
2,0	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15

Valores de K_{Re}

Re - 10^{-4}	1	2	3	4	6	8	10	14	20
r/b									
0,5	1,40	1,26	1,19	1,14	1,09	1,06	1,04	1,0	1,0
≥0,75	2,0	1,77	1,64	1,56	0,46	1,38	1,30	1,15	1,0

Figura 3.12: Coeficientes de pérdidas de presión para ductos (codos)

Mediante la gráfica se determina que el coeficiente C' es 0.21 y el número de Reynolds es 152836, entonces el $K_{Re} = 1$, se tiene que:

$$C = 0.21 * 1 = 0.21$$

$$\Delta P_c = c * Pv = \frac{c * \rho_a * v^2}{2} = \frac{0.21 * 1.085 * 2^2}{2} = 0.46[Pa]$$

Caída de presión en el ducto – cámara.

Se procede a calcular el Diámetro equivalente:

$$D_e \cong \frac{4A}{P} = \frac{4 * (4 * 0.5)}{2(4 + 0.5)} = 0.88\, m$$

Se asume que la velocidad en el ducto permanece constante, por lo que la caída de presión en el ducto se calcula de la siguiente manera, con la figura del anexo A.II y con los datos de $\dot{Q}_T = 0.883 \left[\frac{m^3}{s}\right]$ y de la velocidad del aire de 2 [m/s] se tiene,

Caída de presión es *de 0.8* $\frac{[Pa]}{m}$ * Longitud de ducto (12 m)

$$\Delta P_d = 0.1\ \frac{[Pa]}{m} * 12\ \text{m} = 9.6[Pa]$$

Entonces la caída de presión total es:

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta Ph + \Delta Ppp + \Delta P_c + \Delta P_d$$

$$\Delta P_T = 0.93 + 51.34 + 5.13 + 0.46 + 9.6$$

$$\Delta P_T = 67.46[Pa]$$

Cálculo de potencia del motor

La potencia del motor eléctrico viene dada por la siguiente fórmula

$$\varphi = \frac{Q * P_s}{\eta} \qquad \text{(Ecuación 3.30)}$$

$$\varphi = \frac{0.883 \left[\frac{m^3}{s}\right] * 67.46\ [Pa]}{0.52} = 114.55\ [\text{Watts}]$$

$$\varphi \cong 0.15\ HP\ \ por\ lo\ que\ se\ escoge\ \varphi = 0.50\ HP$$

El ventilador va a ser tipo centrífugo con las siguientes características:

$$\dot{Q} = 0.883 \left[\frac{m^3}{s}\right] \cong\ 1870\ [cfm]$$

$$\Delta P_s = 67.46[Pa]$$

$$\varphi \cong 0.50\ HP$$

3.5.2. Cálculo y selección del quemador

Para el cálculo del quemador se necesita hallar el calor a suministrar, en base a los valores calculados y al calor específico del combustible a utilizar [GLP].

PROPIEDADES DEL GLP (GAS LICUADO DE PETRÓLEO)

Densidad [Kg/lt]	Cp [Kcal/kg.ºC]	Cv [Kcal/kg.ºC]

0.5	0.388	0.343

Para determinar la potencia necesaria del quemador, se indica que ya fue calculada la potencia necesaria para calentar el aire del sistema, la misma que será la que se utilice para seleccionar el quemador.

$$Q_R = m * C_p * \Delta T \qquad \text{(Ecuación 3.31)}$$

$$Q_R = 15.03\ Kw$$

$$\eta = 0.4$$

$$Q_s = \frac{Q_R}{\eta} = \frac{15.03}{0.4} = 37.58\ Kw$$

$$Q_s = 128228 \left[\frac{Btu}{h}\right] \cong 150000 \left[\frac{Btu}{h}\right]$$

3.6. Cálculo y dimensión del deshidratador

Condiciones.

Secar 156,25 kg de hierba Luisa en un secador de lecho fijo tipo rectangular para obtener un producto con un contenido de humedad alrededor del 14%.

Parámetros.

Velocidad del secado 2 m/s.

Temperatura de secado para la hierba Luisa máximo de 45°C.

Datos.

Humedad inicial: 54%

Humedad final: 14%

Porcentajes de espacios vacios: 30%

- **Determinación de las dimensiones del secador.**

  Las dimensiones del secador son determinadas según la capacidad de secado, que en este caso es 156,25 kg, se inicia considerando dimensiones de largo 12 m y ancho de cámara de 4 m, se toma como referencia estas medidas de secadores ubicados en la ciudad de Ventanas, con lo cual se calcula la altura de lecho, se toma como dato la densidad de la hierba Luisa como 6.318 kg/m^3

$$\rho = \frac{m}{\forall} = \frac{m}{l * a * h}$$

Donde:

l: 12 m

a: 4 m

m: 156.25 kg

ρ: 6.318 kg/m^3

$$h = \frac{156.25[kg]}{12\ m{*}4\ m{*}6.318\left[\frac{kg}{m^3}\right]} = 0.52\ \text{m}$$

Esta es la dimensión de la cámara de secado, la cual no va a estar sometida a ningún esfuerzo mecánico solo a esfuerzo debido a la temperatura en su interior, esta temperatura no es muy alta como para llegar a deformar el acero, por lo que se fabrica el cajón con planchas de acero A36 galvanizado de 3 mm de espesor, que es fácil para trabajar en el doblado y armado.

