ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DIDÁCTICO PARA REALIZAR PRUEBAS DE SECADO"

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

Luis Leonardo Carreño Torres
María del Pilar Gallardo Flores
Christian Marcelo Macías Aguiar

GUAYAQUIL – ECUADOR

2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos antes que nada a Dios, por habernos permitido llegar hasta este día. A nuestros padres, hermanos y demás familiares que estuvieron apoyándonos a lo largo de este camino. Al Director del presente Proyecto de Graduación, MSc. Guillermo Cárdenas, por la guía, ayuda e impulso para continuar y acabar este trabajo y a todos los demás profesores que nos aconsejaron para que este Proyecto sea lo que es hoy. A nuestros amigos, quienes nos alentaron y ayudaron cuando las cosas parecían que no se resolverían.

DEDICATORIA

A mis hermanos:

Orlando, representas nuestra unión, eres mi ejemplo a seguir.

Jessenia, eres mi fuente de inspiración, la motivación de mi alma.

Kevin y Daniel, sus muestras de afecto y momentos que compartimos siempre me guiaron para darles un mejor futuro.

César, eres lo mejor de mi vida, solo te describiría como la acción de mis reacciones.

Cristhian Macías Aguiar

DEDICATORIA

A DIOS por haberme dado la fortaleza, valentía, inteligencia y paciencia; ¡sí! sobre todo paciencia para encontrar el camino y armas necesarias para la consecución de este primer gran objetivo.

A mi madre Laura que es luz, amor y ternura, a mi padre Luis que me ha demostrado fuerza, consejo y apoyo y a mi hermana Luisana que es centro, razón y fe en mi vida. A toda mi familia (abuelitos, tíos y primos) que tienen un lugar en mi mente, corazón y oraciones al Creador.

A mis amigos ESPOL, soporte, alegría y tristeza, consejo y apoyo, lucha y descanso, los cuales son dueños, en parte, de los mejores años de mi vida. A mis profesores mención especial a la Miss Olguita, de quien guardo sabias palabras y gratos recuerdos.

Finalmente a mis compañeros de tesis por el trabajo realizado.
"Si no puedes volar corre; si no puedes correr camina; si no puedes caminar arrástrate, pero nunca te detengas" Martin Luther King

Luis Carreño Torres

DEDICATORIA

A Dios, quien ha sido la fortaleza a lo largo de este caminar y la razón de todo lo que soy.

A mis padres, hermanos y familiares: gracias por sus palabras de aliento y por estar siempre pendiente del avance de este trabajo. Sobre todo le dedico esto a mis padres, quienes han sacrificado mucho por hacerme la persona y profesional que soy hoy.

A mis amigos de la universidad, por su preocupación y ayuda en este trabajo y a lo largo de nuestro estudio. Sobre todo a Andrea, muchas gracias por impulsarme cuando sentía que las cosas no daban para más.

A todos mis amigos, quienes me han ayudado con sus oraciones, dándome la fuerza para continuar en los momentos difíciles.

“Pon un motivo sobrenatural a tu ordinaria labor profesional, y habrás santificado el trabajo.”

San Josemaría Escrivá de Balaguer

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Carlos Balladares

PRESIDENTE

MSc. José Guillermo Cárdenas

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Bernardo Mora Andrade

VOCAL PRINCIPAL

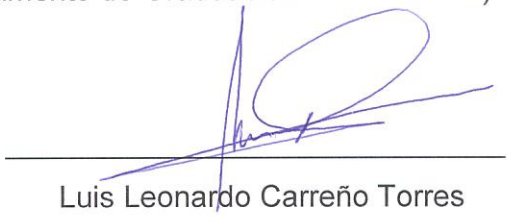
PhD. José País Chanfrau

VOCAL ALTERNO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Luis Leonardo Carreño Torres

María del Pilar Gallardo Flores

Christian Marcelo Macías Aguiar

RESUMEN

El presente trabajo detalla el proceso seguido para el diseño y la posterior construcción de un secador que utilice vapor como medio de calentamiento, de manera que se puedan construir curvas de secado a partir de las pruebas realizadas en dicho equipo.

Los parámetros de secado así como las condiciones de operación fueron establecidos mediante pruebas preliminares en otro secador a base de resistencias eléctricas y de pruebas en los laboratorios de Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la ESPOL. A partir de estos datos se realizó el diseño del intercambiador de calor y del cuerpo del secador con ayuda de tablas, nomogramas y los balances de materia y energía.

Una vez diseñado se pasó a la construcción del equipo, verificando que los materiales conseguidos en el mercado fueran acorde a lo que se determinó en el diseño. Con el equipo montado se procedió a obtener las curvas de secado y por ende, los parámetros de secado de dos especies (manzana y toronjil). Además, se incluyen manuales de operación y prácticas para uso de los estudiantes donde se dan indicaciones en el uso y finalidad de este equipo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN I
ÍNDICE GENERAL II
SIMBOLOGÍA V
ÍNDICE DE FIGURAS VIII
ÍNDICE DE TABLAS XI
INTRODUCCIÓN XII
CAPÍTULO 1 14
FUNDAMENTOS TEÓRICOS 14
1.1 Definición de la operación unitaria de secado 15
1.2 Objetivos de la operación unitaria de secado 16
1.3 Tipos de secadores 16
1.4 Factores que intervienen en el proceso de secado 19
1.5 Psicrometría 24
1.6 Cinética del secado 28
CAPÍTULO 2 33
SELECCIÓN DE MUESTRAS 33
2.1 Manzana 34
2.1.1 Cultivo 36
2.1.2 Producción 36
2.1.3 Aplicaciones 38
2.2 Toronjil 39
2.2.1 Cultivo 40
2.2.2 Producción 41
2.2.3 Aplicaciones 42
2.3 Metodología 43
2.4 Resultado de las pruebas de secado en laboratorio 44

CAPÍTULO 3 51
DISEÑO DEL EQUIPO 51
3.1 Características del equipo de secado del Laboratorio de Operaciones Unitarias 52
3.2 Propiedades del aire ambiente 52
3.3 Diseño del intercambiador de calor 55
3.3.1 Características de los flujos de entrada y salida 56
3.3.2 Área de transferencia de calor 57
3.3.2.1 Media logarítmica de la diferencia de temperaturas en el intercambiador y factor de corrección 58
3.3.2.2 Calor transferido 59
3.3.2.3 Coeficiente de transferencia de calor 60
3.3.2.4 Coeficiente de película del vapor 60
3.3.2.5 Coeficiente de película del aire 61
3.3.2.6 Geometría del intercambiador 66
3.3.3 Caída de presión del vapor 68
CAPÍTULO 4 71
CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS EN EL EQUIPO 71
4.1 Secuencia de construcción del equipo 72
4.2 Pruebas experimentales 75
4.2.1 Curvas de secado 75
4.2.2 Resultados obtenidos 80
4.3 Costo de construcción 81
CAPÍTULO 5 86
MANUALES 86
5.1 Manual de Operación 87
5.1.1 Introducción 87
5.1.2 Alcance 88
5.1.3 Responsables 88
5.1.4 Normas de Operación 88
5.1.5 Procedimiento 89

5.1.5.1 Arranque del Equipo 89
5.1.5.2 Preparación de la Muestra y el Equipo 90
5.1.5.3 Apagado del Equipo 91
5.1.6 Recomendaciones 92
5.1.7 Diagrama de flujo 93
5.2 Manual de Práctica 95
5.2.1 Objetivo General 95
5.2.2 Objetivos específicos 95
5.2.3 Procedimiento 95
5.2.4 Formulario de Impresos 97
5.2.5 Tablas y Gráficos 98
CAPÍTULO 6 102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 102
6.1 Conclusiones 103
6.2 Recomendaciones 105
ANEXOS 108
A. Parámetros medidos durante las pruebas de secado y cálculo de humedad media y velocidad media de secado 109
B. Ensamble del equipo 123
C. Nomograma para determinación de la viscosidad dinámica de gases en función de la temperatura 130
D. Parámetros medidos durante las pruebas de secado en el secador diseñado y cálculo de humedad media y velocidad media de secado 131
E. Planos del equipo 136
BIBLIOGRAFÍA 141

SIMBOLOGÍA

A	Área de transferencia de calor (m^2)
c_P	Calor específico del aire [J/(kg °C)]
D_I	Diámetro interno del tubo [ft]
D_o	Diámetro externo del tubo [m]
ε	Espesor del tubo [m]
F	Factor de corrección según arreglo de tubos [adimensional]
F	Factor de fricción [$ft^2/pulg^2$]
G_t	Flujo másico por unidad de área [lb/(h ft^2)]
ΔH_V	Entalpía de vaporización [kJ/kg]
H	Humedad [kg agua/kg sólido seco]
H_A	Humedad absoluta del aire [kg agua/kg aire seco]
H_L	Humedad libre [kg agua/kg sólido seco]
H_E	Humedad en equilibrio [kg agua/kg sólido seco]
H_R	Humedad relativa a una temperatura establecida [%]
h_1	Entalpía específica del flujo de aire de entrada [kJ/kg aire húmedo]
h_2	Entalpía específica del flujo de aire de salida [kJ/kg aire húmedo]
h_i	Coeficiente de película del lado interno de los tubos [J/(s m^2 K)]
h_O	Coeficiente de película del lado externo de los tubos [J/(s m^2 K)]
k	Conductividad térmica del material del tubo [J/(s m °C)]
L_t	Longitud de los tubos [m]
MLDT	Media logarítmica de la diferencia de temperaturas [°C]
$\dot{m}_A$	Flujo másico de aire [kg/s]
N_t	Número de tubos en el intercambiador [adimensional]
Nu	Número de Nusselt [adimensional]

p	Presión total del aire [atm]
p_A	Presión parcial del agua en el aire [atm]
p_{AS}	Presión de vapor del agua a determinada temperatura [atm]
Pr	Número de Prandtl [admensional]
Pr_s	Número de Prandtl a la temperatura del vapor [adimensional]
ΔP	Caída de presión del vapor [psia]
q	Calor transferido [kJ/s]
R_i	Factor de impureza interno [(m^2 °C s)/J]
R_O	Factor de impureza externo [(m^2 °C s)/J]
r_i	Radio interno del tubo [m]
r_O	Radio externo del tubo [m]
Re	Número de Reynolds [admensional]
Re_{max}	Número de Reynolds a la velocidad máxima del aire [admensional]
s_e	Gravedad específica [adimensional]
S_t	Separación transversal de los tubos [mm]
T	Temperatura del vapor saturado a 2 atm [°C]
t_1	Temperatura de entrada del aire húmedo al intercambiador [°C]
t_2	Temperatura de salida del aire húmedo al intercambiador [°C]
T_w	Temperatura de bulbo húmedo [°C]
T_s	Temperatura de bulbo seco [°C]
U	Coeficiente global de transferencia de calor [J/(s m^2 K)]
μ	Viscosidad dinámica [kg/(m s)]
ν	Viscosidad cinemática [m^2/s]
$Vmax$	Velocidad máxima del flujo de aire a través del banco de tubos [m/s]

V_s	Velocidad del aire [m/s]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de secadores según el tipo de transmisión de calor. 18

Figura 2. Curvas de humedad de equilibrio para diferentes materiales a 25 °C. 21

Figura 3. Carta psicrométrica para una mezcla aire - vapor de agua a 1 atm. 26

Figura 4. Curva típica del proceso de secado para datos de humedad libre en función del tiempo. 30

Figura 5. Curva típica de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre. 31

Figura 6. Producción mundial promedio de manzana entre los años 1993 – 2013 37

Figura 7. Mayores productores mundiales, año 2013 37

Figura 8. Producción anual de manzana en Ecuador entre los años 2000 a 2012 38

Figura 9. Participación de importadores de hierbas aromáticas en el año 2006 41

Figura 10. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de manzana (Prueba 1) 46

Figura 11. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de manzana (Prueba 2) 46

Figura 12. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de manzana (Prueba 3) 47
Figura 13. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de toronjil (Prueba 1) 47
Figura 14. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de toronjil (Prueba 2) 48
Figura 15. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de toronjil (Prueba 3) 48
Figura 16. Configuración de los tubos en la batería: alineada (izquierda) y escalonada (derecha) 62
Figura 17. Diagrama de flujo de la construcción del equipo 74
Figura 18. Curva de humedad libre en función del tiempo de secado para las muestras de manzana 76
Figura 19. Curva de humedad libre en función del tiempo de secado para las muestras de toronjil 77
Figura 20. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para las muestras de manzana 78
Figura 21. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para las muestras de toronjil 78
Figura 22. Ejemplo de una gráfica de peso total en función del tiempo de secado 99

Figura 23. Ejemplo de una gráfica de velocidad media de secado en función de la humedad media en base seca 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Composición en 100 g de manzana 35

Tabla II. Porcentaje de peso seco en la manzana y en el toronjil 44

Tabla III. Temperaturas de bulbo seco y húmedo antes y después de pasar por el material y velocidad del aire durante las pruebas realizadas 49

Tabla IV. Parámetros de secado de la manzana y toronjil 50

Tabla V. Resultados de [6] 59

Tabla VI. Resultados de [7] 59

Tabla VII. Características de los tubos de intercambiador 64

Tabla VIII. Propiedades del aire 64

Tabla IX. Resultados del coeficiente global de transferencia de calor y el área de transferencia 66

Tabla X. Valores ajustados para 3 hileras en el intercambiador de calor 67

Tabla XI. Propiedades usadas para calcular la caída de presión en [15] 70

Tabla XII. Parámetros de velocidad de secado para manzana y toronjil 80

Tabla XIII. Detalle de gastos de construcción del equipo. 82

Tabla XIV. Ejemplo de mediciones en una prueba de secado 98

Tabla XV. Ejemplo de valores calculados a partir de las mediciones de la prueba de secado 100

Tabla XVI. Ejemplo de resultados de una prueba de humedad. 101

INTRODUCCIÓN

Dentro de las operaciones unitarias que se manejan en la Ingeniería Química se encuentra la operación de secado de sólidos. Es de suma importancia conocer los mecanismos que se llevan a cabo durante esta operación, puesto que durante el proceso no sólo se secará el producto sino que se puede afectar su calidad.

El proceso de secado es uno de los más utilizados en el área de procesamiento de alimentos; habitualmente es la última operación en dicha industria previa al empaquetado. Una gran cantidad de productos son secados por diversas razones: preservación, reducción de peso o volumen para su transporte, mejoramiento de su estabilidad dimensional. La preservación de alimentos es una de las causas principales por las que se utiliza el proceso de secado, ya que el contenido de humedad se reduce de tal forma que limita el crecimiento bacteriano. Por lo tanto se debe conocer las variables que intervienen en el proceso y cómo influyen en el producto final.

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y construcción de un secador que utilice vapor como medio de calefacción; y con este equipo obtener las curvas de secado para dos alimentos sólidos naturales diferentes.

Para esto se utilizará la siguiente metodología: primero obtener los parámetros de secado en un secador que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (el cual trabaja con resistencias eléctricas como medio de calefacción), luego con estos datos se procederá a realizar el diseño teniendo presente los balances de materia y energía. Una vez obtenido el diseño y que cumpla con todos los requisitos de operación, se procederá a la construcción del equipo, en el cual finalmente se llevarán a cabo las pruebas de secado para obtener los parámetros de secado en esas condiciones.

Este Proyecto de Graduación pretende ser un aporte para el estudio de la operación unitaria de secado de sólidos, de manera que se presentan manuales de operación del equipo y de prácticas para los estudiantes. Además los estudiantes podrán realizar prácticas en los distintos secadores y hacer comparaciones en cuanto a tiempo de secado, rendimiento, calidad del producto final, entre otras variables.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Definición de la operación unitaria de secado

La operación unitaria de secado se puede definir como la transferencia de un líquido desde un sólido húmedo hasta una fase gaseosa no saturada, generalmente aire (1). En muchos casos el líquido contenido en el sólido es agua, aunque puede tratarse de cualquier otro disolvente. En cualquier caso el estudio de esta operación unitaria no difiere significativamente y muchos de los equipos y métodos de cálculos que se estudian para la eliminación de agua, también pueden aplicarse para la eliminación de otros líquidos (2). La corriente gaseosa que se utiliza generalmente es una corriente de aire, cuya temperatura se adecúa a las necesidades del proceso.

La transferencia del líquido desde la fase sólida a la fase gaseosa se produce por un gradiente térmico, diferenciándolo de procesos mecánicos como el prensado. La evaporación también utiliza calor para producir la transferencia de líquido, pero se diferencia en que ésta elimina mayor cantidad de líquido en comparación al secado (3).

El término “secado” es relativo, puesto que el producto final todavía contiene algo de líquido. Lo que finalmente se logra con esta operación es una reducción en la cantidad de líquido presente en el sólido hasta un valor deseado.

1.2 Objetivos de la operación unitaria de secado

En general se puede resumir las razones para utilizar el secado de un material en las siguientes (3):

- Facilitar la manipulación en alguna operación posterior
- Permitir la utilización satisfactoria del producto final
- Reducir costos de transporte
- Aumentar la capacidad de otros equipos o instalaciones en el proceso de producción
- Conservar un producto durante su almacenamiento y transporte
- Aumentar el valor y la utilidad de los desperdicios o subproductos obtenidos

1.3 Tipos de secadores

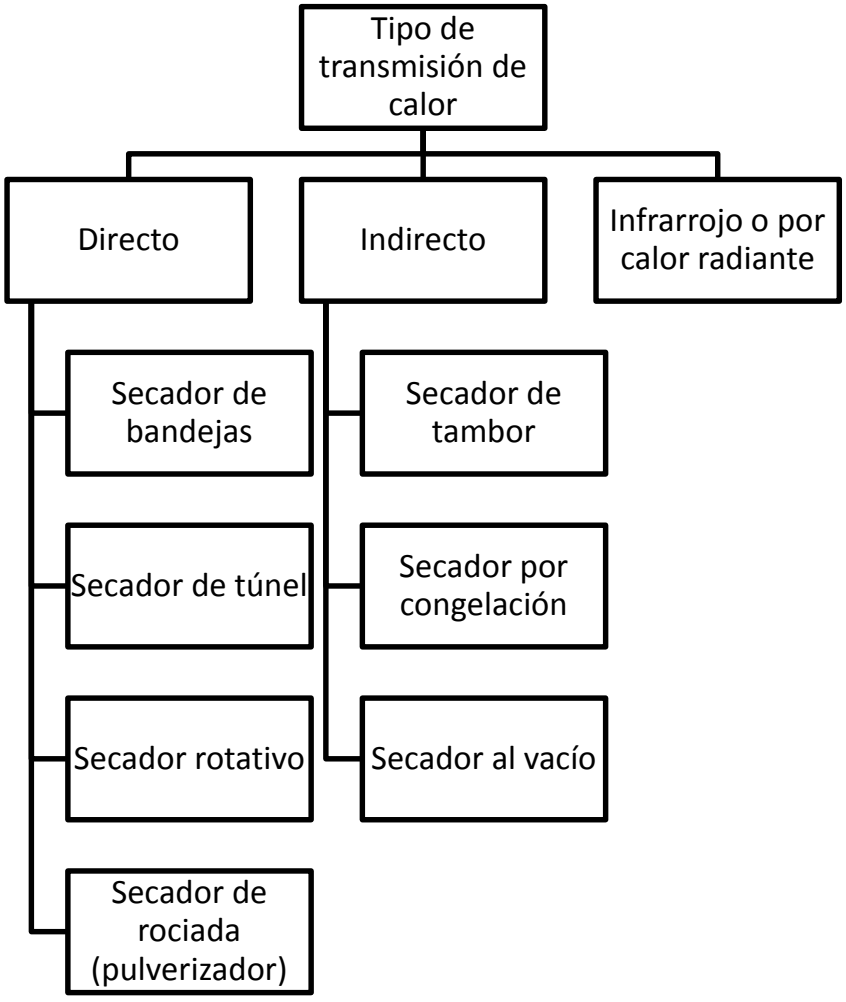
Generalmente el diseño de secadores se realiza a partir de pruebas experimentales, puesto que cada material se comporta de distinta manera ante condiciones de aire similares. Esto ha dado como resultado una gran variedad de equipos y asimismo existen diversas clasificaciones. Sin embargo pueden reducirse estas clasificaciones en dos métodos: según las características y

propiedades físicas del material húmedo y según la forma de transmisión de calor (4).

Según la transmisión de calor se puede clasificar a los secadores en tres tipos (5):

- Directos: el material húmedo y la fase gaseosa se encuentran en contacto, de manera que el calor se transmite principalmente por convección. El líquido evaporado es arrastrado y desalojado por el gas caliente.
- Indirectos: el calor se trasmite por conducción a través de las paredes que separan al material húmedo y la fase gaseosa. El líquido evaporado se desaloja separadamente al gas caliente.
- Infrarrojos: el calor depende de la transmisión y absorción de rayos infrarrojos.

Figura 1. Clasificación de secadores según el tipo de transmisión de calor.



Fuente: (5) pág. 1268 (Tomo I)

En la anterior figura se han clasificado algunos de los secadores según estas categorías. Debe tenerse en cuenta que esta clasificación no es absoluta, puesto que en la industria los secadores se adaptan según las necesidades (material a secar, costos, maquinaria disponible, entre otros).

1.4 Factores que intervienen en el proceso de secado

Existen dos procesos fundamentales y simultáneos que ocurren durante el secado de sólidos. Uno de ellos es la transferencia de calor, la cual es necesaria para evaporar el líquido, y el otro es la transferencia de masa del líquido desde la fase sólida hasta la fase gaseosa (3). Estos procesos son controlados por los siguientes parámetros:

a) Contenido de humedad

Es la cantidad de agua presente en el sólido. Se expresa como el porcentaje de la masa de agua dividido para la masa del sólido. Si se utiliza la masa de sólido exenta de agua, el contenido de humedad es en base seca. Si se usa la masa total de sólido (considerando la cantidad de agua presente en él), el valor obtenido será en base húmeda (6).

Dado que en el secado la cantidad de agua disminuye a lo largo del proceso, el peso de sólido húmedo también será variable. Por tanto para los cálculos es más conveniente utilizar la humedad en base seca, puesto que la base de peso se mantiene constante a lo largo del proceso (7):

$$H = \frac{kg\ agua}{kg\ sólido\ seco} \times 100 \qquad [1]$$

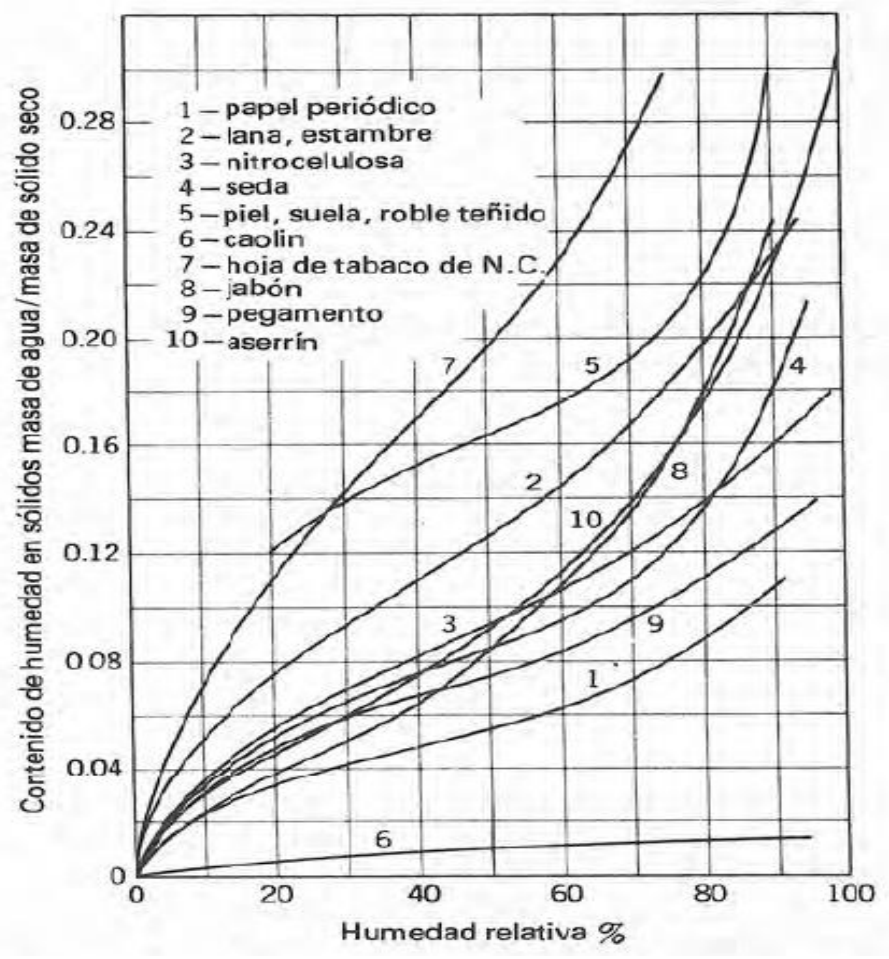
En el presente trabajo se utilizará siempre el contenido de humedad en base seca, a menos que se indique lo contrario.

b) Humedad de equilibrio

Es la cantidad de agua retenida en el sólido que se encuentra en estado de equilibrio con el vapor de agua de la corriente de aire a condiciones concretas de humedad y temperatura. Es decir que la presión parcial que ejerce el agua en el sólido es la misma que ejerce en la corriente de aire (3). Este valor determina el límite hasta el cual es posible secar un material bajo determinadas condiciones (5), puesto que en este punto cesa la transferencia de masa.

La figura 2 muestra curvas de contenido de humedad para algunos materiales sólidos a una temperatura del aire de 25 °C. A partir de estas curvas se puede determinar la humedad de equilibrio a las condiciones dadas para la corriente de aire. Por ejemplo: a 25 °C el papel periódico tiene una humedad de equilibrio de 0.08 kg agua/kg material seco para una humedad relativa del aire de 75%. Por lo tanto el producto final tendrá como mínimo una humedad del 8%.

Figura 2. Curvas de humedad de equilibrio para diferentes materiales a 25 °C.



Fuente: (1), pág. 466

La misma figura permite observar que la humedad de equilibrio de los materiales, bajo las mismas condiciones de humedad relativa y temperatura del aire, varía considerablemente. La estructura del sólido influye en la forma en que el agua se encuentra retenida en el sólido así como en la migración del líquido hacia la superficie. Por ende estas curvas no deben considerarse

válidas para otros sólidos similares o incluso para variedades del mismo material.

c) Humedad libre

Es la cantidad de agua retenida en el sólido que se encuentra sobre el contenido de humedad de equilibrio. Esta no es la cantidad de humedad del sólido, sino que indica la cantidad máxima que puede extraerse por medio del proceso de secado bajo las condiciones predeterminadas del aire (5). Puede calcularse según la siguiente expresión:

$$H_L = H - H_E \qquad [2]$$

Tómese como ejemplo el caso del papel periódico, cuya humedad de equilibrio es del 8% a una humedad relativa del 75%, como se ha indicado previamente. Si se cuenta con una muestra de este material con un contenido de humedad del 20%, el proceso de secado con una corriente de aire a 25 °C y 75% de humedad relativa podrá eliminar agua hasta llegar al 8% de humedad. Es decir, que la humedad libre del papel periódico es del 12% (bajo esas condiciones del aire).

d) Humedad absoluta del aire

Es la cantidad de agua que se encuentra en una mezcla agua – aire. Se expresa como el cociente entre la masa de agua y la masa de aire seco. Al trabajar con gases, es más fácil trabajar con valores de presión. De manera que se puede calcular la humedad del aire de la siguiente forma (8):

$$H_A = \frac{18.02\, p_A}{28.97\, (p - p_A)} \qquad [3]$$

e) Humedad relativa del aire

Es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la cantidad máxima que puede contener en esas condiciones (9). Se la expresa como porcentaje, según la siguiente ecuación:

$$H_R = \frac{p_A}{p_{AS}} \times 100 \qquad [4]$$

La humedad relativa varía en función de la temperatura del aire. A medida que la temperatura aumenta, la cantidad de agua que puede contener el aire disminuye y por lo tanto su humedad relativa también disminuye. La humedad

relativa puede cambiar en función de la temperatura aunque la humedad absoluta del aire permanezca constante.

f) Temperatura del aire

Al aumentar la temperatura del aire, el contenido de humedad en equilibrio disminuye. Generalmente para variaciones moderadas de temperatura, se considera que el contenido de humedad de equilibrio es constante. Sin embargo esta aproximación sólo es válida, cuando no se dispongan de datos experimentales (10).

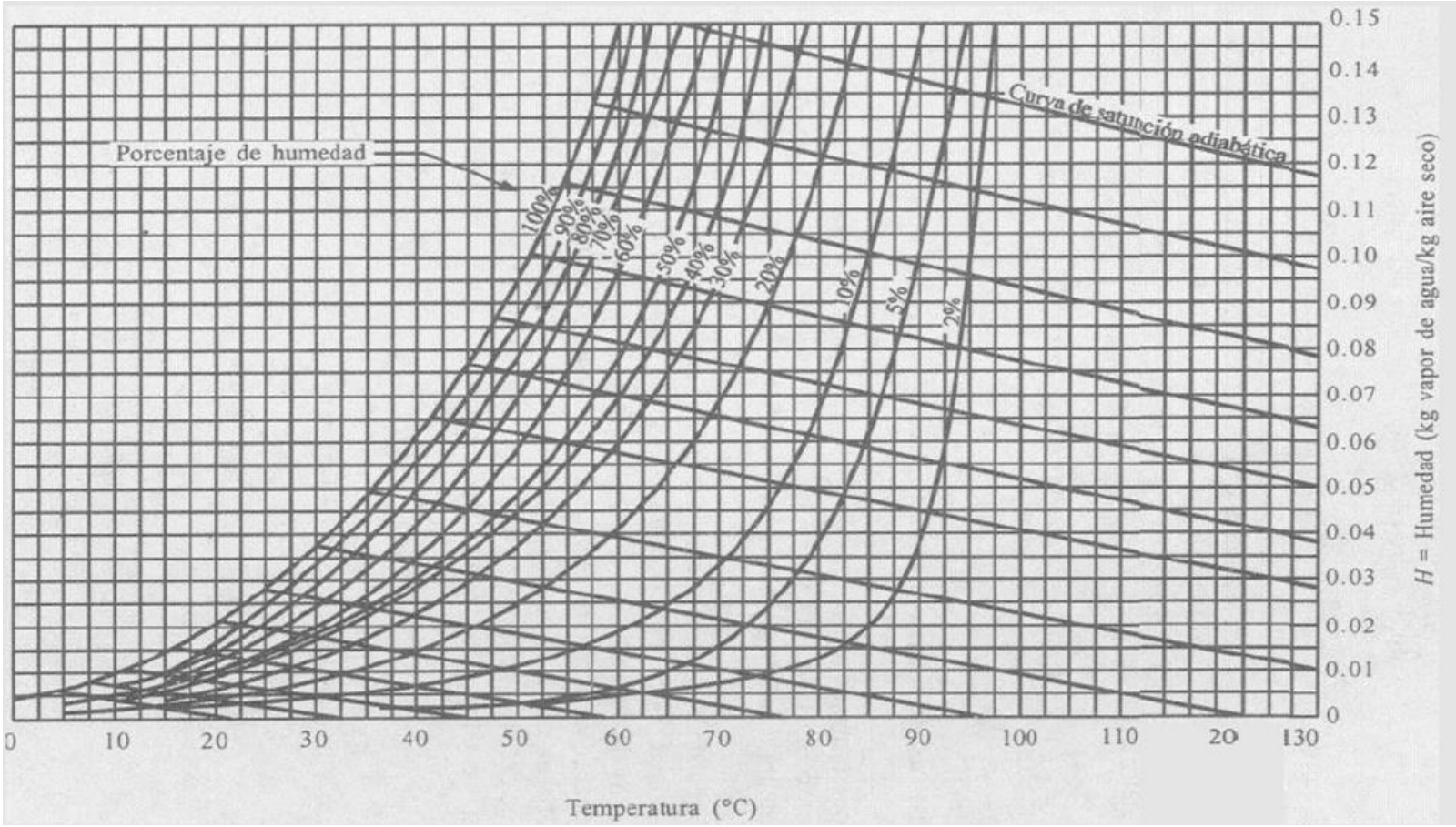
1.5 Psicrometría

Dentro de los factores que afectan el proceso de secado de un material, se enumeraron algunos que tienen relación con las condiciones de la fase gaseosa (aire). La mezcla aire – vapor de agua es un ejemplo de una mezcla de un gas permanente y un vapor condensable; las propiedades de dicho sistema pueden mostrarse en un diagrama conocido como carta de humedad o carta psicrométrica (11).

Las cartas psicrométricas son aplicables solo a la presión total fija que indica la carta. La figura 3 muestra una carta psicrométrica a 1 atm de presión. La

ventaja de utilizar una carta psicrométrica es que permite determinar las propiedades termodinámicas de una mezcla aire – vapor de agua con sólo conocer dos propiedades independientes de una manera práctica, es decir, sin necesidad de utilizar ecuaciones matemáticas. En el eje de las abscisas se representa la temperatura de bulbo seco y en el eje de las ordenadas se representa la humedad absoluta.

Figura 3. Carta psicrométrica para una mezcla aire - vapor de agua a 1 atm.



Fuente: (2), pág. 589

Entre las propiedades que se pueden conocer están:

- Temperatura de bulbo seco.- Es la temperatura de una mezcla aire – vapor de agua medido con un termómetro de la manera usual. Esta propiedad se lee en la abscisa.
- Temperatura de bulbo húmedo.- Es la temperatura que se obtiene al medir la temperatura del aire utilizando un termómetro cuyo bulbo está cubierto por una gasa empapada en el líquido componente de la fase vapor del sistema aire – líquido (generalmente agua, la cual se refleja en la carta del sistema aire – vapor de agua). El aire no saturado causa que el líquido se evapore y disminuya la temperatura. Por tanto la temperatura de bulbo húmedo siempre es menor que la temperatura de bulbo seco, siendo iguales solo en el caso de que la corriente de aire esté saturada. Para encontrar este parámetro se sigue la línea de entalpía hasta tocar la curva de 100% humedad relativa y leer en la escala indicada.
- Humedad relativa.- Se representa por las líneas curvas que muestran porcentajes, siendo el 100% la línea de saturación de la mezcla aire – agua a la presión indicada. La humedad relativa es, como ya se ha indicado antes, la relación entre la presión de vapor que ejerce el vapor de agua en dicha mezcla y la presión de vapor del agua pura a esa temperatura.

- Entalpía específica.- Es la cantidad de energía que puede intercambiar la mezcla con el entorno, en este caso es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco. Se representa por la escala que se encuentra sobre la curva de 100% de humedad relativa.
- Volumen específico.- Es el volumen que ocupa una cantidad de masa de aire húmedo por unidad de masa de aire seco. Se representa por las líneas verticales ligeramente inclinadas a la izquierda.

Generalmente es fácil determinar la temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo del aire, de manera se utilizan estas dos propiedades para conocer las demás propiedades de la corriente de aire a partir del uso de la carta psicrométrica.

1.6 Cinética del secado

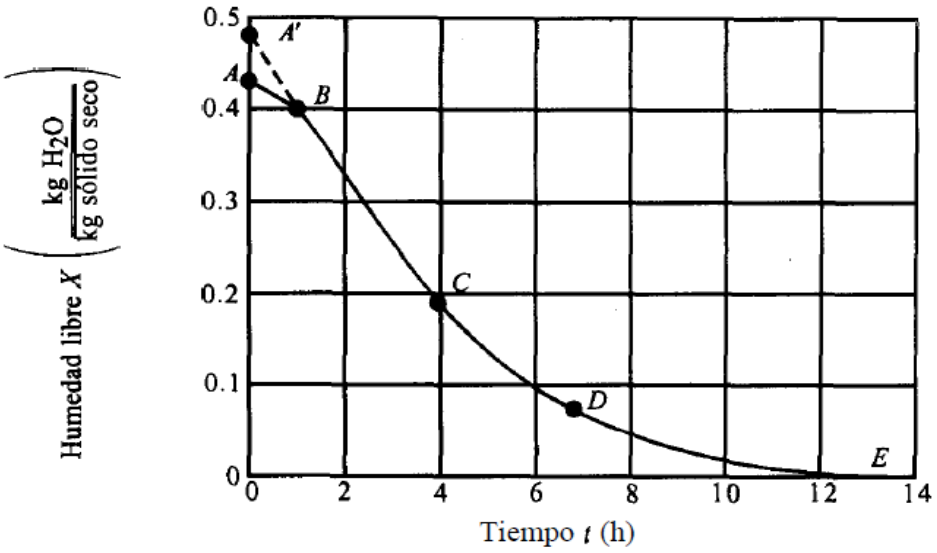
El proceso de secado puede dividirse cuatro etapas, según varía la velocidad a lo largo del proceso de secado. Estas etapas pueden visualizarse en dos gráficas: humedad libre en función del tiempo (figura 4) y velocidad de secado en función de la humedad libre (figura 5).

Al inicio del secado (segmento AB) la temperatura del sólido aumenta o disminuye para ajustarse a la temperatura de la corriente de gas hasta que se

alcanza un estado estable. Esta etapa es inestable y generalmente dura muy poco, por lo que muchas veces no se lo representa en las curvas de secado (11). La velocidad de secado en esta etapa puede aumentar o disminuir, así que es posible encontrar casi cualquier forma para la curva.

La siguiente etapa es el período de velocidad constante (segmento BC), la cual es siempre una línea recta. En la práctica la velocidad puede disminuir ligeramente, lo que se refleja en la ligera inclinación de la línea recta. La superficie del sólido se encuentra saturada del líquido y el sólido prácticamente no influye en la velocidad de secado (2). Sin embargo la estructura irregular del sólido permite que la velocidad de evaporación del líquido sea mayor que si se tratara de una capa de líquido plana (1). Esta etapa termina en el valor de humedad crítica (punto C) y el tiempo necesario para llegar a este valor se conoce como tiempo crítico.

Figura 4. Curva típica del proceso de secado para datos de humedad libre en función del tiempo.

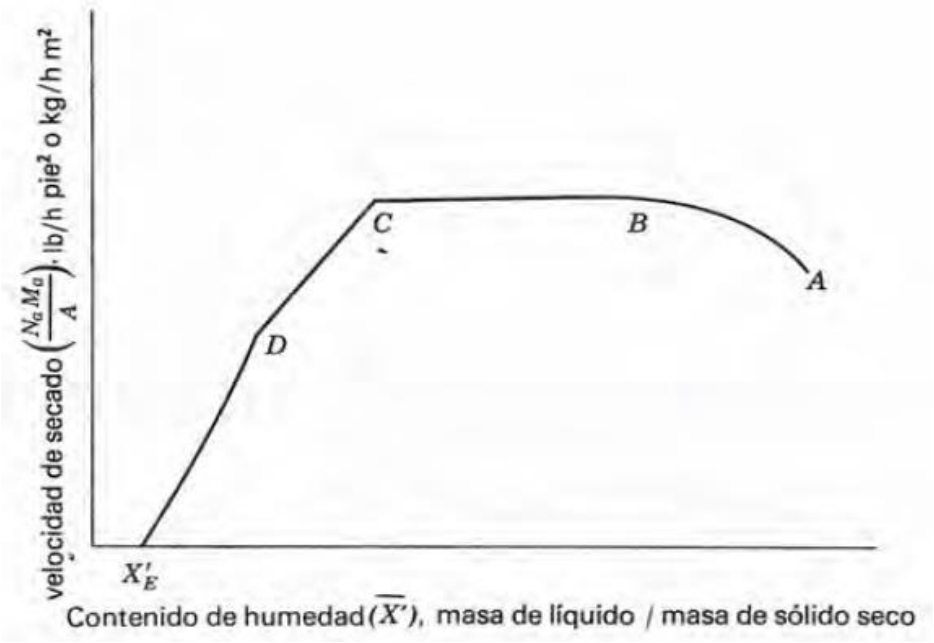


Fuente: (2), pág. 598

A partir de la humedad crítica, comienza la primera etapa de velocidad decreciente (segmento CD). La superficie del sólido se agota de líquido y eso disminuye la velocidad de transferencia de líquido desde el sólido hacia la corriente gaseosa. A partir del punto D comienza la segunda etapa de velocidad decreciente, en la cual prácticamente toda la evaporación del líquido ocurre desde el interior del sólido. Este mecanismo es muy lento, por lo que la velocidad disminuye drásticamente. Finalmente el proceso de secado termina al alcanzar la humedad de equilibrio bajo esas condiciones de operación (punto E) (2). En algunos casos sólo se encuentra un período de velocidad decreciente, que abarca desde la humedad crítica hasta la humedad de equilibrio.

La curva humedad libre en función del tiempo se puede construir a partir de datos experimentales. En esta gráfica la pendiente (dH/dt) es la velocidad de secado, de manera que se puede construir la curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad a partir de un tratamiento matemático de los datos de la curva obtenida experimentalmente.

Figura 5. Curva típica de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.



Fuente: (1), pág. 460

Como ya se ha indicado varias veces, el secado de un material depende de la naturaleza del sólido y de los mecanismos por los que el líquido se desplaza desde el interior del sólido hasta la superficie. Estas gráficas pueden variar,

aunque siempre es posible al menos identificar la etapa de velocidad constante y la etapa de velocidad decreciente.

CAPÍTULO 2

SELECCIÓN DE MUESTRAS

2.1 Manzana

La manzana proviene del manzano, el cual es un árbol llamado *Malus*, el cual pertenece a la familia *Rosaceae*, subfamilia *Maloideae* (*Pomoideae*). Dentro de este grupo se han registrado hasta 78 especies primarias. Los manzanos domésticos (*Malus domestica* Borkh.) provienen en su mayoría de *Malus pumila* y otras especies silvestres, como *Malus silvestris* nativa de Europa.

Este árbol es un caducifolio, es decir que pierden su follaje en alguna época del año. Sin embargo en algunas pocas ocasiones puede ser siempre verde. Su altura se encuentre en el rango de 1,5 a 7 m, con un ancho en la base de 1,0 a 4,5 m. Las hojas del manzano también presentan formas variadas: ovaladas, elípticas, lanceoladas, oblongas, lobuladas o aserradas (12).

Las manzanas tienen una forma ovoide, pero pueden presentar otras formas un tanto alargadas o redondas. En el interior contienen gran cantidad de semillas de color pardo, mientras que en el exterior la piel generalmente es lisa y brillante. La piel puede tener varios colores y una forma de clasificar los pomos es justamente el color de la piel: verde, roja, amarilla y bicolor. En cada caso el aroma, sabor y calidad es distinta. Asimismo el interior de la manzana, es decir la pulpa, puede presentar variaciones: blanda o dura, dulce o ácido

(pasando por todas las variaciones entre estos sabores. En todos los casos presenta una pulpa jugosa (13).

En el ámbito comercial las frutas se venden según el calibre, es decir el tamaño del pomo. Las manzanas que más se venden son aquellas que tienen un calibre de 75 mm a 85 mm o más. Se considera que para cada 100 g de manzana, la composición se puede desglosar de la siguiente manera (14):

Tabla I. Composición en 100 g de manzana

Componente	Cantidad (por cada 100 g manzana)
Agua	84 g
Carbohidratos	15 g
Proteínas	0,19 g
Fibras	2,70 g
Lípidos	0,40 g
Calcio	7 mg
Fósforo	7 mg
Magnesio	5 mg
Azufre	5 mg
Hierro	0,18 mg
Vitamina B3 (Niacina)	0,17 mg
Vitamina A	15,9 µg
Vitamina E	0,40 mg

2.1.1 Cultivo

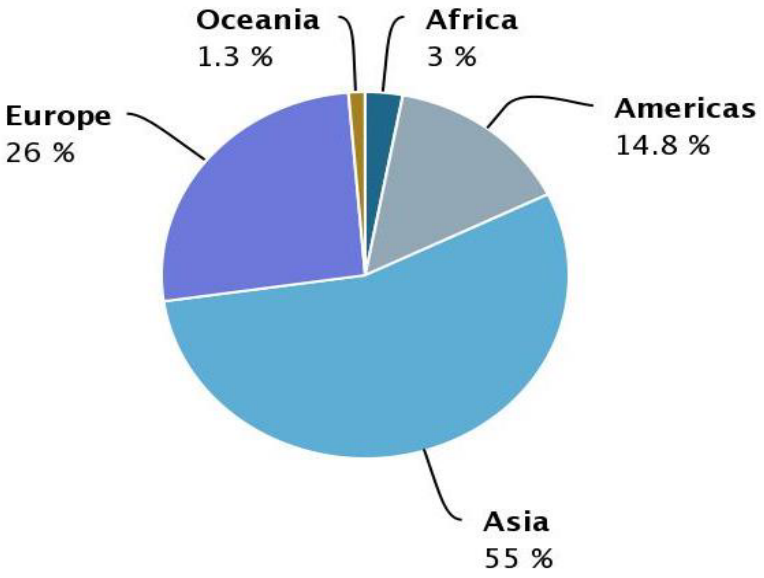
El manzano fue introducido en España por los pueblos del norte de África y durante el proceso de romanización de la península. El manzano se planta en varias latitudes, aunque se prefiere sobre todo los climas templados. Son resistentes al frío invernal, sin embargo sus flores son sensibles a las heladas primaverales. Los manzanos pueden cultivarse en la mayoría de suelos, sin ser alguno de preferencia. Sin embargo la humedad debe estar en un valor medio: ni muy seco ni excesivamente húmedo (15).

2.1.2 Producción

El continente con mayor producción en el mundo es Asia, con una cantidad aproximada de 49.000.000 toneladas al año 2013, según datos de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, por sus siglas en inglés). Esto representa alrededor del 64% a nivel mundial. La figura 6 muestra el porcentaje de aportación de cada continente entre los años 1993 y 2013.