- **Selección de la plancha perforada.**

  La plancha perforada soporta la presión vertical o presión sobre el fondo producida por la masa de hierba.

  La FAO expone que la lamina debe ser mínimo de 1.5 mm de espesor, debe tener perforaciones que permitan el paso de aire de secado, y estas deben ser circulares en un mínimo del 40% de su superficie total.

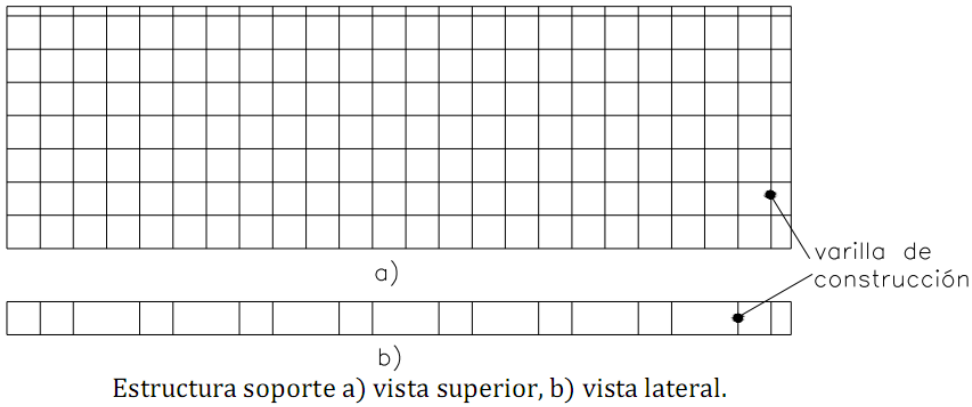
  Por lo tanto de acuerdo a los cálculos realizados para la mesa de corte y el criterio arriba mencionado, la plancha perforada

seleccionada es de 3 mm de espesor con agujeros de 3 mm de diámetro y un porcentaje de área perforada del 40%.

- **Diseño de la estructura soporte para la plancha perforada.**

  La plancha perforada debe soportarse por medio de una estructura, la misma debe ser lo más simple posible y que no se convierta en un obstáculo para la distribución del aire de secado. El material que se va a utilizar para el soporte será varilla de construcción, ya que éste permite la distribución en las cámaras de aire, así como en la plancha perforada.

  Para este caso se considera una separación entre varillas de 0.5 m entre sí, tal como se muestra en la figura siguiente.



Estructura soporte a) vista superior, b) vista lateral.

Fuente: Propia.

Figura 3.13: Distribución de varillas soportes en cámara de secado

La masa total que soporta la estructura es la masa de la hierba Luisa más la masa de la plancha perforada y la masa de la estructura soporte superior, esta masa total también es soportada por la mampostería del secador, sin embargo, por seguridad se considera que sólo la estructura soporta toda la masa.

$$m_t = m_{th} + m_{pp} + m_{es}$$

$$m_{th} = 156.25\ kg$$

$$m_{pp} = \forall_{pp} * \rho_{acero}$$

$$m_{pp} = (12 * 4 * 0.003 * 0.60)m^3 * 7850\frac{kg}{m^3}$$

$$m_{pp} = 678.24\ kg$$

$$m_{es} = \frac{\pi * Dv^2}{4} * Lev * \rho_{acero}$$

$$m_{es} = \frac{\pi * (0.008)^2 m^2}{4} * 198m * 7850\frac{kg}{m^3}$$

$$m_{es} = 78.13kg$$

Donde:

$$m_t = (156.25 + 678.24 + 78.13)kg$$

$$m_t = 912.65\ kg$$

La masa total a soportar es m_t= 912.65 kg.

La varilla trabaja como columna, para determinar su diámetro se utiliza la relación de esbeltez de un elemento sometido a compresión, que no debe exceder de 200.

$$\lambda = \frac{k * l_c}{r_{min}}$$

Donde:

λ: Relación de esbeltez, (adimensional)

k: Factor de apoyo, (adimensional)

lc: Longitud de la columna, (m)

r_{min}: Radio de giro mínimo de la sección, (m)

El factor de apoyo para los extremos empotrados, es 0.65.