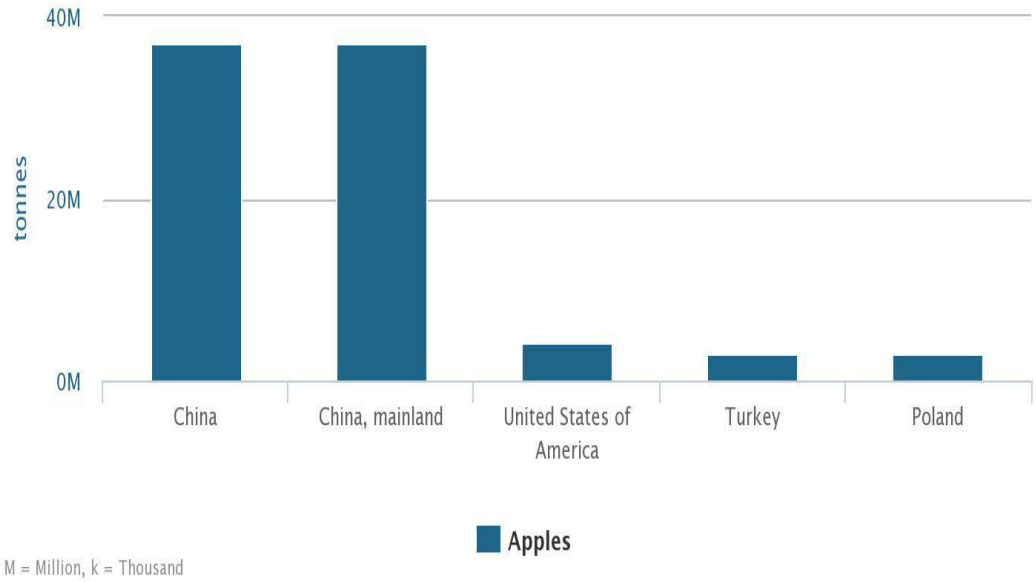
Los mayores productores de esta fruta a nivel mundial para el 2013, fueron China (37.000.000 toneladas), Estados Unidos (4.110.000 toneladas), Turquía (2.900.000 toneladas) y Polonia (2.800.000 toneladas) (20). La siguiente figura muestra la producción de estos países de forma comparativa.

Figura 6. Producción mundial promedio de manzana entre los años 1993 – 2013



Fuente: (16)

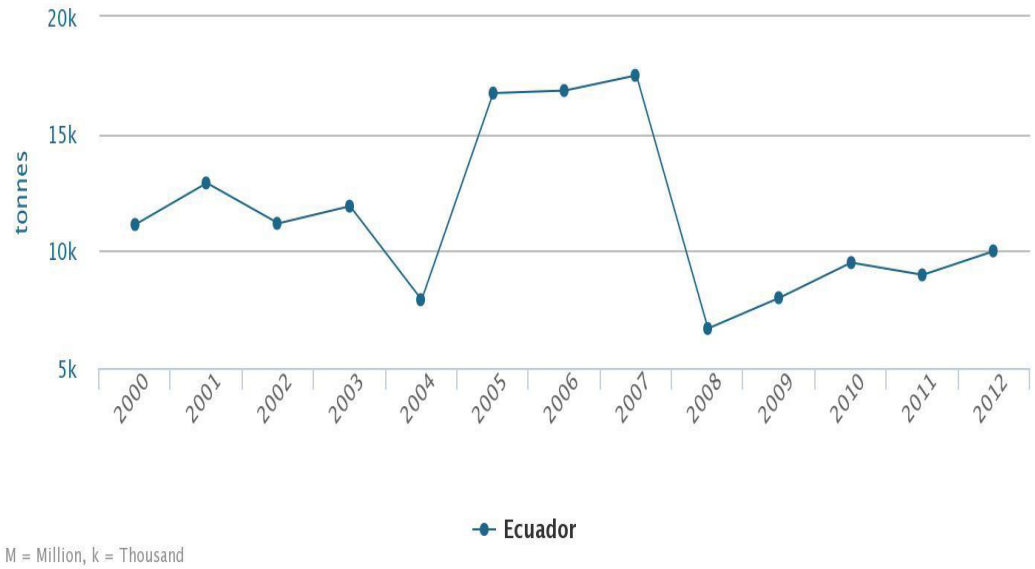
Figura 7. Mayores productores mundiales, año 2013



Fuente: (16)

En nuestro país la producción de manzana en el año 2012 fue de 10.000 toneladas. En el año 2011 la producción de manzana representaba el 2% de la oferta total de frutas (17). En general, la producción de manzana en Ecuador se ha mantenido bastante estable, como se aprecia en la figura 8.

Figura 8. Producción anual de manzana en Ecuador entre los años 2000 a 2012



Fuente: (16)

2.1.3 Aplicaciones

La manzana es un alimento que se lo puede encontrar tanto de forma natural, como de forma procesada: compotas, sidra, sirope. También tiene otros usos como (13):

- Cosmética.- Gracias a sus propiedades astringentes se la utiliza para elaborar mascarillas faciales, con el fin de eliminar impurezas y reafirmar la piel.
- Fungicida.- El vinagre de sidra tiene la capacidad de eliminar los hongos.
- Antiinflamatoria.- Ayuda en la inflamación del aparato digestivo.
- Antiácida.- El contenido de pectinas y glicina (un aminoácido) funcionan como antiácidos naturales.

2.2 Toronjil

El toronjil, también conocido como melisa, citronela u hoja de limón, es una planta herbácea de una altura variable (entre 30 y 90 cm). Es reconocida por su similar aroma al limón. Su nombre científico es *Melissa officinalis* y pertenece al grupo Angiosperma, orden *Tubiflorae* de la familia de las *Labiatae*. Posee estolones y raíces adventicias y un tallo de cuatro bordes. Las hojas se encuentran alineadas sobre el tallo, de forma ovales y con base cordada. Las flores están dispuestas en verticilos auxiliares, con un cáliz tubuloso y bampanulado. Los frutos son aquenios largos, ovalados, pardos y lisos (18).

Las hojas contienen aceite etéreo que está compuesto por diferentes aldehídos y alcoholes sesquiterpénicos: citral a y b, citronelal, geraniol y linalol. Además, se encuentran taninos, ácidos triterpénicos, marrubina y saponinas, compuestos amargos y flavonoide (19).

2.2.1 Cultivo

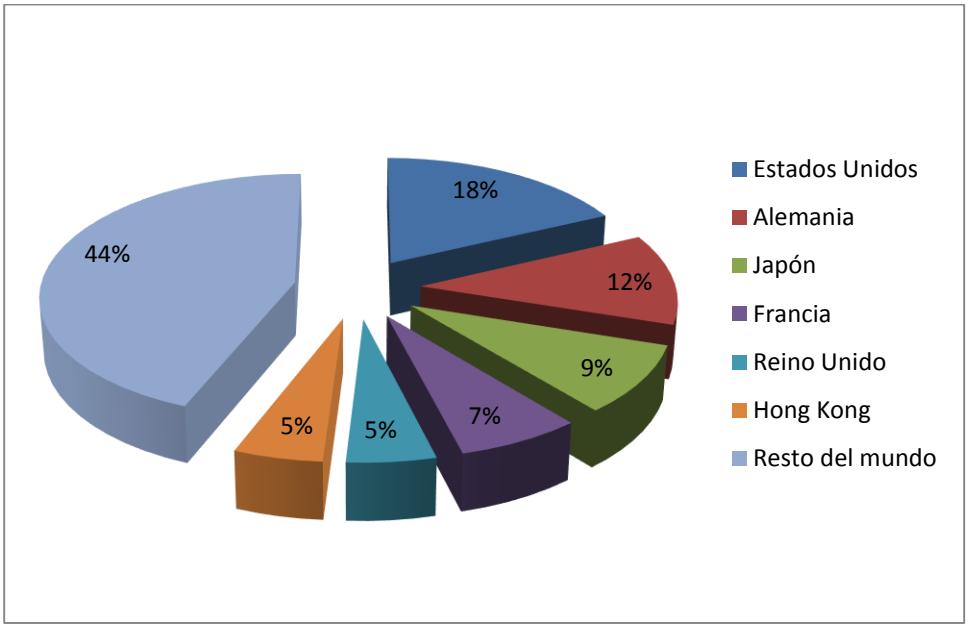
La melisa es originaria de la cuenca del mar Mediterráneo. Su cultivo se ha difundido, llegando a otras zonas del planeta como en las zonas templadas de Europa, además de Asia y América. Generalmente crece en prados húmedos, claros de bosque, a la vera de los ríos o en setos y campos cultivados; es decir, en lugares donde pueda recibir sol y a la vez protegerse a la sombra en las horas en que los rayos son más fuertes. Prefiere los suelos ricos en materia orgánica (20).

Su cultivo es fácil, puesto que no requiere cuidados especiales. Crece generalmente en lugares frescos, aunque puede crecer también en zonas soleadas, siempre que tenga algo de sombra en los momentos en los cuales los rayos del sol sean muy fuertes. Se adapta a casi cualquier tipo de suelo, incluso en suelos arenosos (21).

2.2.2 Producción

No se cuenta con datos específicos para el toronjil, sino que se lo incluye con el resto de hierbas aromáticas que se comercializan. A nivel mundial este mercado movió alrededor de 1.055 millones de USD en importaciones durante el año 2006. Entre los principales importadores de hierbas aromáticas se encuentran (en miles de dólares): Estados Unidos (188.000), Alemania (129.000) y Japón (92.300) (23).

Figura 9. Participación de importadores de hierbas aromáticas en el año 2006



Fuente: Nichos de mercados de hierbas Fundación EXPORTAR, CONACYT.

Elaboración propia

Por otro lado entre los principales exportadores en el mismo año se encuentran (en miles de dólares): China (281 500), Alemania (95 800), Estados Unidos (59 000), Francia (58 800) y Turquía (29 000). En América del Sur el mayor exportador fue Brasil con 6 100 miles de dólares en exportación (22).

En Ecuador el toronjil se cultiva sobre todo en la región de la Sierra, aunque existen cultivos en la región de la Costa. Los mayores productores se encuentran en Loja, Chimborazo, Bolívar, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua. Las exportaciones de toronjil en el año 2002 ascendieron a 2.300 kg, lo cual equivale a aproximadamente a $ 13.500 (23).

2.2.3 Aplicaciones

Por sus propiedades carminativas ha sido utilizada en diversas preparaciones aromáticas junto a otras especies, como estimulante digestivo presenta actividad antibacteriana y sedativa debida al aceite esencial, así como actividad antiviral de la fracción polifenólica e indicada en el tratamiento de espasmos gastrointestinales (22).

Por otro lado se la utiliza en algunos dentríficos debido a sus propiedades antisépticas. Como muchas otras hierbas aromáticas, se la utiliza en

infusiones para combatir problemas digestivos, dolores de cabeza y de oído, nerviosismo y ante problemas de asma (24).

2.3 Metodología

Se tomaron muestras de manzana y toronjil para ser secadas en el secador con resistencias eléctricas que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la ESPOL. Durante estas pruebas se monitorearon las siguientes variables:

- Tiempo de duración, minutos
- Peso del material, gramos
- Temperatura de bulbo seco (antes y después de pasar por el material), grados Centígrados
- Temperatura de bulbo húmedo (antes y después de pasar por el material), grados Centígrados
- Velocidad del aire, m/s

Durante estas pruebas, las muestras se colocaron sobre una malla, cuya área es de 0,04 m^2. Además se calcinaron las muestras en una mufla para obtener el peso del sólido seco en cada caso.

2.4 Resultado de las pruebas de secado en laboratorio

Primero se obtuvo el peso seco de cada muestra utilizando una mufla; este valor sirvió para calcular la humedad en base seca y de esta manera obtener las curvas de secado. En el caso de la manzana se obtuvo que, en promedio, posee un 14,55 ± 0,38 % de peso seco, mientras que el toronjil presenta un 7.48 ± 0,46 % de peso seco. Los valores encontrados en cada prueba se registran en la tabla II.

Tabla II. Porcentaje de peso seco en la manzana y en el toronjil

MANZANA		
Peso inicial (g)	**Peso final (g)**	**Peso seco (%)**
102,54	15,40	15,02
94,25	13,70	14,54
98,40	14,59	14,83
105,81	14,98	14,16
97,62	13,86	14,20
PROMEDIO		14,55
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,38
TORONJIL		
Peso inicial (g)	**Peso final (g)**	**Peso seco (%)**
34,25	2,70	7,88
25,47	2,01	7,91
30,92	2,12	6,87
32,83	2,35	7,15
36,68	2,79	7,60
PROMEDIO		7,48
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,46

Las pruebas realizadas en el secador con resistencias eléctricas se registran en el Anexo A. Se realizaron tres pruebas tanto para la manzana como para el toronjil. Con los datos obtenidos de las pruebas se calculó la humedad en base seca y entre cada par de datos se calculó el promedio de la humedad en base seca y el promedio de la velocidad de secado. Para dichos cálculos se tomó en cuenta el área de secado, la cual es el doble del área de la malla debido a que la corriente de aire pasa por ambos lados de la muestra. Por tanto el área de secado sería 0,08 m^2.

Luego se graficó la humedad libre en función del tiempo y la velocidad media de secado en función de la humedad libre. A partir de estas curvas se obtuvieron los parámetros de secado (humedad crítica, humedad en equilibrio y velocidad de secado en el período constante). A continuación se muestran las curvas de secado de cada prueba. Las gráficas muestran dos colores para distinguir las etapas del secado: a velocidad constante (azul) y velocidad decreciente (rojo).

Figura 10. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de manzana (Prueba 1)

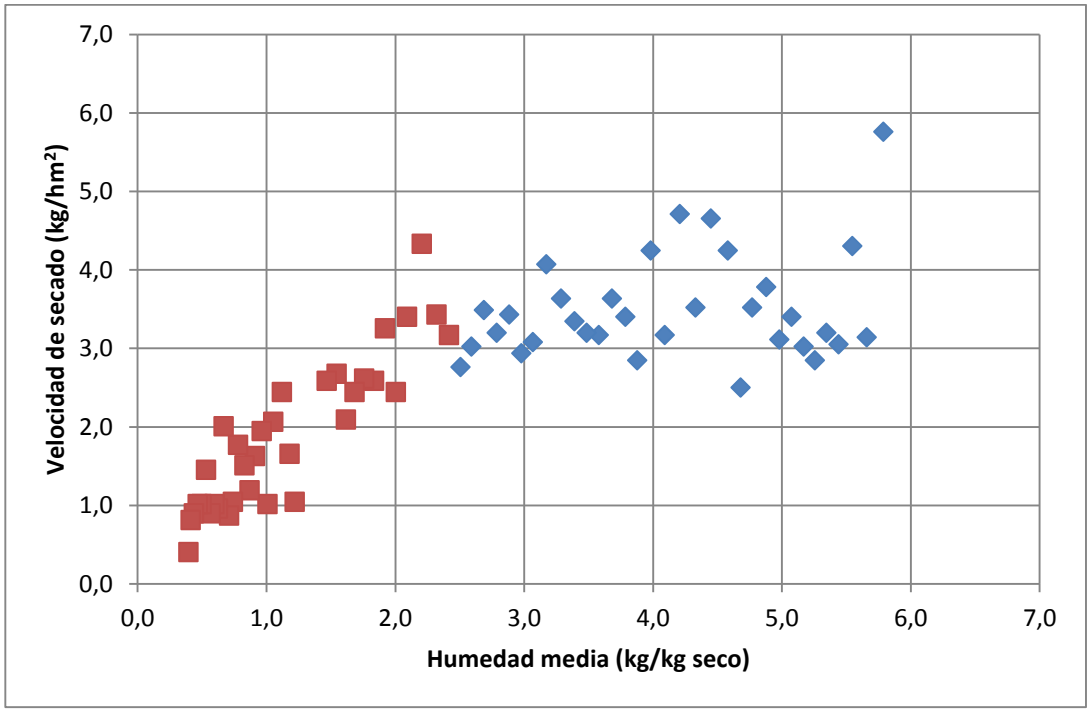


Figura 11. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de manzana (Prueba 2)

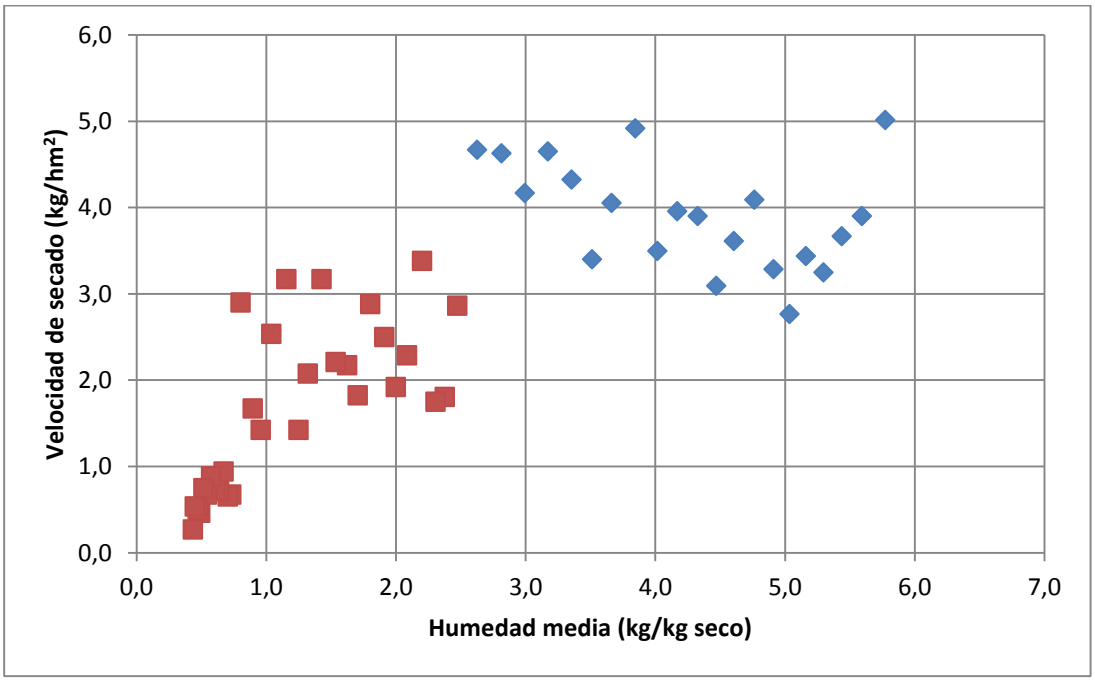


Figura 12. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de manzana (Prueba 3)

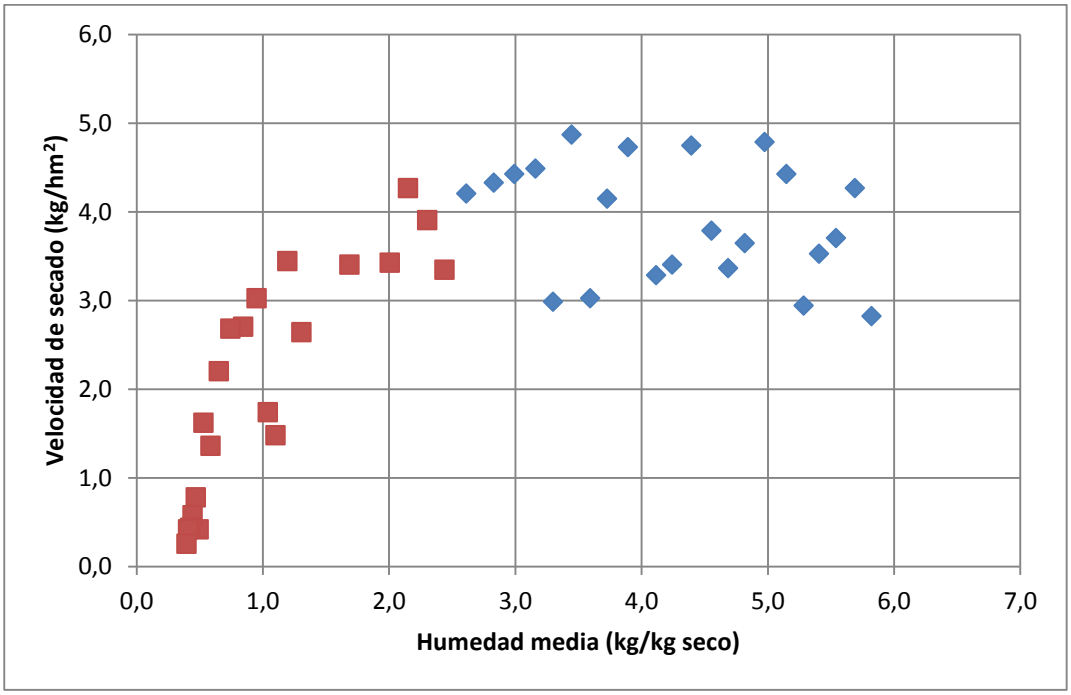


Figura 13. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de toronjil (Prueba 1)

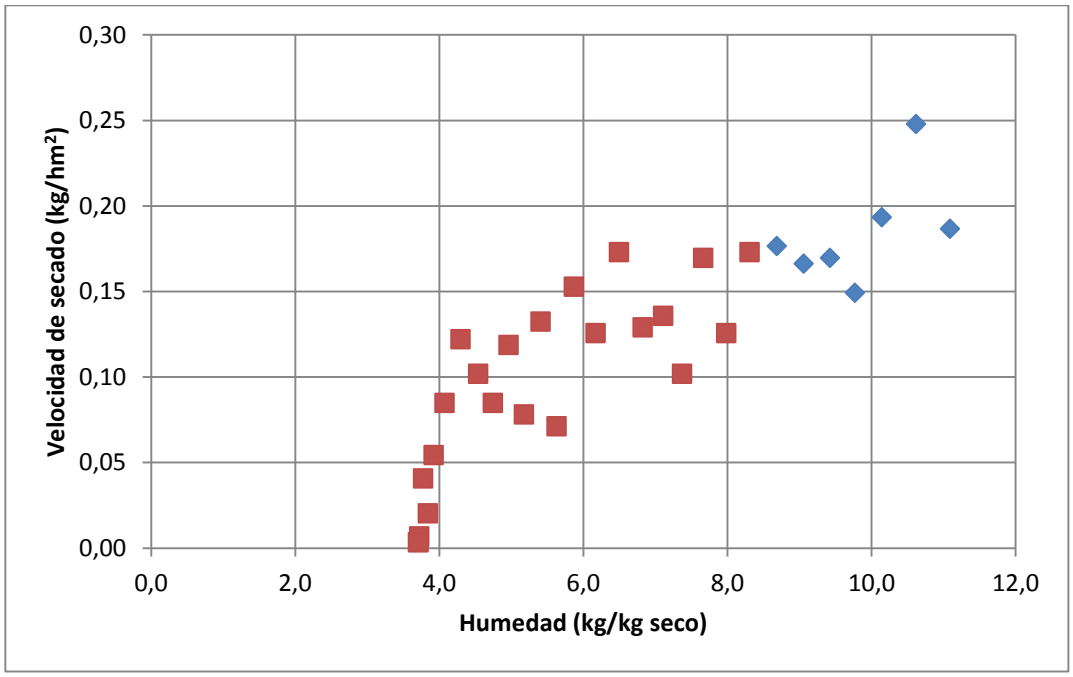


Figura 14. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de toronjil (Prueba 2)

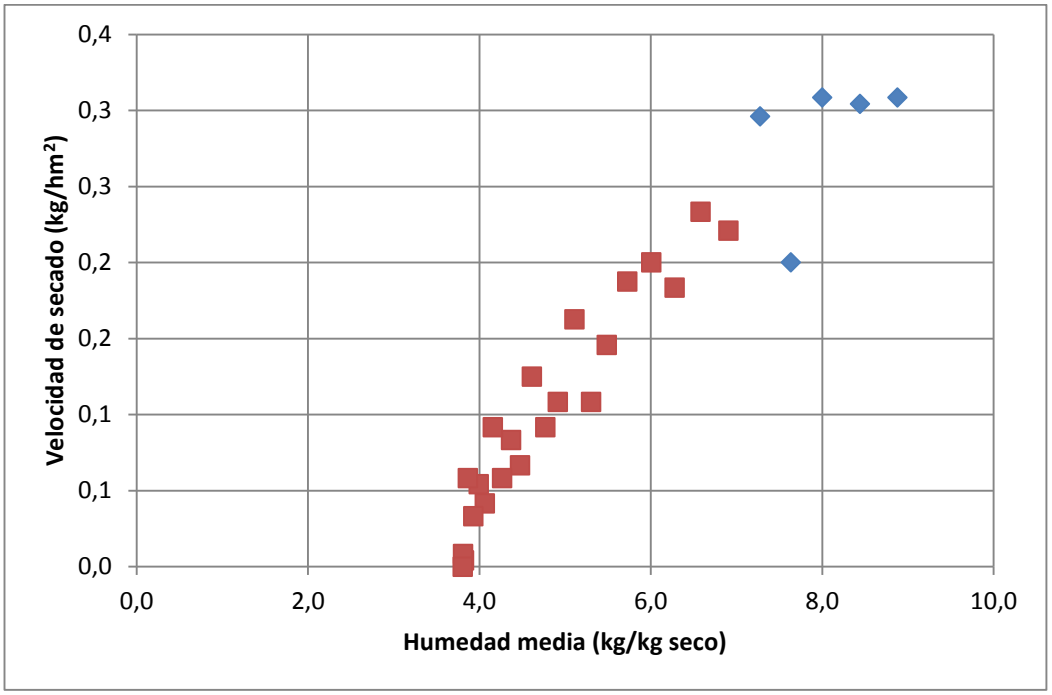
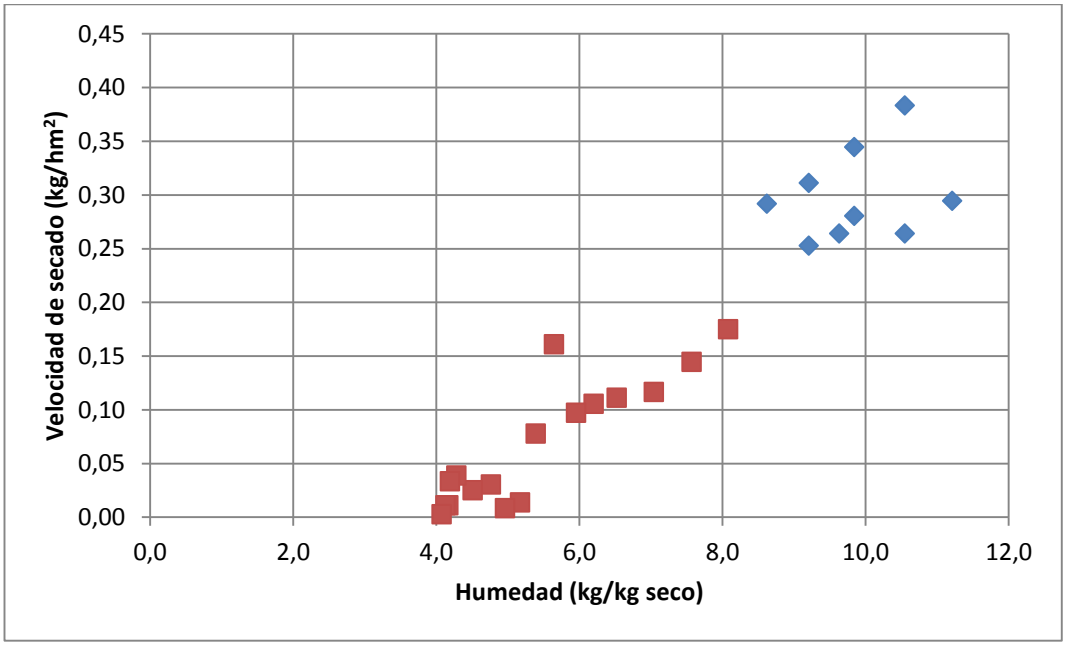


Figura 15. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para la muestra de toronjil (Prueba 3)



Durante las pruebas de secado se determinaron las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Previo a pasar por el material a secar, la temperatura de bulbo húmedo fue de 28,2 °C, la cual se mantuvo después de pasar por la muestra a secar. Esto se debe a que opera de forma adiabática. La temperatura de bulbo seco al inicio fue de 45,2 °C, la cual disminuyó después de pasar por el material a secar hasta 42,1 °C. Como puede observarse en la serie de datos obtenidos (Anexo A), los valores antes descritos son un promedio de las mediciones realizadas durante estas pruebas. Estas variaciones también afectaron a la velocidad de secado, por lo que las curvas muestran puntos muy dispersos.

Tabla III. Temperaturas de bulbo seco y húmedo antes y después de pasar por el material y velocidad del aire durante las pruebas realizadas

Prueba		T_W entrada (°C)	T_W salida (°C)	T_S entrada (°C)	T_S salida (°C)	V_S (m/s)
Manzana	1	27,9	27,9	44,5	42,3	4,83
	2	29,1	29,1	45,5	42,0	4,71
	3	27,8	27,8	46,5	43,0	5,02
Toronjil	1	27,9	27,9	44,9	42,6	4,72
	2	28,1	28,1	44,8	40,6	5,00
	3	28,2	28,2	45,0	42,3	5,12
Promedio		28,2	28,2	45,2	42,1	4,90
Desviación estándar		0,5	0,5	0,7	0,8	0,17

Para las muestras de manzana la velocidad de secado es de 3,77 ± 0,23 kg/(h·m^2), mientras que las humedades crítica y de equilibrio son 2,57 ± 0,06 kg/kg seco y 0,40 ± 0,02 kg/kg seco, respectivamente. Por otro lado para las muestras de toronjil la velocidad de secado es de 0,25 ± 0,06 kg/(h·m^2) y las humedades son 8,07 ± 0,68 kg/kg seco (crítica) y 3,86 ± 0,18 kg/kg seco (equilibrio). La siguiente tabla resume los parámetros encontrados en cada prueba.

Tabla IV. Parámetros de secado de la manzana y toronjil

MANZANA					
Prueba	**#1**	**#2**	**#3**	**Promedio**	**Desviación estándar**
Velocidad de secado (kg/h·m^2)	3,50	3,90	3,91	3,77	0,23
Humedad crítica (kg/kg seco)	2,50	2,60	2,60	2,57	0,06
Humedad de equilibrio (kg/kg seco)	0,39	0,43	0,39	0,40	0,02
TORONJIL					
Prueba	**#1**	**#2**	**#3**	**Promedio**	**Desviación estándar**
Velocidad de secado (kg/h·m^2)	0,18	0,28	0,30	0,25	0,06
Humedad crítica (kg/kg seco)	8,30	7,30	8,60	8,07	0,68
Humedad de equilibrio (kg/kg seco)	3,70	3,81	4,06	3,86	0,18

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL EQUIPO

3.1 Características del equipo de secado del Laboratorio de Operaciones Unitarias

En el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la ESPOL se encuentra un equipo para secado de sólidos que puede ser utilizado por los estudiantes. Este equipo es de madera y como medio de calefacción emplea resistencias eléctricas. La muestra a secar se coloca sobre una malla metálica de 20 x 20 cm.

El caudal de aire que puede proveer el ventilador es de 0,80 m^3/s aproximadamente; por otro lado, la temperatura que puede alcanzar el equipo es alrededor de 45 °C (temperatura del aire).

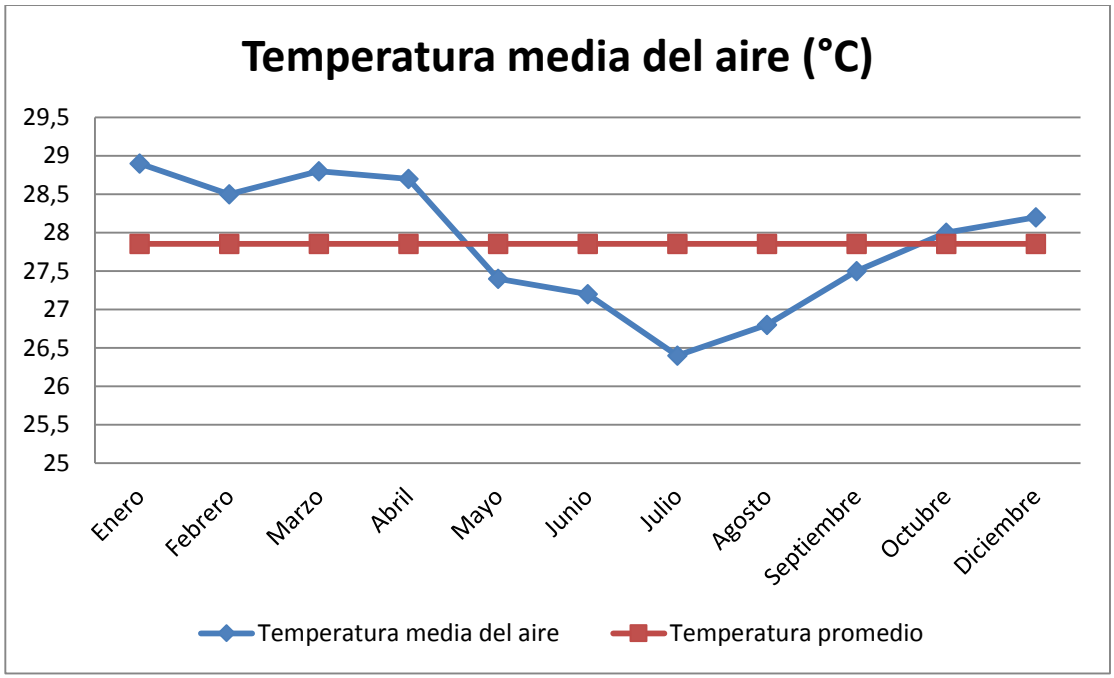
3.2 Propiedades del aire ambiente

Las siguientes propiedades han sido tomadas de las estadísticas meteorológicas que proporciona el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), específicamente del anuario meteorológico 2010 (25). La estación desde la que se han medido estas variables es la estación MA2V conocida también como Radio Sonda – Universidad Estatal de Guayaquil.

- Latitud: 2° 12’ 0’’ S

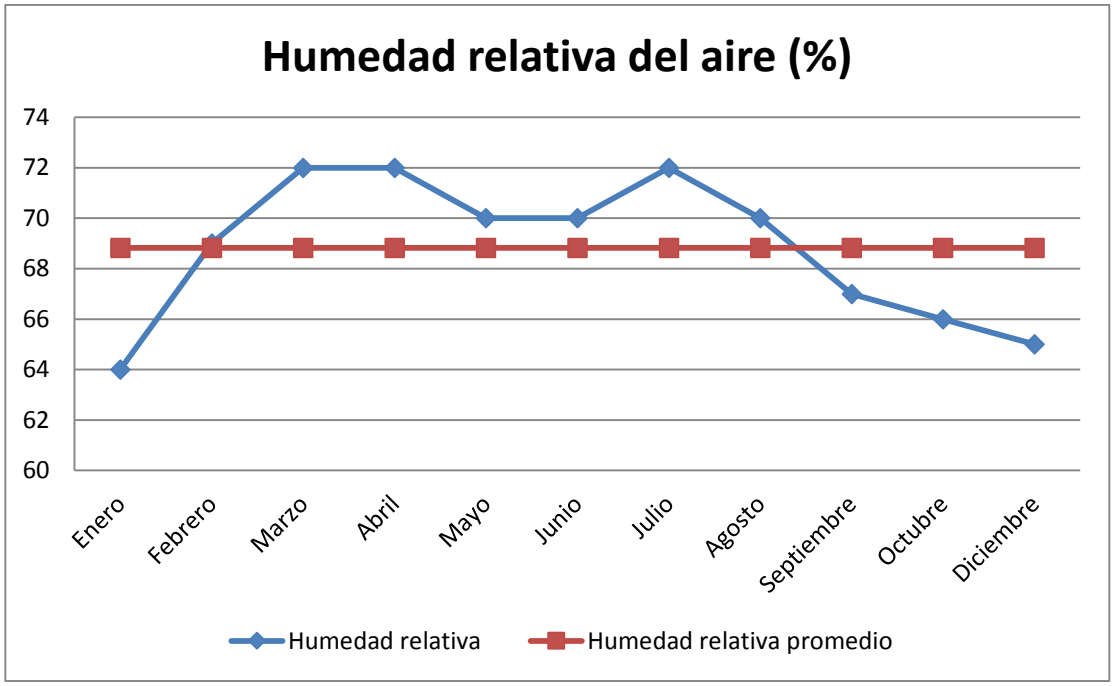
- Longitud: 79° 53’ 0’’ W
- Altitud: 6 msnm
- Temperatura media del aire: 27,9 °C
- Humedad relativa del aire: 68,8 %

Gráfico 1. Temperatura media del aire durante el año 2010



Fuente: (25), Elaboración propia

Gráfico 2. Humedad relativa del aire durante el año 2010



Fuente: (25), Elaboración propia

Con estos valores se puede determinar las propiedades del aire usando una carta psicrométrica. Las propiedades para el aire en la zona de Guayaquil son las siguientes:

- Temperatura de bulbo seco: 28 °C
- Temperatura de bulbo húmedo: 23 °C
- Temperatura de rocío: 21 °C
- Humedad absoluta: 0,0158 kg vapor/kg aire seco
- Humedad relativa: 68 %
- Entalpía específica: 20,5 kcal/kg de aire húmedo
- Volumen específico: 0,874 m^3/kg de aire seco

3.3 Diseño del intercambiador de calor

Para efectuar el secado del sólido es necesario calentar la corriente de aire. Al calentar el aire, la humedad relativa de esta corriente disminuye y a su vez aumenta la capacidad de absorber agua del sólido. Por otra parte la fuerza motriz que promueve el secado del sólido depende de las diferencias de la presión de vapor que existe en la corriente de aire y la presión de vapor que ejerce el agua presente en el sólido. El proceso de secado llegará a un punto de equilibrio cuando la presión de vapor de agua en el aire sea la misma presión de vapor del agua en el sólido. En este punto de equilibrio la humedad del sólido alcanza un valor estable, en el cual no aumenta ni disminuye dicho valor.

El método más utilizado para calentar una corriente de aire es el uso de intercambiadores de calor, utilizando como medio de calefacción el vapor generado por una caldera. Para realizar el diseño se debe determinar dos aspectos: el arreglo de los flujos y el tamaño de dicho intercambiador.

Se eligió un intercambiador de calor de flujo cruzado, ya que se cuenta con gases a presiones moderadas. Los intercambiadores con flujo cruzado son recomendados en los casos en que los coeficientes de película de los fluidos

que pasan por el intercambiador son bajos; lo cual es el caso para aire y otros gases (26).

Se eligió un intercambiador de tubos lisos configurado en flujo cruzado: dentro de los tubos circulará el vapor proveniente de la caldera, mientras que en el exterior circulará la corriente de aire que se desea calentar. Para diseñar el equipo, es necesario conocer las temperaturas inicial y final de la corriente de aire y la presión del vapor que provee la caldera.

3.3.1 Características de los flujos de entrada y salida

Las propiedades del aire pueden ser determinadas a partir de la carta psicrométrica. Las propiedades del flujo de entrada de aire ya han sido descritas anteriormente. En cuanto a las propiedades del aire calentado por el vapor deben ser establecidas en función de dos propiedades independientes.

Dado que el intercambiador de calor opera de forma adiabática, la temperatura de la corriente de aire aumenta sin que haya una variación en el valor de la humedad absoluta. Por tanto se determinó las propiedades del aire a la salida del intercambiador de calor siguiendo en la carta psicrométrica por una línea de humedad absoluta constante hasta terminar en una temperatura de bulbo seco de 45 °C.

Las condiciones del aire a la salida del intercambiador serán las siguientes:

- Temperatura de bulbo seco: 45 °C
- Temperatura de bulbo húmedo: 28 °C
- Temperatura de rocío: 21 °C
- Humedad absoluta: 0,0158 kg vapor/kg aire seco
- Humedad relativa: 27 %
- Entalpía específica: 25,5 kcal/kg de aire húmedo
- Volumen específico: 0,925 m^3/kg de aire seco

El calentamiento del aire se realizará utilizando vapor proveniente de la caldera. La caldera opera normalmente a 30 psia; tomando en cuenta que el vapor que proporciona la caldera es saturado, se pueden conocer las propiedades a partir de una tabla de vapor.

- Presión: 2,04 atm
- Temperatura de saturación (T_{sat}): 121,3 °C
- Entalpía de vaporización (ΔH_V): 2,193 kJ/kg
- Volumen específico (V_g): 0,856 m^3/kg

3.3.2 Área de transferencia de calor

El área de transferencia de calor debe calcularse, para así establecer la cantidad de tubos y la geometría del intercambiador. A partir del análisis térmico puede determinarse esta variable:

$$q = U\ A\ F\ MLDT \qquad [5]$$

3.3.2.1 Media logarítmica de la diferencia de temperaturas en el intercambiador y factor de corrección

La media logarítmica de las diferencias (MLDT) debe calcularse en función del arreglo en el que se disponen los fluidos caliente y frío. Para el caso de un arreglo de flujo cruzado, se calcula la MLDT como si fuera flujo a contracorriente y se ajusta este valor con el factor de corrección. Como el fluido caliente es vapor que se condensa, el factor de corrección toma el valor de 1, sin que afecte el tipo de arreglo en que se encuentra. Por tanto la MLDT sería:

$$MLDT = \frac{(T - t_2) - (T - t_1)}{\ln\left(\frac{T - t_2}{T - t_1}\right)} \qquad [6]$$

El vapor cede calor latente, es decir, que se efectúa un cambio de fase sin que cambie la temperatura. Por tanto los valores de T_1 y T_2 son iguales y equivalen a la temperatura de saturación.

Tabla V. Resultados de [6]

Temperatura (vapor saturado a 2 atm)	121,3 °C
Temperatura de entrada (aire húmedo)	28 °C
Temperatura de salida (aire húmedo)	45 °C
MLDT	84,52 °C

3.3.2.2 Calor transferido

Un balance de calor para el flujo de aire permite conocer la cantidad de calor transferida en el proceso de calentamiento.

$$q = \dot{m}_A(h_2 - h_1) \quad [7]$$

Las entalpías específicas para el aire han sido tomadas de los valores obtenidos por las cartas psicrométricas. El flujo de aire se ha quintuplicado a partir del flujo que maneja el secador actual.

Tabla VI. Resultados de [7]

Flujo másico (G_t)	4,45 kg/s
Entalpía del aire a la entrada (h_1)	85,83 kJ/kg aire húmedo

Entalpía del aire a la salida (h_2)	106,76 kJ/kg aire húmedo
Calor transferido (q)	93,074 kJ/s

3.3.2.3 Coeficiente de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_O} + R_O + \frac{r_O}{k}\ln\left(\frac{r_O}{r_i}\right) + R_i\left(\frac{r_O}{r_i}\right) + \frac{1}{h_i}\left(\frac{r_O}{r_i}\right)} \quad [8]$$

El factor de impureza se añade a la ecuación para tomar en cuenta el ensuciamiento y las incrustaciones que aparecerán en el equipo con el tiempo de uso. En la literatura se puede encontrar valores promedios para los distintos tipos de flujos; para los cálculos se ha tomado los siguientes valores (26):

$$R_O = 0{,}0004\ \frac{m^2 °\mathrm{C}\ s}{J}\ (AIRE)$$

$$R_i = 0{,}0001\ \frac{m^2 °\mathrm{C}\ s}{J}\ (VAPOR)$$

3.3.2.4 Coeficiente de película del vapor

El vapor es uno de los medios de calentamiento más utilizados, debido a que presenta valores de coeficiente de película mucho más altos que otros medios

de calentamiento. Al recorrer el intercambiador y entrar en contacto con una superficie, cuya temperatura superficial es inferior a la temperatura de saturación, el vapor se condensa al ceder su calor latente (26).

El mecanismo de condensación se puede efectuar de dos formas: condensación en forma de película o condensación en forma de gotas. En la primera forma el vapor forma una película constante de condensado, mientras que en la segunda forma el condensado se dispone en forma de gotas pequeñas sobre la superficie. Aunque la condensación en forma de gotas presenta coeficientes de película de 5 a 10 veces mayores que en la condensación en forma de película, la segunda forma es la más predecible y frecuente. En consecuencia para los problemas de diseño se suele tomar en cuenta este tipo de condensación (2).

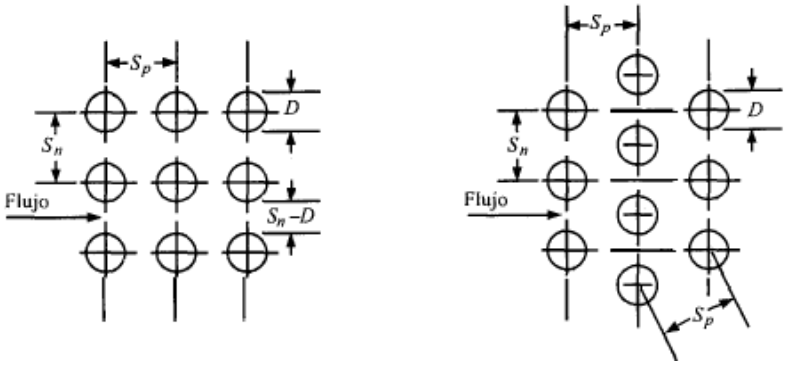
Aunque existen numerosas correlaciones para el coeficiente de película del vapor, las cuales son casi todas formas empíricas, se suele tomar un valor conservador en vez de calcularlo (26). Para los siguientes cálculos se tomará este valor consultado en la bibliografía del tema, el cual es:

$$h_i = 1500\ \frac{BTU}{h \times °\mathrm{F} \times ft^2} = 2{,}366\ \frac{J}{s \times K \times m^2}$$

3.3.2.5 Coeficiente de película del aire

Debido a que la disposición de los flujos es del tipo cruzado, se debe tener en cuenta todo el haz de tubos al analizar el coeficiente de película en la parte externa a los tubos. Por tanto es necesario conocer la disposición además de las características generales de los tubos. Los tubos suelen disponerse de dos formas en relación al flujo: escalonada o alineada. La siguiente figura muestra ambas disposiciones y la nomenclatura utilizada: Sn, distancia entre centros de los tubos en la dirección normal del flujo; Sp, distancia entre centros de los tubos en dirección paralela al flujo; D, diámetro externo del tubo.