Se asume una longitud de columna de 0.5m, el diámetro de la varilla de 8 mm, siendo el diámetro de una sección circular 4 veces el radio mínimo, entonces:

$$\lambda = \frac{0.65 * 0.5}{0.002} = 162.5$$

La carga critica que soporta el material del que está hecho la varilla (acero A-42) cuyas propiedades son:

E=2x10^6 kg/cm^2 y $S_{y\ A\text{-}42}$=4200 kg/cm^2

Es:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_{y\ A-42}}} = 96.95$$

Como $\lambda > C_c$, el esfuerzo admisible a compresión es:

$$F_a = \frac{12 * \pi^2 * E}{23 * \lambda^2} = 390.01 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right]$$

El esfuerzo real a compresión es:

$$f_a = 0.85 * F_a = 331.5 \left[\frac{kg}{cm^2}\right]$$

La carga que soporta cada columna es:

$$P_{sc} = f_a * A_{sc}$$

$$A_{sc} = \pi * (\frac{0.008}{2})^2 = 0.5026cm^2$$

$$P_{sc} = 166.75\ [kg]$$

El número de columnas que deben colocarse se calcula con la ecuación:

$$n_c = \frac{m_t}{P_{sc}} = \frac{912.65kg}{166.75kg} \cong 6 \text{ columnas}$$

Del resultado obtenido se colocarán 10 columnas y se distribuyen uniformemente, tal como se indica en la figura siguiente.

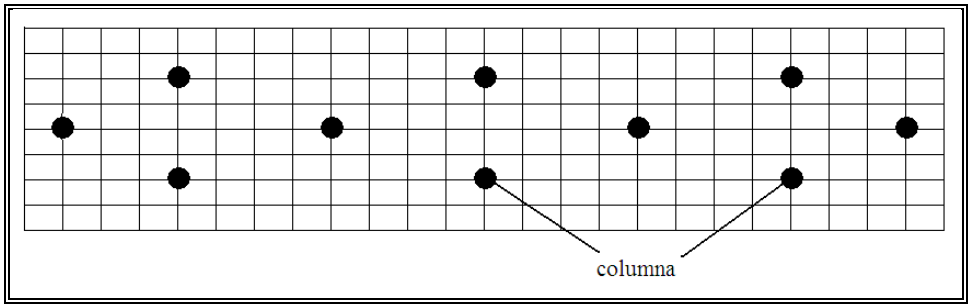


Figura 3.14: Distribución de varillas soportes en cámara de secado

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación se analiza la factibilidad de construcción del secador de hojas descrito en los capítulos anteriores, se tiene las dimensiones del mismo y los equipos seleccionados conforme a la capacidad de secado que se necesita.

Proyecto: Diseño de un secador de hierbas aromáticas

DESHIDRATADOR DE HOJAS

ITEM	DESCRIPCION DE MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Tubo cuadrado 50x50x3 (6 metros)	18	metros	$ 1,15	$ 20,70
2	Plancha AISI 316 (2440x1220x3)	1	unidad	$ 322,92	$ 322,92
3	Quemador Wayne HSG 200000 BTU/h	1	unidad	$ 1.008,00	$ 1.008,00
4	Ventilador 1000 cfm - 0,5 HP	1	unidad	$ 250,00	$ 250,00
5	Plancha cubierta de secador	37	unidad	$ 80,70	$ 2.985,90

	espesor 3 mm				
6	Plancha perforada 2440x1220x3 AISI 316	15	unidades	$ 322,92	$ 4.843,80
7	Varilla redonda corrugada Ø 8 mm	176	metros	$ 0,44	$ 77,44
8	Intercambiador de Calor y accesorios	1	unidad	$ 1.030,00	$ 1.030,00
9	Fungibles, maquinas e imprevistos	1	unidad	$ 1.580,80	$ 1.580,80

TOTAL	$ 12.119,56

Costo de materiales	$ 12.119,56
Mano de obra	$ 5.453,80
Utilidad	$ 5.272,00
Costo total	$ 22.845,36
IVA 12%	$ 25.586,80

Este costo total incluye lo siguiente:

- Construcción y montaje mecánico de las estructuras y equipos de secador.

- Solo se incluye el trabajo mecánico, no se considera ningún valor eléctrico para puesta en marcha del sistema.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Mediante este sistema el agricultor puede obtener un producto de calidad a menor costo y poder competir en el mercado nacional e internacional de ser el caso.

- Todo el secador es de fácil construcción y operación, todos los materiales y equipos se encuentran en el mercado.

- El combustible utilizado para el secado de la hierba Luisa es también de fácil accesibilidad en el mercado y relativamente de bajo costo en comparación con secadores eléctricos existentes en el País.

- El proceso de secado de la hierba Luisa es bastante lento, ya que debe conservar las propiedades que la hacen apetecible en el mercado, este proceso puede durar alrededor de 4 horas, por lo que la máquina va a estar funcionando 8 horas, ya que se hace 2

jornadas de secado diario para alcanzar los niveles establecidos de producto en el mercado.

- Se debe usar aislante en las paredes de los ductos existentes en el secador, para aprovechar todo el calor posible y evitar pérdidas, además de la seguridad de los operarios.

Recomendaciones

- Se recomienda utilizar una termocupla en la cámara de secado, ya que la temperatura de dicha cámara no debe pasar los 45ºC, porque el producto se presentaría quebradizo.

- Se debe llevar un plan de mantenimiento de todo el sistema de secado por lo menos cada 3 meses, para limpiar impurezas que puedan ocasionar daños en el producto final.

- En la recepción de la hierba Luisa y en el ingreso a la cámara de secado, es importante revisar el tamaño de las hojas para tener un producto de óptima calidad y repetir el proceso de corte de ser necesario.