Figura 16. Configuración de los tubos en la batería: alineada (izquierda) y escalonada (derecha)



Fuente: (2), pág. 282

Las correlaciones entre el coeficiente de película y la disposición y números de tubos se basan en datos experimentales. Para más de 10 hileras de tubos se puede calcular el coeficiente de película utilizando la siguiente ecuación propuesta por Zukauskas (1):

$$Nu = C \times {Re_{max}}^{m} \times Pr^{n} \times \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25} \qquad [9]$$

Las constantes C, m y n dependen del valor numérico de Reynolds. Estos valores están en función de que el banco de tubos tenga más de 16 hileras en la dirección del flujo; caso contrario deberá añadirse un factor de corrección. Los valores de las constantes, así como los factores de corrección en función del número de hileras pueden encontrarse en la literatura (26).

Debe tenerse en cuenta que todas las propiedades deben ser evaluadas a la temperatura promedio de la entrada y salida de aire, a excepción de Pr_s, el cual se evalúa a la temperatura de la superficie del tubo. Dado que el tubo es de poco espesor y que la pared no ofrece una resistencia considerable, es común asumir que la temperatura de la pared será igual a la temperatura del fluido en el interior, en este caso de la temperatura de saturación del vapor.
Los números de Reynolds y Prandtl se pueden calcular según las siguientes ecuaciones:

$$Re_{max} = \frac{V_{max} \times D_o}{\nu} \qquad [10]$$

$$Pr = \frac{c_P \times \mu}{k} \qquad [11]$$

La velocidad máxima depende del tipo de configuración del haz de tubos. En el caso de tubos alineados, la velocidad máxima puede establecerse como:

$$V_{max} = \frac{S_t}{S_t - D_o} \times V_e \qquad [12]$$

La tabla VII muestra las características de la geometría y del material de los tubos.

La tabla VIII muestra las propiedades del aire tanto a la temperatura media de entrada y salida como a la temperatura de la pared de los tubos (T_s). Las propiedades se encontraron con ayuda de nomogramas y tablas, las cuales se encuentran en el Anexo C y la bibliografía (26).

Tabla VII. Características de los tubos de intercambiador

Distancia entre tubos (St)	0,05 m
Diámetro externo (Do)	0,01587 m
Espesor del tubo (ε)	0,00102 m
Conductividad térmica del cobre (k)	377,29 $^{J}/_{s\ m\ ℃}$

Tabla VIII. Propiedades del aire

Propiedad	**Aire húmedo T = 36,5 °C**	**Vapor de agua sistema T_s = 121,3 °C**
Viscosidad dinámica [kg/(m s)]	0,000018	0,000022
Densidad [kg/m^3]	1,1117	0,7089
Viscosidad cinemática [m^2/s]	1,6191x10^{-5}	3,1034x10^{-5}

Calor específico [J/(kg °C)]	1,0052	1,0187

Una vez conocidas todas estas propiedades se calculó los diferentes números adimensionales con las ecuaciones 10, 11 y 12.

$$Pr = \frac{1{,}0052 \times 0{,}000018}{0{,}37729} = 4{,}8 \times 10^{-5}$$

$$Pr_s = \frac{1{,}0187 \times 0{,}000022}{0{,}37729} = 5{,}9 \times 10^{-5}$$

$$V_{max} = \frac{0{,}05}{0{,}05 - 0{,}01587} \times 5 = 7{,}3 \ \frac{m}{s}$$

$$Re_{max} = \frac{7{,}3249 \times 0{,}01587}{1{,}6191 \times 10^{-5}} = 7180$$

$$Nu = 0{,}27 \times 7179{,}71^{0{,}63} \times (4{,}796 \times 10^{-5})^{0{,}36} \times \left(\frac{4{,}796 \times 10^{-5}}{5{,}9401 \times 10^{-5}}\right)^{0{,}25} = 1{,}9$$

Con el número de Nusselt determinado, es posible calcular el coeficiente de película del lado externo del tubo.

$$Nu = \frac{h_O D_o}{k} \quad [13]$$

$$h_O = \frac{1{,}92 \times 0{,}01587}{0{,}37729} = 45{,}5699 \ \frac{kJ}{s \times m^2 \times K}$$

Con todos estos datos se puede obtener el coeficiente global de transferencia (ecuación 8) y utilizando la ecuación 5 se calcula el área de transferencia de calor. La siguiente tabla muestra estos resultados.

Tabla IX. Resultados del coeficiente global de transferencia de calor y el área de transferencia

Coeficiente global de transferencia de calor	$\boldsymbol{1853,26\ \frac{J}{s \times m^2 \times K}}$
Área	0,6 m^2

3.3.2.6 Geometría del intercambiador

Con el valor del área establecido se puede proceder a determinar las dimensiones del intercambiador. Es decir, se debe establecer la cantidad de tubos necesarios en el intercambiador, así como el espacio que requeriría dicho equipo. El número de tubos se puede determinar de la siguiente expresión:

$$N_t = \frac{A}{\pi D_o L_t} \qquad [14]$$

La longitud de los tubos se ha establecido en 0,50 metros, de manera que el equipo tenga un ancho moderado. Debe recordarse que el ancho y alto del intercambiador establecen el área transversal del secador. Por tanto el número de tubos necesarios es de 24 tubos. Añadiendo un sobredimensionamiento del 15%, la cantidad de tubos necesaria sería de 27 tubos, los cuales pueden disponerse en 3 hileras de 9 tubos cada una.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la correlación del número de Nusselt para flujo cruzado es válida para bancos de tubos de 16 hileras en adelante. Por lo tanto debe ajustarse el valor del coeficiente de película externo y recalcular a partir del coeficiente global de transferencia de calor. El factor de ajuste para tres hileras de tubos alineados es de 0,86. La tabla X muestra los valores de este ajuste.

Tabla X. Valores ajustados para 3 hileras en el intercambiador de calor

Coeficiente de película exterior	$\boldsymbol{39,2\,\frac{kJ}{s \times m^2 \times K}}$
Coeficiente global de transferencia de calor	$1841\,\frac{J}{s \times m^2 \times ℃}$
Área	0,6 m^2
Número de tubos (incluye sobredimensionamiento)	27 tubos

Las medidas del intercambiador de calor serían:

- Ancho 0,50 m
- Alto 0,54 m
- Profundidad 0,15 m

Para obtener estos valores se ha tenido en cuenta que el espaciado entre los tubos es de 0,05 metros.

3.3.3 Caída de presión del vapor

Otra variable que debe tenerse en cuenta, además de la transferencia de calor, es la caída de presión. Generalmente la caída de presión no debe exceder a 2 psi (26). Para calcular la caída de presión se aplica la siguiente ecuación (en unidades inglesas):

$$\Delta P = \frac{0{,}5 f {G_t}^2 L_t N_t}{5{,}22 \times 10^{10} D_I s_e} \quad [15]$$

El gasto de vapor se puede calcular a partir del balance de calor hecho previamente para el aire. Para obtener este valor por unidad de área, basta con dividir para el área transversal de los tubos, el cual puede obtenerse fácilmente del diámetro de dichos tubos.

$$G_t = \frac{q}{h_{fg} A_t} = \frac{4q}{h_{fg} \pi {D_I}^2} \quad [16]$$

La gravedad específica se define como la relación entre la densidad de la sustancia (en este caso vapor) y la densidad de referencia. Esta densidad de referencia es agua a 4 °C, cuyo valor en unidades inglesas es de 62,48 lb/ft^3. Las tablas de vapor muestran el volumen específico del vapor, el cual es el

inverso de la densidad, de manera que se puede calcular la gravedad específica como:

$$s = V_g \times \rho_{Ref} \qquad [17]$$

$$s = 13{,}75 \times 62{,}48 = 858{,}85$$

El factor de fricción es un valor que puede conocerse a través de una gráfica (26). Esta gráfica está en función del número de Reynolds:

$$Re_t = \frac{D_i G_t}{\mu} \qquad [18]$$

La viscosidad dinámica del vapor se obtuvo utilizando el nomograma del Anexo C. Luego se calculó esta viscosidad en las unidades correspondientes para la ecuación 18.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de todas estas variables. Como se puede observar, la caída de presión se encuentra muy por debajo del límite permitido. Esto se debe a que se trabaja con vapor a una presión moderadamente baja. En consecuencia el diseño del intercambiador es satisfactorio también en cuanto a la caída de presión y se puede proceder a la construcción.

Tabla XI. Propiedades usadas para calcular la caída de presión en [15]

Calor transferido	$\mathbf{317575,7\ \frac{BTU}{h}}$
Entalpía de vaporización	$945{,}20\ \frac{BTU}{lb}$
Diámetro interno	$0{,}1488\ ft$
Flujo másico por unidad de área	$207787{,}41\ \frac{lb}{ft^2 \times h}$
Gravedad específica	$858{,}85$
Viscosidad dinámica	$1{,}075 \times 10^{-5}\ \frac{lb}{ft \times s}$
Número de Reynolds (tubos)	243576
Factor de fricción	$0{,}00012\ \frac{ft^2}{pulg^2}$
Caída de presión	$1{,}70 \times 10^{-5}\ psi$

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS EN EL EQUIPO

4.1 Secuencia de construcción del equipo

Una vez que ha sido definido el diseño del secador, se puede proceder a la construcción del mismo. El primer paso es comprar los materiales, según lo que se definió en los cálculos. En el caso del intercambiador de calor, éste debe ser de cobre de ½ pulgada. Para la campana que va a sostener el ventilador y el intercambiador de calor se seleccionó plancha de galvanizado, mientras que para el cuerpo del secador se eligió plywood, puesto que su conductividad térmica es baja y es un material resistente.

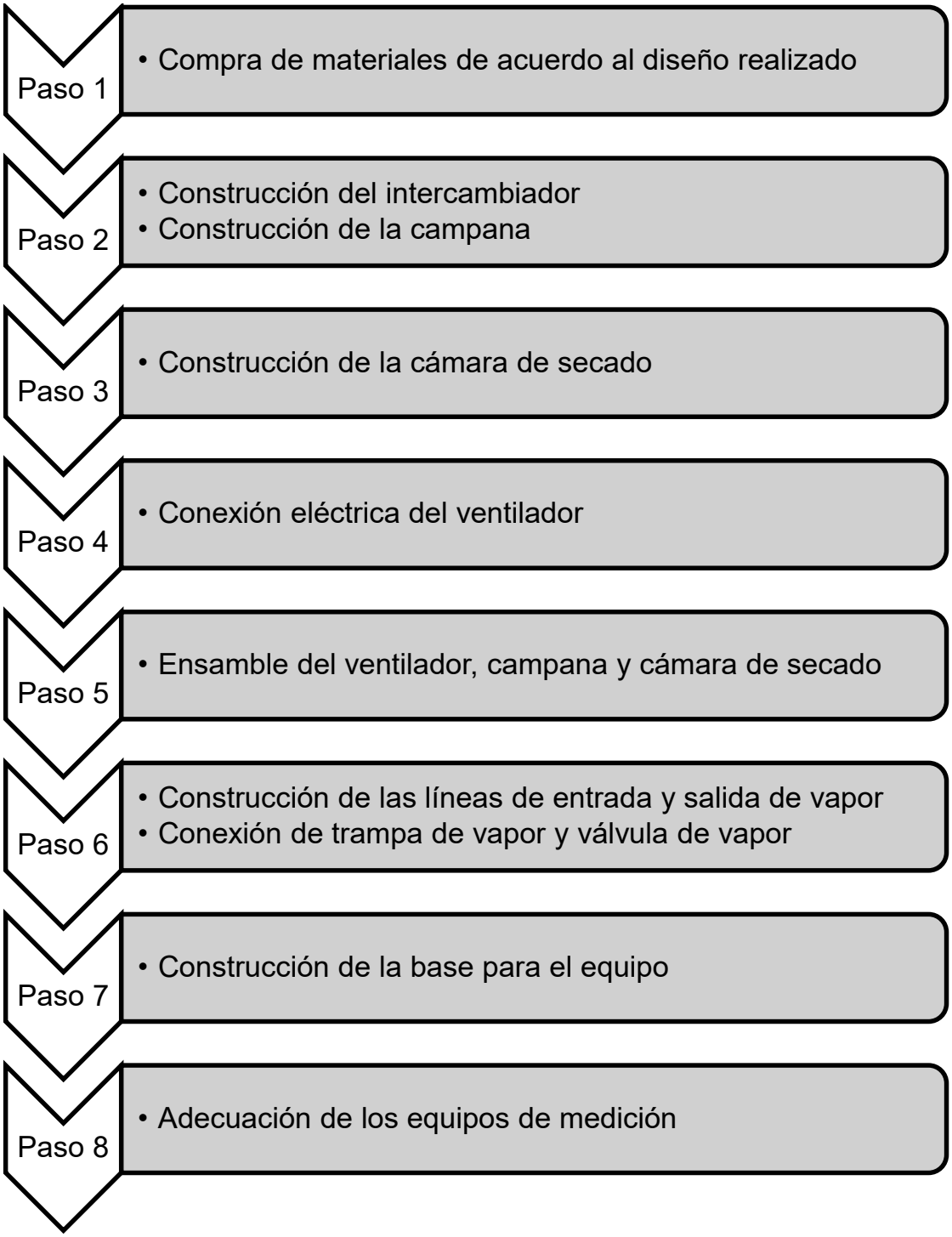
Se tuvo en cuenta que el interior del equipo se encontrará más caliente debido al aire que ha atravesado el intercambiador de calor. Sin embargo esta elevación de la temperatura no representa un problema puesto que la temperatura de ignición de la madera se encuentra entre 313 – 393 °C (27), mientras que en el interior la temperatura del aire caliente se mantuvo alrededor de 45 °C.

Una vez construido el cuerpo del equipo y el intercambiador de calor, el cual fue previamente probado de que no tuviera fugas, se realizó la conexión eléctrica del ventilador. Luego se procedió a adaptar el ventilador a la boca de la campana.

Después se construyó las líneas de vapor hacia el intercambiador de calor. Se tomó la conexión a partir de una línea del equipo más próximo al secador, el cual es un evaporador de simple efecto. Esta línea de vapor fue provista con su respectiva válvula y trampa de vapor. Estos aparatos ayudan a controlar la entrada de vapor y evitar una presión excesiva que pueda dañar el equipo e incluso causar daños a las personas que manipulen el secador.

Por último se construyó un soporte para el secador y se colocaron los equipos de medición. El equipo está provisto de una pequeña ventana, de manera que se pueda observar el cambio en la muestra a lo largo del tiempo de secado.

Figura 17. Diagrama de flujo de la construcción del equipo



4.2 Pruebas experimentales

Con el equipo en pleno funcionamiento se procedió a realizar pruebas de secado para obtener las curvas de secado de dos materiales distintos: manzana y toronjil. Se escogieron varias muestras para secar, de manera que se pudiese observar una tendencia en los resultados y para tener la evidenciar sin dificultad datos aberrantes.

En cada caso se colocó la muestra de forma uniforme sobre la malla del secador. Se trabajó con una presión de operación de aproximadamente 2 atm y se llevó a cabo la prueba hasta que la variación en la masa del sólido fuera de ±0,20 g.

4.2.1 Curvas de secado

Se graficaron las mediciones de humedad libre en función del tiempo de secado. Para calcular la humedad libre se tomó el valor de peso seco obtenido al llevar las muestras a la mufla, como se indicó en el Capítulo 2. Debe tenerse en cuenta que al momento de graficar los datos, se han discriminado los datos aberrantes, los cuales pueden haber surgido de un error en el equipo de medición o error humano al leer los datos que provee el instrumento de

medición. Sobre todo esto se puede apreciar en las curvas de velocidad de secado en función de la humedad libre.

Primero se graficó los valores de humedad libre en función del tiempo de secado, tanto para las muestras de manzana (figura 18) y toronjil (figura 19). Las curvas son similares a los que se observan en la bibliografía (refiérase al Capítulo 1). Las muestras de manzana arrojaron más datos, puesto que se comenzó con una mayor cantidad de material a secar. Debido a que el toronjil es una hierba, el peso era muy poco, a pesar de la cantidad de la cual se disponía.

Figura 18. Curva de humedad libre en función del tiempo de secado para las muestras de manzana

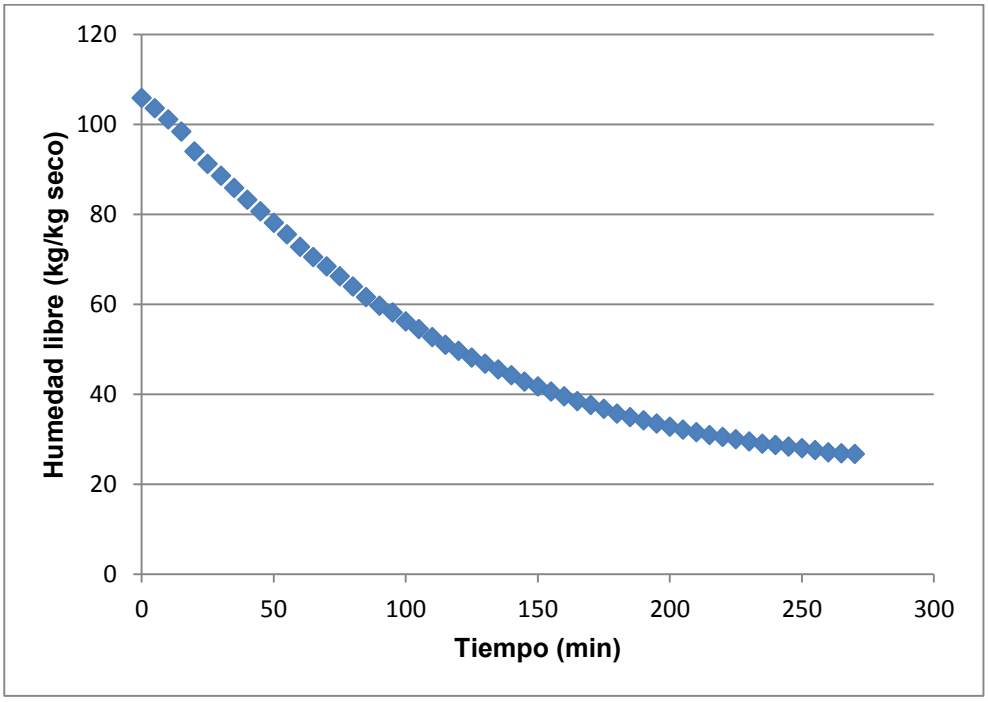
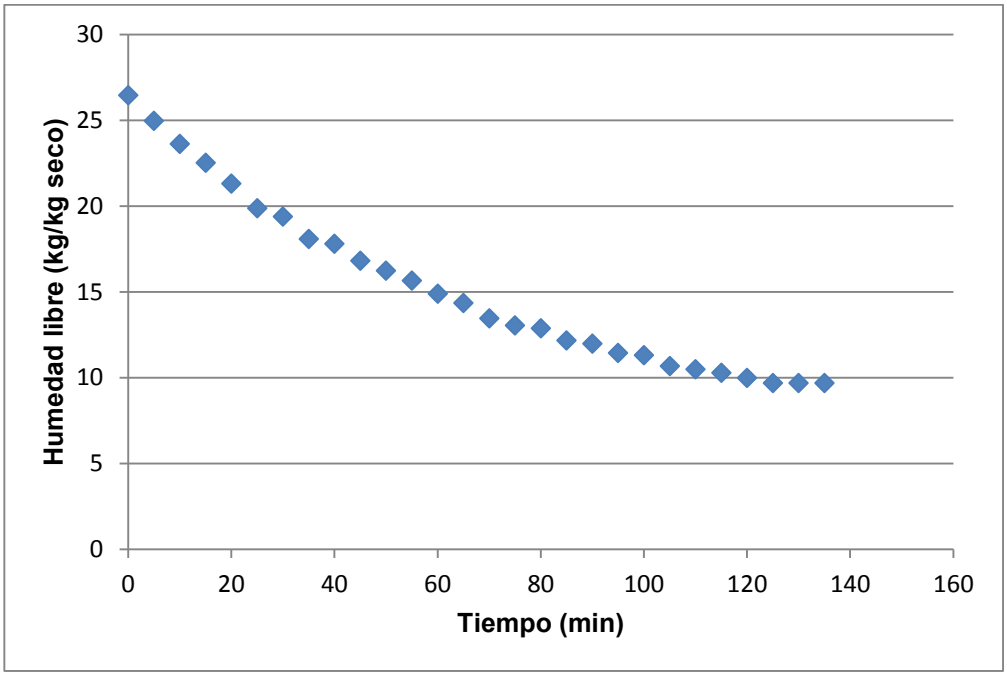


Figura 19. Curva de humedad libre en función del tiempo de secado para las muestras de toronjil



Para conocer los parámetros de secado, se procedió a calcular la humedad media en base seca y la velocidad media de secado de la misma forma que se realizó en el Capítulo 2. Las series de datos registrados durante las pruebas se encuentran en el Anexo D. A continuación se muestran las gráficas para ambas especies. Para facilitar la identificación de los períodos de velocidad constante y decreciente, se ha procedido a indicar dichos períodos de distinto color.

Figura 20. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para las muestras de manzana

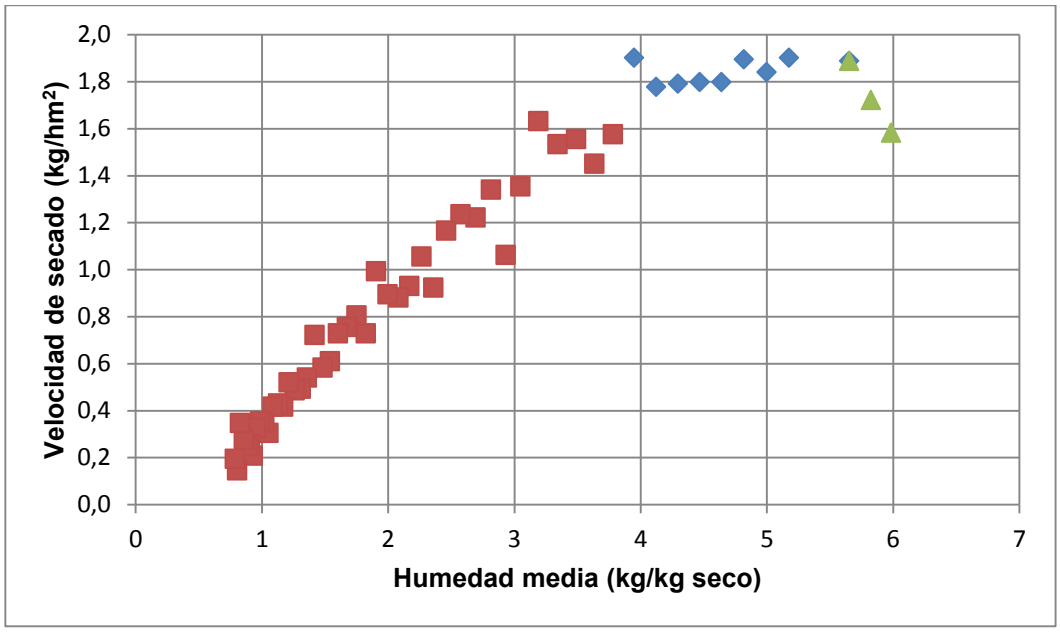
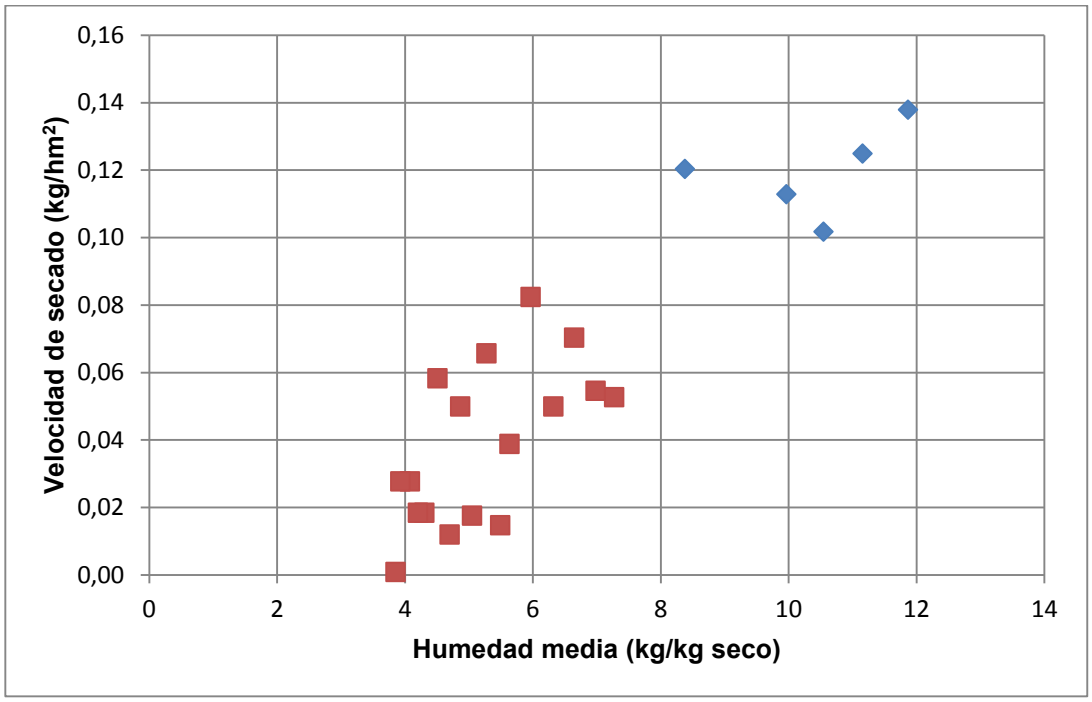


Figura 21. Curva de velocidad media de secado en función de la humedad media para las muestras de toronjil



Como se puede observar en el caso del toronjil los puntos experimentales muestran gran dispersión, lo cual posiblemente se deba a la pequeña masa del material, cercano al valor de la tolerancia (0,1 g) de la balanza empleada. De esta manera lo que la balanza estaría detectando probablemente sea el movimiento del soporte al paso de la corriente de aire.

En el caso de la manzana se puede apreciar de forma más definida los períodos de velocidad constante (azul) y decreciente (rojo). Esto se debe a que el cambio de masa a lo largo de la prueba se dio de forma constante y gradual.

Ambas muestras presentaron un período de velocidad constante y un período de velocidad decreciente. En la muestra de manzana también se presentó un período de velocidad creciente, el cual es muy corto (señalado con verde en el gráfico). En este período el material adecúa su temperatura a la corriente de aire y, debido a que es breve, no se lo considera para los siguientes análisis. Las muestras de toronjil no mostraron este período, lo cual se debe a que el espesor de la muestra es mucho menor en comparación con las muestras de manzana, por lo tanto las hojas de toronjil rápidamente llegan a la temperatura de equilibrio con la corriente de aire.

4.2.2 Resultados obtenidos

Con el empleo de las curvas de velocidad se pudo obtener los valores de humedad crítica, humedad de equilibrio y velocidad en el período constante. La siguiente tabla resumen estos valores para cada uno de los materiales.

Tabla XII. Parámetros de velocidad de secado para manzana y toronjil

	Manzana	**Toronjil**
Velocidad en el período constante (kg/h·m^2)	1,85	0,12
Humedad crítica (kg/kg seco)	3,9	8,2
Humedad de equilibrio (kg/kg seco)	0,6	3,9

Los parámetros de secado para ambas muestras son consistentes con los que se determinaron en el secador de resistencias eléctricas (Sección 2.4). Debe tenerse en cuenta que la velocidad de secado depende del área de transferencia; por lo que los valores de la tabla difieren de los que se determinaron en la Sección 2.4. Sin embargo es consistente puesto que al hacer la corrección con el área del otro secador, los valores coinciden, de manera que las curvas de secado presentan valores confiables.

4.3 Costo de construcción

Los costos de la construcción del secador se encuentran desglosados en la tabla XIII, dando un costo total de $795. Este costo es considerablemente menor a los precios que se encuentran en el mercado.

Los precios de secadores para este tipo de pruebas varían entre $2.000 y $26.000 (28). De manera que el secador construido representa un ahorro del 60 – 97%, lo cual es una clara ventaja frente a los secadores que se pueden encontrar en el mercado.

Tabla XIII. Detalle de gastos de construcción del equipo.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	% Descuento	TOTAL
Sierra Sandflex 12*18 DPP diente grueso	5	1,85	0,00	9,25
Neplo Flex	1	1,80	0,00	1,80
Tub s/c ced 40-1/2" 5.80 m	3	13,13	25,00	29,54
Corte Tubo 1/2" (P)	31	0,58	0,00	17,98
Codo 150-1/2"*90°	44	0,32	25,00	10,56
Rosca 1/4" a 1/2" (P)	77	0,73	0,00	56,21
Tubo Roscado 1/2 (D) c 40	1	8,40	0,00	8,40
Neplo cédula 40 1/2"*1 1/2"	1	0,27	25,00	0,20
Neplo cédula 40 1/2" perdido	3	0,22	25,00	0,50
Neplo cédula 40 1/2" *4"	3	0,44	25,00	0,99
Neplo cédula 40 1/2"*3"	3	0,35	25,00	0,79
Bush. 150-1/2"*1/4"	2	0,28	25,00	0,42
Extractor de aire Aspa Metal. IEF 10	1	45,47	0,00	45,47
Perno 1/4*3/4"	36	0,10	0,00	3,60
Anillo de presión 1/4"	36	0,05	0,00	1,80
Silicón blanco Sanisil	1	4,40	0,00	4,40
Plancha galvanizada 1/16 (1.4)	1	36,03	6,00	33,87
Unión 150-1/2"	5	0,32	25,00	1,20
Regulador de voltaje	1	10,00	0,00	10,00

Regulador de voltaje	1	20,00	0,00	20,00
Dimmer General Electric	1	8,92	0,00	8,92
Pernos 1/4*3/4" Hexa. Hierro Galvanizado	60	0,05	0,00	3,00
Anillos 1/4" (6mm) Presión Acero Galvanizado	60	0,02	0,00	1,20
Anillos 1/4" (6mm) Planos Acero Galvanizado	36	0,02	0,00	0,72
Pasta formador empaque Permatex 1A (1.5 oz)	1	1,67	0,00	1,67
Nudo 150-1/2"	4	1,72	25,00	5,16
Teflón Industrial	8	0,60	0,00	4,80
Silicón alta temperatura 3 oz	1	3,20	0,00	3,20
Blancola funda 1Lb	2	1,25	0,00	2,50
Corredera Ducasse Plegaduc Pro 2 Ptas	1	6,67	0,00	6,67
Riel Ducasse canal cd-50 aluminio 3 mt.	1	14,37	0,00	14,37
Bisagra PLC. Acodada 35 mm par	1	0,92	0,00	0,92
Tiradera tubular 360 mm	1	2,73	0,00	2,73
Tope vincha café 32*23*31	1	0,16	0,00	0,16
Plancha Plywood Triplex Marino	3	38,38	0,00	115,14

Galonera Diesel (5 gal)	1	17,86	0,00	17,86
Adaptador 1/2 NPT M*5/8" cobre	2	1,03	0,00	2,06
Cañería cobre 5/8 ft	1	2,00	0,00	2,00
Soldadura de plata 5% c/u	21	3,15	0,00	66,15
Codo cobre 7/8	44	1,20	0,00	52,80
Reducción 7/8 a 5/8"	2	1,35	0,00	2,70
Pote MAPP amarillo 14 oz.	2	9,50	0,00	19,00
Cañería cobre 7/8 pie	26	3,25	0,00	82,88
Tee 300-1/2"	3	1,54	25,00	3,47
Tap mach 150-1/2"	1	0,21	25,00	0,16
Válvula de bola 1/2" fv	2	5,00	0,00	10,00
Tachuelas	1	1,08	0,00	1,08
Tela aluminio	1	3,56	0,00	3,56
Cáncamos	2	0,79	0,00	1,58
Palillo de balsa	1	2,39	0,00	2,39
Pila AAA Sony Alkalina	3	1,00	0,00	3,00
Energyzer Alkalina	1	5,00	0,00	5,00
Mascara P/soldar	1	3,07	0,00	3,07
Suelda Aga c-13 6011	2	4,66	0,00	9,32
Pintura Aluminio Brillante 1 Litro	1	3,80	0,00	3,80
Diluyente 1 Litro	1	1,80	0,00	1,80
Angulo 40x40x3 1-1/2x1/8	2	11,00	0,00	22,00
Plafon E27 150 W blanco	1	1,20	0,00	1,20
Preservante Madera	1	9,16	3,00	8,89

Cable concéntrico 3x16	10	0,89	3,00	8,63
Formica genérica	2	17,00	5,00	32,30
			TOTAL	794,82

CAPÍTULO 5

MANUALES

5.1 Manual de Operación

5.1.1 Introducción

El secado de sólidos es una operación unitaria que utiliza distintos medios físicos para lograr un objetivo común, el cual es evaporar el líquido contenido en un sólido. Esto se obtiene al extraer la humedad del sólido. En el equipo diseñado para este fin, el sólido se encuentra expuesto a una corriente de aire caliente: a medida que el material pierde humedad, perderá peso gradualmente, lo que será monitoreado.

El objeto de este manual es guiar al usuario para llevar a cabo el proceso de secado de una muestra de manera discontinua y en lo posible uniforme. El proceso que se efectúa es sencillo y puede ser utilizado con todo tipo de muestras con fino espesor, en las que se facilita la extracción de humedad. Este secador permitirá obtener las curvas de secado de materiales húmedos, las cuales pueden ser utilizadas para el diseño de secadores industriales. Por otro lado, podrá ser usado en la Docencia para cubrir conceptos sobre los fundamentos del secado en la materia de Operaciones Unitarias.

5.1.2 Alcance

Este procedimiento abarca el área de operaciones unitarias, en cuanto a transferencia de masa y energía se refiere, y está destinado sobre todo para el uso académico, las pruebas que pueden realizarse para otros fines dependen exclusivamente de los responsables y las autoridades del laboratorio de Operaciones Unitarias del DCQA, quienes no se responsabilizan con sus resultados y/o consecuencias.

5.1.3 Responsables

El equipo, tanto como su manual, contenido y demás componentes, está a cargo de las autoridades del Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales de La Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la ESPOL.

5.1.4 Normas de Operación

El equipo operará bajo las siguientes condiciones:

- La presión del caldero debe ser de alrededor de 30 psi.
- La temperatura de interior de bulbo seco debe ser mayor a 45°C.
- El extractor opera con corriente directa de 110 V – 120 V.

- El peso de la muestra debe ser menor a 200 g.

5.1.5 Procedimiento

5.1.5.1 Arranque del Equipo

El elemento crítico del sistema es el vapor que pasara por el intercambiador de calor en el interior del secador, se necesita un adecuado proceder con la puesta en marcha del caldero, por lo cual se sugiere hacerlo de la siguiente manera:

a) Verificar que el ablandador esté funcionando correctamente (que contenga salmuera (T-102) y que se hayan realizado también reflujos y pasos posteriores), de no ser así, realizar los pasos de ablandamiento para llenar el tanque de alimentación de agua (T-103).
b) Purgar el agua condensada que contenga el caldero (SG-101), verificar que el nivel de esta sea el correcto por medio del medidor de nivel.
c) Verificar que el tanque de alimentación de combustible (T-101) contenga un nivel adecuado, de no ser así, llenarlo con 5 gal de diésel para poder realizar la práctica sin interrupciones.
d) Verificar que la válvula de salida de vapor esté cerrada (V-102).
e) Abrir la válvula de alimentación de diésel (V-101) y de alimentación de agua (V-107).

f) Encender en el tablero de control la alimentación de diésel, el quemador y la bomba de agua respectivamente.
g) Llegada a la presión de 30 psi, abrir lentamente la alimentación de vapor (V-102).
h) Controlar que el flujo de vapor llegue hasta el secador purgando el agua residual a medida que vaya avanzando el vapor hacia el secador.
i) Cuando haya llegado vapor a la entrada del secador, abrir la válvula de purga (V-105) antes de la trampa de vapor y paso seguido abrir lentamente la válvula de vapor (V-109), permitiendo que escape el condensado y aire contenido a través del intercambiador.
j) Cerrar la válvula de purga (V-105) y encender el extractor (K-101), dejar que el interior alcance la temperatura de trabajo

5.1.5.2 Preparación de la Muestra y el Equipo

a) Utilizar guantes y materiales limpios para evitar que la muestra se contamine y oxide.
b) Armar el sistema de manera que el disco de la balanza esté en el centro del mismo, las cuerdas deben colocarse de tal forma que no tengan contacto alguno con el secador.

c) Verificar la capacidad de la balanza, el sistema tiene un peso de alrededor de 150 gramos, por lo cual se debe procurar que el peso de la muestra junto con el sistema no sobrepasen esta capacidad.
d) Una vez montado el sistema, colocar en cero la balanza, y colocar la muestra, esta debe ser esparcida uniformemente en la bandeja de malla, de ser frutas, deben ser cortadas en finas capas, de manera que facilite el secado.
e) Colocar las sondas de los termómetros a la altura de la bandeja, a una de estas colocarle un hisopo de algodón o gasa y frecuentemente humedecerla para que muestre la temperatura de bulbo húmedo.
f) Controlar que la temperatura de los termómetros no varíe más que en décimas de grado, lo cual se puede lograr de dos maneras: manipulando la válvula de vapor (no recomendado), o manipulando la compuerta del secador

5.1.5.3 Apagado del Equipo

Una vez concluida la práctica se procede de la siguiente manera:

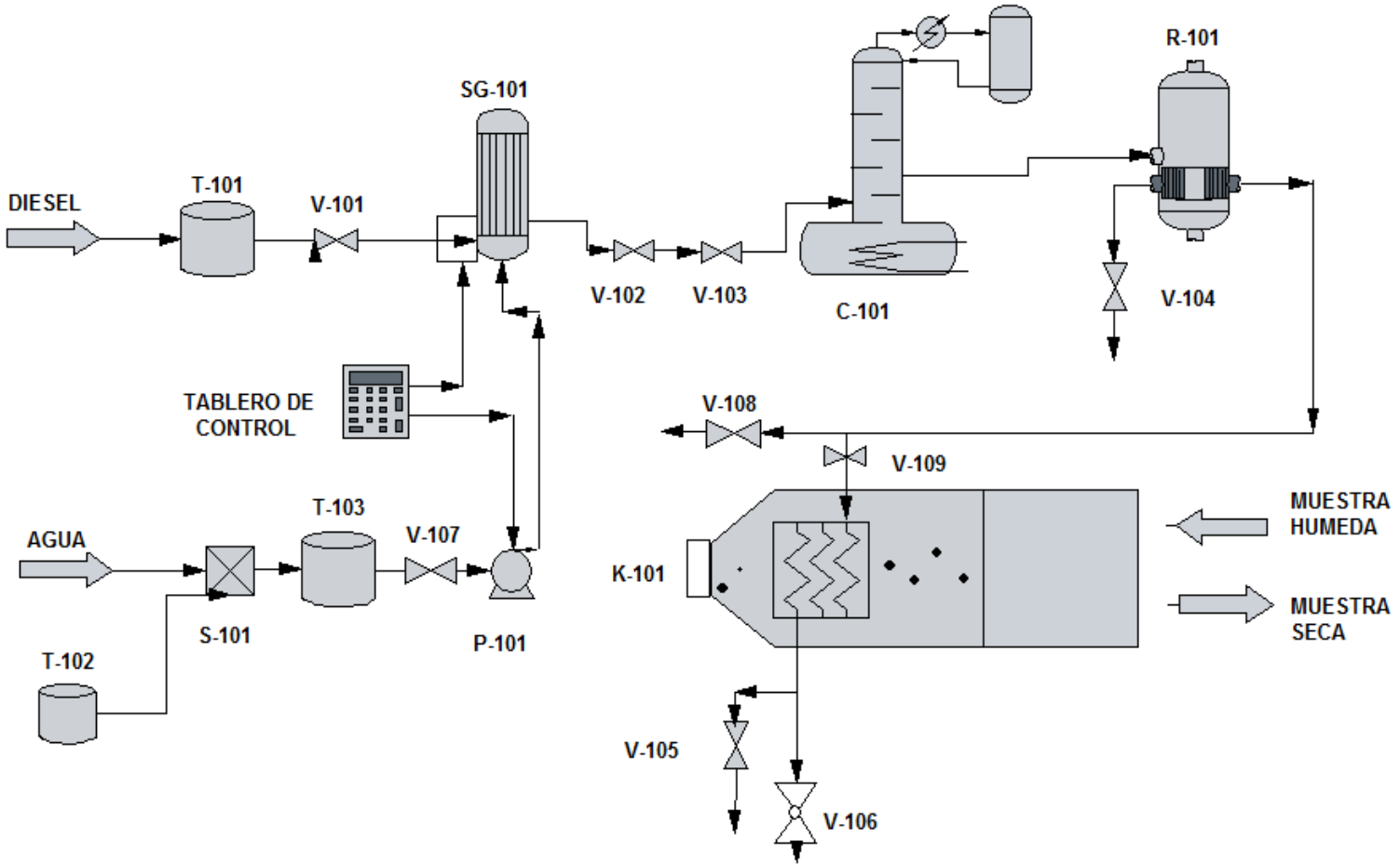
a) Apagar el caldero (SG-101) desactivando la alimentación de diésel, el quemador y la bomba de agua en el tablero de control.
b) Cerrar la alimentación de vapor (V-102) y alimentación de agua.

c) Cerrar en el secador la válvula de vapor (V-109) y abrir la válvula de purga (V-105) que está antes de la trampa de vapor; una vez escapado el vapor cerrarla nuevamente.
d) Apagar el ventilador (K-101).
e) Desmontar el sistema de la balanza y limpiarlo.

5.1.6 Recomendaciones

- La temperatura de bulbo seco favorable para hacer realizar prácticas es de 50 °C.
- Es recomendable controlar la temperatura con la compuerta que posee el secador, abriéndola si se eleva la temperatura y cerrándola cuando esta comience a bajar.
- Para balanzas de capacidad de 450 g se recomienda trabajar con 150-200 g de muestra.
- La práctica puede parar cuando se encuentren 3 coincidencias en la balanza, las cuales varíen en ±0,05 g.
- Se puede anotar también la velocidad de flujo de aire con el anemómetro, como un parámetro adicional de correlación

5.1.7 Diagrama de flujo



Simbología

T-101 Almacenamiento de diésel

T-102 Salmuera

T-103 Agua tratada

V-101 Alimentación de Diésel

V-102 Alimentación de vapor

V-103 Válvula de vapor de Sistema de Destilación

V-104 Válvula de purga de Sistema de Evaporador

V-105 Válvula #2 de purga de Sistema de Secador

V-106 Trampa de vapor

V-107 Alimentación de agua

V-108 Válvula #1 de purga de Sistema de Secador

V-109 Válvula de vapor del secador

S-101 Filtro de resinas

SG-101 Caldero

C-101 Columna de destilación

K-101 Ventilador

B-101 Bomba de agua

R-101 Reactor-evaporador

5.2 Manual de Práctica

5.2.1 Objetivo General

Conocer los principios básicos de la Operación Unitaria de Secado.

5.2.2 Objetivos específicos

- Obtener curvas de secado para una muestra determinada.
- Determinar el contenido crítico de humedad, humedad de equilibrio y velocidad constante de secado a través de las curvas de secado.
- Controlar de forma adecuada el proceso para obtener resultados precisos.

5.2.3 Procedimiento

a) Preparar la muestra a secarse. Si se trabaja con frutas, debe pelarse y cortarse en pedazos similares en tamaño y espesor.
b) Seguir el procedimiento del Manual de Operación (sección 5.1.5.2) para preparar la muestra y el equipo.
c) Colocar la muestra de forma uniforme sobre la malla, tratando de cubrir toda el área disponible.

d) Colocar los termómetros para la medición de temperaturas de bulbo seco y húmedo. Téngase en cuenta que el termómetro de bulbo húmedo debe tener un algodón humedecido, el cual debe empaparse de agua cada cierto tiempo para que la temperatura que se mida sea la correcta.
e) Registrar el peso, la temperatura de bulbo húmedo y seco y la velocidad del aire cada 5 min.
f) Durante la práctica debe de mantenerse el estado estacionario, la cual se refleja en el valor constante de la temperatura de bulbo seco. En caso de que dicha temperatura varíe drásticamente, sígase las indicaciones del Manual de Operación (sección 5.1.5.2. literal f).
g) Continuar con las mediciones hasta que el valor del peso que marce la balanza sea constante con una incertidumbre de ±0.05 g.
h) Una vez terminada la práctica, apagar el equipo como se indica en el Manual de Operación (sección 5.1.5.3) y retirar el material secado de la malla.
i) Llevar una muestra húmeda a una mufla para obtener el peso libre de humedad y registrar este valor.

5.2.4 Formulario de Impresos

El siguiente formato puede ser fotocopiado para anotar los datos correspondientes a temperaturas, pérdidas de masa y velocidad del aire.

PESO HÚMEDO		PESO SECO	

MASA	TBS	TBH	Vaire

MASA	TBS	TBH	Vaire

MASA	TBS	TBH	Vaire

5.2.5 Tablas y Gráficos

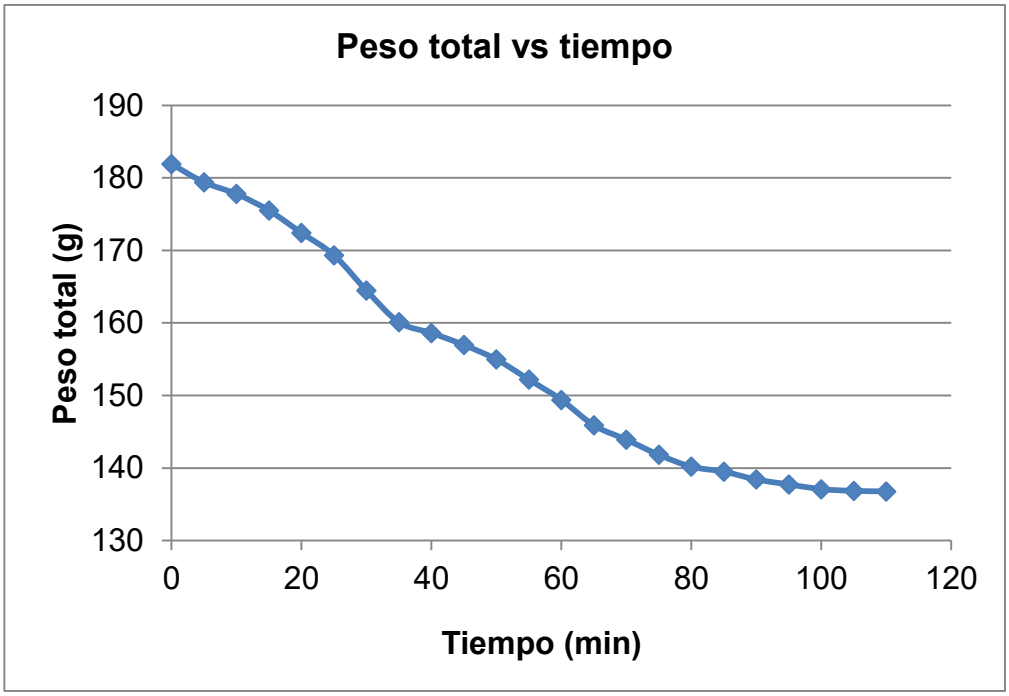
Se debe tomar las dimensiones del equipo para obtener el área transversal, así como las dimensiones de la malla sobre la que se coloca la muestra.

Durante la práctica se registrarán las mediciones como se muestra en la tabla XI. Además se debe de registrar el valor del peso seco de la muestra una vez pasado el tiempo determinado en la mufla. Los valores de peso de la muestra pueden graficarse en función del tiempo como se observa en la figura 20.

Tabla XIV. Ejemplo de mediciones en una prueba de secado

			Temperatura de bulbo húmedo (°C)		Temperatura de bulbo seco (°C)	
Tiempo (min)	**Peso (g)**	**Velocidad del aire (m/s)**	**Inicial**	**Final**	**Inicial**	**Final**
0	181,90	4,55	28,0	28,0	41,4	39,8
5	179,40	4,55	28,5	28,2	42,9	40,2
10	177,79	4,55	28,8	28,5	44,0	41,8
15	175,50	4,59	28,8	28,5	44,5	42,5

Figura 22. Ejemplo de una gráfica de peso total en función del tiempo de secado



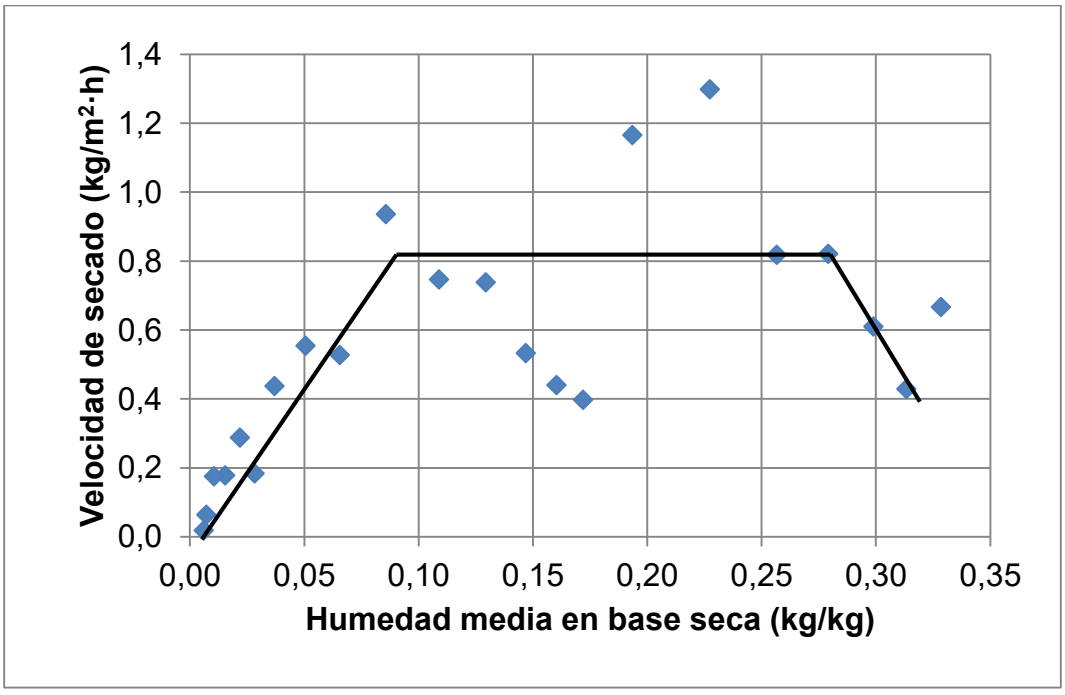
Para obtener la curva de velocidad de secado, es necesario conocer la humedad en base seca de cada valor de peso obtenido en la prueba de secado y la velocidad de secado. Para determinar el primer valor se utiliza la ecuación 1, en donde el peso seco es el peso del material después de ser secado en la mufla. El segundo valor puede obtenerse de la derivada de la gráfica mostrada en la figura 20 o de forma analítica si se dispone de suficientes datos en intervalos de tiempo relativamente cortos.

Si se obtiene la velocidad de forma analítica se debe calcular la humedad en base seca entre cada par de valores. Luego se debe calcular la velocidad de secado entre cada par de valores. La siguiente tabla y la figura 21 muestran los resultados de una prueba de secado.

Tabla XV. Ejemplo de valores calculados a partir de las mediciones de la prueba de secado

Tiempo (min)	Humedad en base seca (kg agua/kg material seco)	Humedad media (kg agua/kg material seco)	Velocidad (kg/m²·h)
0	0,34	-	-
5	0,32	0,33	0,67
10	0,31	0,31	0,43
15	0,29	0,30	0,61

Figura 23. Ejemplo de una gráfica de velocidad media de secado en función de la humedad media en base seca



Con ayuda de esta última gráfica se determina la velocidad de secado en el período constante, la humedad crítica y la humedad en equilibrio.

Tabla XVI. Ejemplo de resultados de una prueba de humedad.

Humedad crítica (kg agua/kg material seco)	0,09
Humedad de equilibrio (kg agua/kg material seco)	0,005
Velocidad de secado en el período constante ($kg/m^2 \cdot h$)	0,95

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó un secador para determinar las curvas de secado de distintos materiales. El secador se diseñó a partir de los requerimientos térmicos que se presentaron en función de pruebas realizadas en el secado con resistencias eléctricas.

- Se seleccionaron dos muestras a secar: manzana y toronjil. Estas especies se secaron en el secador con resistencias eléctricas para obtener los parámetros de secado (velocidad de secado, humedad crítica y humedad de equilibrio) a las condiciones de trabajo (1 atm y 28 °C), con ayuda de las curvas de secado. Para la manzana se obtuvo que la velocidad de secado es 3,77 ± 0,23 kg/(h·m^2) y las humedades crítica y de equilibrio son de 2,57 ± 0,06 kg/kg seco y 0,40 ± 0,02 kg/kg seco, respectivamente; en el caso del toronjil estos parámetros fueron de 0,25 ± 0,06 kg/(h·m^2), 8,07 ± 0,68 kg/kg seco y 3,86 ± 0,18 kg/kg seco.

- Con los valores medidos en las pruebas de secado, se realizaron los balances de materia y energía para el diseño del secador. Se obtuvo que el coeficiente global de transferencia de calor es de 1841 J/(s·m^2·°C) y un área de transferencia de calor de 0,6 m^2. Se dispuso que las corrientes de gases del intercambiador de calor se establecieran

en flujo cruzado en un intercambiador de 27 tubos dispuestos de forma alineada en tres hileras.

- Se dispuso que el intercambiador de calor sea de cobre, el cual presenta un alto valor de conductividad térmica en comparación con otros materiales. Esto ayuda a la transferencia de calor, de manera que el calor que se pierde a través de las paredes del intercambiador sea despreciable. Por otro lado se eligió plywood para construir el cuerpo del secador, el cual es un material resistente. Aunque éste pueda calentarse, se utilizó lana de vidrio para evitar la pérdida de calor.

- Se realizaron las pruebas de secado en el nuevo secador para la manzana y el toronjil y se construyeron las curvas de secado. Los parámetros de secado determinados para la manzana fueron 1,85 ($kg/h \cdot m^2$) de velocidad de secado y 3,9 kg/kg seco y 0,6 kg/kg seco de humedad crítica y humedad de equilibrio respectivamente; por otro lado para el toronjil estos parámetros fueron 0,12 ($kg/h \cdot m^2$), 8,2 kg/kg seco y 3,9 kg/kg seco.

- Los parámetros de secado que arrojaron ambos equipos son similares. Sin embargo en el secador que trabaja con vapor como medio de calefacción es más fácil mantener la temperatura de operación y, por ende, el estado estacionario para el cual se realiza el análisis de las curvas de secado.

- El costo total del equipo es de $795, lo cual representa un ahorro entre el 60 y 97%. Por tanto, este trabajo permitió que el Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales de la ESPOL cuente ahora con un equipo en total funcionamiento y con los requerimientos adecuados para realizar ensayos en el área de Operaciones Unitarias, sin que esto represente un costo excesivo para la institución.

- Se redactaron los manuales de operación y de prácticas para que los estudiantes puedan manejar el equipo de forma adecuada. El manual de operación detalla las etapas de arranque, operación y apagado del equipo; mientras que el manual de prácticas señala los objetivos del uso del secador y las variables que se deben medir durante la práctica para obtener los resultados deseados.

- El presente proyecto permitió que se integraran los conocimientos adquiridos a lo largo del estudio para resolver una necesidad. La formación académica recibida durante este tiempo fue útil para identificar las variables que se debían conocer y los cálculos necesarios para diseñar y posteriormente construir el equipo.

6.2 Recomendaciones

- Para que el equipo tenga un tiempo de vida útil prolongado, debe seguirse los pasos del Manual de operación. Además debe tenerse en cuenta de purgar la caldera después de utilizarla y de realizar periódicamente una limpieza al equipo.

- Se sugiere conseguir una malla que proteja al ventilador de cualquier objeto que se quiera atravesar con las aspas. Esto es válido también como regla de seguridad, de modo que se puedan evitar accidentes al realizar limpieza del equipo (sobre todo lo que se refiera a la limpieza de las aspas del ventilador).

- La metodología utilizada para diseñar y construir el secador puede replicarse, con los ajustes necesarios, para construir otros equipos requeridos en el área de Operaciones Unitarias. Esto ayudará, por un lado, a obtener equipos confiables a un menor costo del que se puede adquirir actualmente en el mercado. Por otro lado, permitirá formar a los futuros profesionales en áreas como operaciones unitarias, diseño de equipos, balance de materia y energía, transferencia de calor, entre otras e integrar estos conocimientos en un solo problema de ingeniería. Otra ventaja es que mejora la transición del estudiante de problemas teóricos a problemas reales que podrían aparecer en la industria. De

esta manera el estudiante podrá aplicar sus conocimientos de manera práctica para resolver algún problema planteado.

ANEXOS

A. Parámetros medidos durante las pruebas de secado y cálculo de humedad media y velocidad media de secado

Prueba #1 Manzana

Peso inicial de la muestra = 80,02 g

Peso seco (14,55%) = 11,64 g

Tiempo (min)	Peso (g)	T_w entrada (°C)	T_w salida (°C)	T_S entrada (°C)	T_S salida (°C)	V_S (m/s)	H (kg/kg peso seco)	H media (kg/kg peso seco)	Velocidad media de secado (kg/hm^2)
0	80,02	28,1	28,1	45,3	42,4	4,34	5,87	5,79	5,76
3	78,04	28,9	28,9	45,2	43,6	5,87	5,70	5,66	3,14
6	76,96	27,2	27,2	46,0	43,6	4,66	5,61	5,55	4,31
9	75,48	27,2	27,2	47,0	44,0	4,63	5,48	5,44	3,06
12	74,43	27,3	27,3	45,4	43,8	4,43	5,39	5,35	3,20
15	73,33	27,3	27,3	46,3	43,8	5,06	5,30	5,26	2,85
18	72,35	27,9	27,9	43,5	42,3	4,14	5,21	5,17	3,03
21	71,31	27,3	27,3	43,4	41,3	4,18	5,12	5,07	3,41
24	70,14	27,2	27,2	46,5	42,4	4,01	5,02	4,98	3,11
27	69,07	27,2	27,2	43,2	42,6	4,26	4,93	4,88	3,78
30	67,77	28,0	28,0	42,4	40,5	4,77	4,82	4,77	3,52
33	66,56	28,0	28,0	43,1	40,2	4,84	4,72	4,68	2,50
36	65,7	28,3	28,3	42,7	40,9	4,03	4,64	4,58	4,25
39	64,24	27,6	27,6	42,4	40,1	4,13	4,52	4,45	4,66

42	62,64	27,4	27,4	46,2	42,5	4,45	4,38	4,33	3,52
45	61,43	28,7	28,7	46,4	43,4	4,54	4,28	4,21	4,72
48	59,81	27,7	27,7	42,8	40,9	5,01	4,14	4,09	3,17
51	58,72	28,4	28,4	44,2	41,1	4,40	4,04	3,98	4,25
54	57,26	28,7	28,7	43,1	41,8	4,17	3,92	3,88	2,85
57	56,28	27,7	27,7	44,1	42,0	5,44	3,83	3,78	3,41
60	55,11	28,3	28,3	44,5	41,7	4,85	3,73	3,68	3,64
63	53,86	28,9	28,9	42,0	40,6	5,37	3,63	3,58	3,17
66	52,77	27,4	27,4	44,2	41,6	4,75	3,53	3,49	3,20
69	51,67	27,3	27,3	46,2	43,2	5,51	3,44	3,39	3,35
72	50,52	28,6	28,6	46,6	42,6	4,65	3,34	3,29	3,64
75	49,27	28,1	28,1	43,5	42,0	4,12	3,23	3,17	4,08
78	47,87	27,3	27,3	43,1	41,6	5,97	3,11	3,07	3,09
81	46,81	28,1	28,1	43,9	41,7	5,13	3,02	2,98	2,94
84	45,8	27,2	27,2	43,9	41,2	4,38	2,93	2,88	3,43
87	44,62	28,0	28,0	43,0	41,5	4,02	2,83	2,79	3,20
90	43,52	27,3	27,3	45,3	42,7	4,10	2,74	2,69	3,49
93	42,32	27,1	27,1	46,7	44,4	5,28	2,63	2,59	3,03
96	41,28	28,1	28,1	43,3	42,5	5,22	2,55	2,50	2,77
99	40,33	28,0	28,0	44,2	43,0	4,26	2,46	2,42	3,17
102	39,24	27,3	27,3	45,0	43,8	4,30	2,37	2,32	3,43
105	38,06	28,0	28,0	45,9	43,0	4,24	2,27	2,20	4,34
108	36,57	28,3	28,3	46,8	42,9	4,74	2,14	2,09	3,41
111	35,4	27,5	27,5	42,4	40,9	5,20	2,04	2,00	2,45
114	34,56	27,2	27,2	43,7	41,0	4,75	1,97	1,92	3,26
117	33,44	27,5	27,5	45,5	43,8	5,50	1,87	1,83	2,59

120	32,55	27,2	27,2	44,5	42,6	4,28	1,80	1,76	2,62
123	31,65	29,0	29,0	42,7	40,9	5,81	1,72	1,68	2,45
126	30,81	27,5	27,5	44,6	42,7	5,12	1,65	1,62	2,10
129	30,09	28,6	28,6	46,2	43,9	4,61	1,58	1,54	2,68
132	29,17	27,8	27,8	42,1	41,2	5,03	1,51	1,47	2,59
135	28,28	28,2	28,2	46,9	42,6	4,72	1,43	1,33	6,58
138	26,02	27,2	27,2	47,0	45,0	5,05	1,23	1,22	1,05
141	25,66	27,8	27,8	42,9	41,5	4,28	1,20	1,18	1,66
144	25,09	28,3	28,3	42,4	41,6	5,37	1,15	1,12	2,45
147	24,25	27,2	27,2	43,9	43,3	4,34	1,08	1,05	2,07
150	23,54	28,6	28,6	43,4	43,1	5,46	1,02	1,01	1,02
153	23,19	27,4	27,4	46,2	43,0	5,31	0,99	0,96	1,95
156	22,52	28,5	28,5	43,9	43,3	5,89	0,93	0,91	1,63
159	21,96	27,4	27,4	44,4	42,9	4,43	0,89	0,87	1,19
162	21,55	28,1	28,1	44,5	41,9	5,84	0,85	0,83	1,51
165	21,03	27,7	27,7	43,6	42,2	5,15	0,81	0,78	1,78
168	20,42	28,9	28,9	45,9	43,2	4,31	0,75	0,74	1,05
171	20,06	27,8	27,8	46,6	43,8	4,82	0,72	0,71	0,87
174	19,76	28,0	28,0	42,2	41,7	5,16	0,70	0,67	2,01
177	19,07	28,4	28,4	43,9	41,9	4,00	0,64	0,62	0,96
180	18,74	28,2	28,2	45,0	43,2	5,99	0,61	0,59	1,02
183	18,39	28,7	28,7	44,4	41,4	5,83	0,58	0,57	0,90
186	18,08	28,9	28,9	44,2	43,9	5,22	0,55	0,53	1,46
189	17,58	28,0	28,0	42,2	40,7	4,16	0,51	0,49	1,02
192	17,23	27,9	27,9	44,7	43,4	5,17	0,48	0,46	1,02
195	16,88	28,3	28,3	44,7	41,3	4,74	0,45	0,44	0,90

198	16,57	28,8	28,8	45,9	43,1	5,71	0,42	0,41	0,82
201	16,29	27,2	27,2	46,6	42,3	5,10	0,40	0,39	0,41
204	16,15	27,6	27,6	44,2	41,5	4,62	0,39	---	---

Prueba #2 Manzana

Peso inicial de la muestra = 88,02 g

Peso seco (14,55%) = 12,81 g

Tiempo (min)	**Peso (g)**	**T_W entrada (°C)**	**T_W salida (°C)**	**T_S entrada (°C)**	**T_S salida (°C)**	**V_S (m/s)**	**H (kg/kg peso seco)**	**H media (kg/kg peso seco)**	**Velocidad media de secado (kg/hm^2)**
0	88,02	29,8	29,8	44,5	42,6	4,71	5,87	5,77	5,01
5	85,41	29,7	29,7	46,4	41,6	3,86	5,67	5,59	3,90
10	83,38	28,5	28,5	45,1	41,0	4,53	5,51	5,44	3,67
15	81,47	28,9	28,9	45,8	42,8	6,28	5,36	5,30	3,25
20	79,78	29,7	29,7	44,9	42,8	4,28	5,23	5,16	3,44
25	77,99	29,2	29,2	44,1	42,2	3,20	5,09	5,03	2,77
30	76,55	28,5	28,5	45,0	41,0	4,56	4,98	4,91	3,28
35	74,84	28,0	28,0	44,2	41,7	4,59	4,84	4,76	4,09
40	72,71	29,3	29,3	45,6	41,2	4,86	4,68	4,60	3,61
45	70,83	28,8	28,8	46,9	42,2	3,31	4,53	4,47	3,09
50	69,22	29,3	29,3	45,9	41,9	3,43	4,40	4,33	3,90
55	67,19	29,4	29,4	45,3	42,5	3,89	4,25	4,17	3,96
60	65,13	28,5	28,5	44,6	42,4	3,99	4,09	4,01	3,50
65	63,31	29,1	29,1	44,6	42,0	4,52	3,94	3,84	4,92

70	60,75	29,2	29,2	46,6	42,2	5,00	3,74	3,66	4,05
75	58,64	29,1	29,1	46,2	41,4	4,59	3,58	3,51	3,40
80	56,87	29,5	29,5	45,7	41,6	4,28	3,44	3,35	4,32
85	54,62	29,8	29,8	44,6	42,4	3,93	3,26	3,17	4,65
90	52,20	29,3	29,3	44,4	42,6	4,48	3,08	2,99	4,17
95	50,03	29,3	29,3	44,4	41,3	3,12	2,91	2,81	4,63
100	47,62	30,0	30,0	44,4	42,9	4,14	2,72	2,62	4,67
105	45,19	29,7	29,7	45,7	41,7	3,26	2,53	2,47	2,86
110	43,70	29,7	29,7	46,2	42,4	4,32	2,41	2,38	1,81
115	42,76	29,0	29,0	45,4	41,7	4,98	2,34	2,30	1,75
120	41,85	30,0	30,0	45,9	42,2	4,41	2,27	2,20	3,38
125	40,09	28,0	28,0	45,1	41,7	4,18	2,13	2,08	2,29
130	38,90	28,1	28,1	45,8	41,1	4,72	2,04	2,00	1,92
135	37,90	28,3	28,3	45,9	41,9	5,02	1,96	1,91	2,50
140	36,60	29,7	29,7	45,0	42,9	4,02	1,86	1,80	2,88
145	35,10	29,9	29,9	45,8	41,3	5,39	1,74	1,70	1,82
150	34,15	29,8	29,8	46,6	41,6	5,71	1,67	1,62	2,17
155	33,02	29,0	29,0	45,4	42,7	5,68	1,58	1,53	2,21
160	31,87	28,5	28,5	45,6	42,1	6,52	1,49	1,42	3,17
165	30,22	28,5	28,5	45,4	42,5	5,86	1,36	1,32	2,07
170	29,14	29,7	29,7	45,0	42,2	5,98	1,28	1,25	1,42
175	28,40	29,8	29,8	45,4	42,3	6,77	1,22	1,15	3,17
180	26,75	29,5	29,5	46,1	41,7	4,27	1,09	1,04	2,54
185	25,43	28,6	28,6	45,2	42,0	6,39	0,99	0,96	1,42
190	24,69	29,4	29,4	45,4	41,9	6,79	0,93	0,89	1,67
195	23,82	28,6	28,6	46,8	41,2	4,04	0,86	0,80	2,90

200	22,31	28,3	28,3	45,1	42,3	5,45	0,74	0,73	0,67
205	21,96	29,0	29,0	45,3	42,5	4,48	0,71	0,70	0,65
210	21,62	28,4	28,4	46,1	42,3	6,12	0,69	0,67	0,94
215	21,13	28,8	28,8	45,1	41,6	6,53	0,65	0,64	0,71
220	20,76	28,2	28,2	46,1	42,4	3,12	0,62	0,61	0,73
225	20,38	29,0	29,0	46,1	42,1	3,94	0,59	0,57	0,88
230	19,92	29,1	29,1	45,2	41,6	6,13	0,56	0,54	0,67
235	19,57	28,8	28,8	46,1	41,4	4,56	0,53	0,51	0,75
240	19,18	28,7	28,7	46,0	41,9	3,14	0,50	0,49	0,46
245	18,94	28,8	28,8	46,8	42,6	6,27	0,48	0,47	0,50
250	18,68	28,6	28,6	46,4	41,8	3,77	0,46	0,45	0,54
255	18,40	30,0	30,0	45,0	42,5	3,61	0,44	0,43	0,27
260	18,26	28,0	28,0	45,7	41,8	4,75	0,43	---	---

Prueba #3 Manzana

Peso inicial de la muestra = 91,87 g

Peso seco (14,55%) = 13,37 g

Tiempo (min)	**Peso (g)**	**T_W entrada (°C)**	**T_W salida (°C)**	**T_S entrada (°C)**	**T_S salida (°C)**	**V_S (m/s)**	**H (kg/kg peso seco)**	**H media (kg/kg peso seco)**	**Velocidad media de secado (kg/hm^2)**
0	91,87	28,5	28,5	47,4	42,2	4,12	5,87	5,82	2,83
5	90,46	28,4	28,4	45,9	43,9	3,92	5,77	5,69	4,27
10	88,33	28,1	28,1	46,1	43,2	3,34	5,61	5,54	3,71
15	86,48	27,8	27,8	47,8	43,8	5,06	5,47	5,40	3,53

20	84,72	28,5	28,5	46,4	44,8	6,11	5,34	5,28	2,95
25	83,25	27,9	27,9	47,6	43,8	3,34	5,23	5,15	4,43
30	81,04	27,3	27,3	45,6	43,6	4,64	5,06	4,97	4,79
35	78,65	28,8	28,8	46,8	42,6	3,97	4,88	4,82	3,65
40	76,83	28,7	28,7	45,1	43,4	3,85	4,75	4,68	3,37
45	75,15	27,2	27,2	45,9	44,2	4,20	4,62	4,55	3,79
50	73,26	27,3	27,3	46,2	41,9	4,48	4,48	4,39	4,75
55	70,89	28,4	28,4	45,0	44,6	4,69	4,30	4,24	3,41
60	69,19	27,2	27,2	47,1	41,8	4,89	4,18	4,11	3,29
65	67,55	27,5	27,5	47,0	41,5	5,49	4,05	4,02	1,99
70	66,56	27,3	27,3	45,2	41,3	7,00	3,98	3,89	4,73
75	64,20	28,0	28,0	47,4	43,0	5,33	3,80	3,73	4,15
80	62,13	27,4	27,4	46,1	42,5	5,71	3,65	3,59	3,03
85	60,62	27,8	27,8	47,1	43,4	6,56	3,54	3,44	4,87
90	58,19	27,4	27,4	45,6	44,6	5,31	3,35	3,30	2,99
95	56,70	27,5	27,5	46,7	41,6	6,58	3,24	3,16	4,49
100	54,46	27,3	27,3	47,1	44,0	3,11	3,07	2,99	4,43
105	52,25	28,6	28,6	46,5	44,1	3,87	2,91	2,83	4,33
110	50,09	27,4	27,4	47,7	44,9	3,44	2,75	2,72	1,58
115	49,30	27,7	27,7	47,9	44,7	3,19	2,69	2,61	4,21
120	47,20	27,7	27,7	46,7	41,4	3,78	2,53	2,51	0,86
125	46,77	28,9	28,9	47,6	42,1	4,95	2,50	2,44	3,35
130	45,10	27,3	27,3	45,3	44,5	4,53	2,37	2,30	3,91
135	43,15	27,4	27,4	47,4	41,9	3,47	2,23	2,15	4,27
140	41,02	27,8	27,8	45,4	42,4	3,90	2,07	2,00	3,43
145	39,31	28,8	28,8	45,0	41,6	3,87	1,94	1,84	5,19

150	36,72	27,3	27,3	46,1	41,5	6,15	1,75	1,68	3,41
155	35,02	28,7	28,7	47,0	43,0	6,75	1,62	1,49	7,12
160	31,47	27,6	27,6	45,5	42,7	6,05	1,35	1,30	2,65
165	30,15	27,4	27,4	47,9	44,8	3,51	1,26	1,19	3,45
170	28,43	28,4	28,4	45,9	44,0	3,19	1,13	1,10	1,48
175	27,69	27,4	27,4	46,4	42,1	4,98	1,07	1,04	1,74
180	26,82	28,5	28,5	46,5	42,4	4,00	1,01	0,95	3,03
185	25,31	27,1	27,1	46,9	41,4	5,11	0,89	0,84	2,71
190	23,96	27,8	27,8	45,6	43,9	6,50	0,79	0,74	2,69
195	22,62	27,9	27,9	47,7	42,8	6,68	0,69	0,65	2,21
200	21,52	27,7	27,7	46,2	43,9	5,51	0,61	0,58	1,36
205	20,84	28,4	28,4	46,9	44,8	6,90	0,56	0,53	1,62
210	20,03	28,0	28,0	45,4	41,5	6,56	0,50	0,49	0,42
215	19,82	29,0	29,0	45,2	43,1	6,14	0,48	0,47	0,78
220	19,43	27,1	27,1	47,0	41,8	6,65	0,45	0,44	0,58
225	19,14	27,7	27,7	46,5	43,1	5,65	0,43	0,42	0,44
230	18,92	27,6	27,6	45,7	41,0	5,65	0,42	0,41	0,42
235	18,71	27,2	27,2	47,4	42,4	6,87	0,40	0,39	0,26
240	18,58	27,5	27,5	46,6	42,4	6,42	0,39	---	---

Prueba #1 Toronjil

Peso inicial de la muestra = 18,15 g

Peso seco (7,48%) = 1,36 g

Tiempo (min)	Peso (g)	T_W entrada (°C)	T_W salida (°C)	T_S entrada (°C)	T_S salida (°C)	V_S (m/s)	H (kg/kg peso seco)	H media (kg/kg peso seco)	Velocidad media de secado (kg/hm^2)
0	18,15	28,9	28,9	47,1	44,0	4,92	12,369	11,831	0,50
3	16,69	27,6	27,6	44,7	41,7	4,86	11,294	11,091	0,19
6	16,14	28,9	28,9	43,5	43,6	4,38	10,888	10,620	0,25
9	15,41	27,9	27,9	43,7	43,6	5,73	10,351	10,141	0,19
12	14,84	27,2	27,2	42,0	42,9	4,19	9,931	9,769	0,15
15	14,40	28,3	28,3	44,1	43,5	4,23	9,607	9,423	0,17
18	13,90	26,5	26,5	46,2	41,6	5,74	9,239	9,058	0,17
21	13,41	27,1	27,1	43,2	42,5	3,22	8,878	8,686	0,18
24	12,89	28,9	28,9	47,5	41,2	3,56	8,495	8,307	0,17
27	12,38	28,7	28,7	44,8	41,7	4,76	8,119	7,983	0,13
30	12,01	28,6	28,6	46,1	42,9	6,57	7,846	7,662	0,17
33	11,51	28,9	28,9	45,9	43,3	4,00	7,478	7,368	0,10
36	11,21	28,6	28,6	45,5	41,7	3,04	7,257	7,110	0,14
39	10,81	28,8	28,8	44,6	43,7	5,15	6,962	6,823	0,13
42	10,43	27,2	27,2	45,2	43,7	4,92	6,683	6,495	0,17
45	9,92	28,8	28,8	43,0	42,4	6,78	6,307	6,171	0,13
48	9,55	28,9	28,9	42,7	41,4	5,00	6,034	5,869	0,15
51	9,10	27,4	27,4	47,5	41,6	6,38	5,703	5,626	0,07

54	8,89	26,1	26,1	44,4	41,5	3,78	5,548	5,405	0,13
57	8,50	26,3	26,3	42,0	41,5	6,59	5,261	5,176	0,08
60	8,27	27,9	27,9	46,3	41,5	3,81	5,092	4,963	0,12
63	7,92	28,5	28,5	44,2	42,8	4,16	4,834	4,742	0,08
66	7,67	28,4	28,4	43,3	43,0	5,93	4,650	4,539	0,10
69	7,37	26,2	26,2	42,5	44,0	3,16	4,429	4,296	0,12
72	7,01	28,1	28,1	45,0	42,5	3,91	4,163	4,071	0,08
75	6,76	28,2	28,2	46,5	43,0	5,28	3,979	3,920	0,05
78	6,60	28,0	28,0	48,6	41,2	3,29	3,861	3,839	0,02
81	6,54	28,9	28,9	44,0	43,9	4,79	3,817	3,773	0,04
84	6,42	28,3	28,3	47,3	43,4	6,56	3,729	3,721	0,01
87	6,40	28,4	28,4	48,2	41,5	3,46	3,714	3,710	0,00
90	6,39	27,2	27,2	43,5	43,9	5,65	3,707	3,703	0,00
93	6,38	26,3	26,3	42,4	42,1	3,36	3,699	---	---

Prueba #2 Toronjil

Peso inicial de la muestra = 22,31 g

Peso seco (7,48%) = 1,67 g

Tiempo (min)	Peso (g)	T_W entrada (°C)	T_W salida (°C)	T_S entrada (°C)	T_S salida (°C)	V_S (m/s)	H (kg/kg peso seco)	H media (kg/kg peso seco)	Velocidad media de secado (kg/hm^2)
0	22,31	26,5	26,5	43,7	39,8	3,02	12,369	11,857	0,71
3	20,60	30,2	30,2	44,1	39,4	5,31	11,344	11,009	0,47
6	19,48	29,2	29,2	44,2	42,3	4,55	10,673	10,269	0,56
9	18,13	26,9	26,9	46,2	39,6	4,23	9,864	9,484	0,53
12	16,86	27,1	27,1	46,6	39,2	5,44	9,103	8,881	0,31
15	16,12	26,7	26,7	44,0	42,8	3,89	8,660	8,441	0,30
18	15,39	30,9	30,9	47,1	40,7	5,23	8,222	8,001	0,31
21	14,65	28,9	28,9	46,3	41,7	3,94	7,779	7,635	0,20
24	14,17	26,9	26,9	45,9	42,7	5,71	7,491	7,278	0,30
27	13,46	27,1	27,1	42,3	39,2	6,60	7,066	6,907	0,22
30	12,93	27,7	27,7	46,5	39,9	3,81	6,748	6,580	0,23
33	12,37	26,2	26,2	44,4	40,3	6,93	6,413	6,281	0,18
36	11,93	29,0	29,0	46,1	40,9	4,84	6,149	6,005	0,20
39	11,45	26,9	26,9	44,6	41,5	4,83	5,861	5,726	0,19
42	11,00	28,2	28,2	44,5	41,8	6,63	5,592	5,487	0,15
45	10,65	28,3	28,3	43,2	40,2	4,39	5,382	5,304	0,11
48	10,39	29,7	29,7	45,4	39,6	5,14	5,226	5,109	0,16
51	10,00	28,2	28,2	44,1	40,1	3,13	4,992	4,914	0,11

54	9,74	27,6	27,6	44,4	39,9	4,78	4,837	4,771	0,09
57	9,52	26,9	26,9	45,9	40,3	6,71	4,705	4,615	0,13
60	9,22	30,0	30,0	46,3	39,8	5,19	4,525	4,477	0,07
63	9,06	28,6	28,6	46,2	40,5	4,06	4,429	4,369	0,08
66	8,86	29,9	29,9	44,5	40,0	4,91	4,309	4,267	0,06
69	8,72	27,5	27,5	44,5	40,2	6,55	4,225	4,159	0,09
72	8,50	29,9	29,9	44,0	41,9	4,15	4,094	4,064	0,04
75	8,40	28,1	28,1	43,9	42,1	6,80	4,034	3,995	0,05
78	8,27	26,3	26,3	44,6	39,9	4,87	3,956	3,932	0,03
81	8,19	27,5	27,5	43,4	40,4	5,19	3,908	3,866	0,06
84	8,05	26,1	26,1	44,6	42,4	5,18	3,824	3,821	0,00
87	8,04	28,3	28,3	42,3	42,4	5,96	3,818	3,812	0,01
90	8,02	29,9	29,9	45,4	39,1	4,88	3,806	3,806	0,00
93	8,02	26,9	26,9	44,5	39,2	3,26	3,806	---	---

Prueba #3 Toronjil

Peso inicial de la muestra = 24,77 g

Peso seco (7,48%) = 1,85 g

Tiempo (min)	Peso (g)	T_W entrada (°C)	T_W salida (°C)	T_S entrada (°C)	T_S salida (°C)	V_S (m/s)	H (kg/kg peso seco)	H media (kg/kg peso seco)	Velocidad media de secado (kg/hm^2)
0	24,77	26,9	26,9	47,9	43,0	6,57	12,369	11,932	0,45
5	23,15	27,6	27,6	44,9	41,6	3,87	11,495	11,209	0,29
10	22,09	30,7	30,7	42,2	43,3	5,85	10,923	10,550	0,38
15	20,71	26,3	26,3	43,4	41,4	4,46	10,178	9,843	0,34
20	19,47	27,9	27,9	42,8	42,1	3,62	9,508	9,206	0,31
25	18,35	26,7	26,7	43,8	41,7	4,99	8,904	8,621	0,29
30	17,30	29,5	29,5	47,8	43,0	5,25	8,337	9,630	0,26
35	16,35	28,7	28,7	43,0	41,6	5,13	10,923	10,550	0,26
40	15,40	27,6	27,6	48,3	44,0	5,11	10,178	9,843	0,28
45	14,39	30,8	30,8	47,8	43,8	6,99	9,508	9,206	0,25
50	13,48	28,3	28,3	44,1	42,1	6,27	8,904	8,621	0,08
55	13,20	27,5	27,5	43,5	43,0	4,31	8,337	8,081	0,18
60	12,57	29,9	29,9	44,4	41,8	3,95	7,825	7,568	0,14
65	12,05	26,2	26,2	44,1	42,6	4,39	7,312	7,039	0,12
70	11,63	27,6	27,6	45,7	41,9	3,92	6,767	6,521	0,11
75	11,23	26,9	26,9	43,0	41,9	3,94	6,275	6,200	0,11
80	10,85	27,6	27,6	46,8	42,4	5,28	6,124	5,954	0,10
85	10,50	30,3	30,3	46,3	41,2	4,79	5,784	5,644	0,16

90	9,92	28,3	28,3	42,2	41,6	6,51	5,504	5,390	0,08
95	9,64	28,5	28,5	42,2	41,4	3,50	5,277	5,169	0,01
100	9,59	28,3	28,3	48,1	42,1	3,29	5,061	4,959	0,01
105	9,56	28,5	28,5	49,1	42,6	5,95	4,856	4,762	0,03
110	9,45	28,2	28,2	43,0	41,8	3,68	4,667	4,511	0,03
115	9,36	28,2	28,2	43,2	41,9	4,71	4,354	4,279	0,04
120	9,22	28,2	28,2	45,8	41,6	3,91	4,203	4,189	0,03
125	9,10	30,8	30,8	44,5	43,0	6,94	4,176	4,168	0,01
130	9,06	26,5	26,5	48,3	43,2	7,87	4,160	4,130	0,01
135	9,02	28,4	28,4	44,4	42,7	6,48	4,100	4,076	0,00
140	9,01	27,3	27,3	44,9	43,5	6,86	4,052	---	---

B. Ensamble del equipo

Foto 1. Soldadura del intercambiador de calor

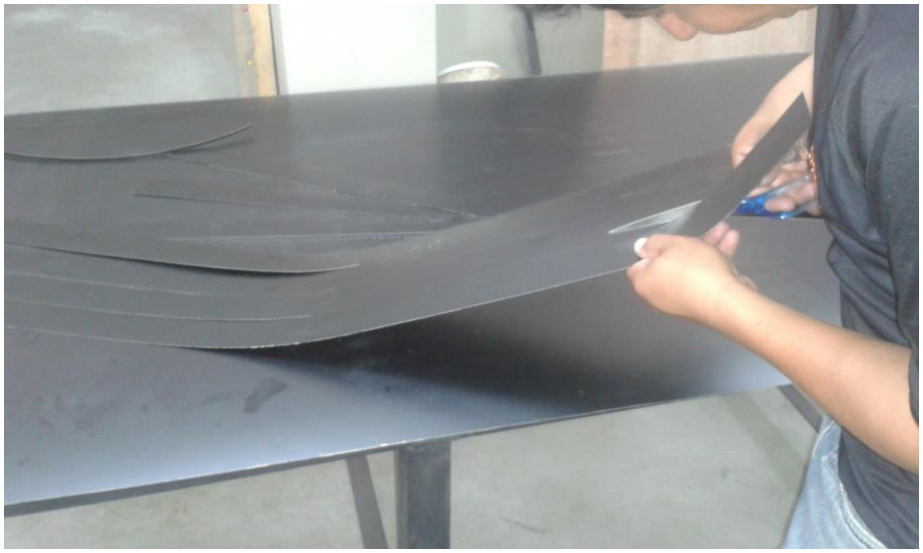


Foto 2. Corte de láminas de fórmica

Foto 3. Intercambiador de calor con su carcasa

Foto 4. Acople del ventilador a la campana

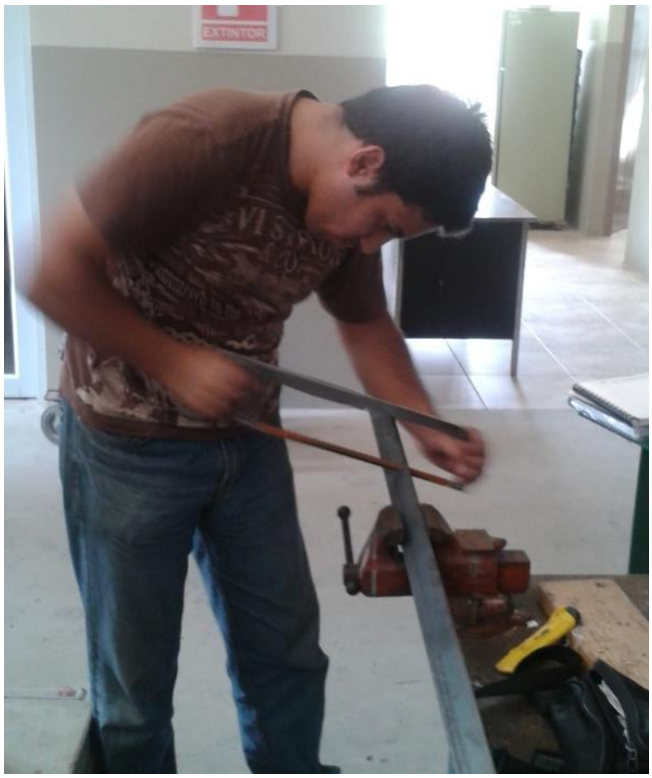


Foto 5. Corte de ángulos para soporte

Foto 6. Muestra de toronjil previo al secado

Foto 7. Muestra de toronjil después del secado

Foto 8. Muestra de manzana previo al secado

Foto 9. Muestra de manzana después del secado

C. Nomograma para determinación de la viscosidad dinámica de gases en función de la temperatura

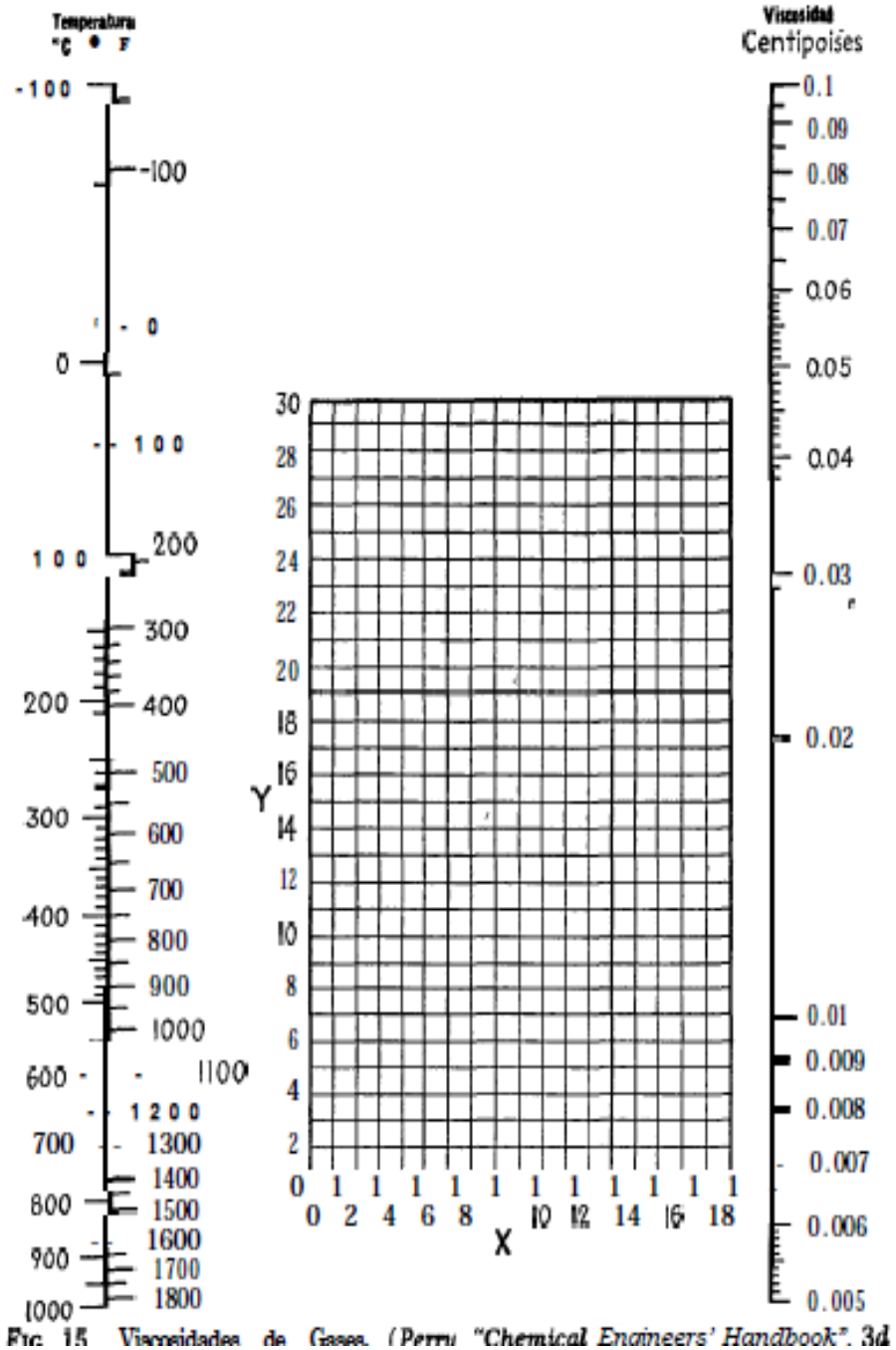


Fig. 15 Viscosidades de Gases. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook", 3d

D. Parámetros medidos durante las pruebas de secado en el secador diseñado y cálculo de humedad media y velocidad media de secado

Prueba Manzana

Peso inicial de la muestra = 105,88 g

Peso seco (14,55%) = 15,41 g

Tiempo (min)	Peso (g)	T_W entrada (°C)	T_W salida (°C)	T_S entrada (°C)	T_S salida (°C)	V_S (m/s)	H (kg/kg peso seco)	H media (kg/kg peso seco)	Velocidad media de secado (kg/hm^2)
0	105,88	27,0	27,0	45,3	41,4	4,87	5,873	5,799	1,63
5	103,60	28,8	28,8	44,4	42,8	5,65	5,725	5,644	1,77
10	101,12	27,2	27,2	45,2	41,2	5,86	5,564	5,476	1,94
15	98,40	27,2	27,2	44,9	42,5	4,47	5,387	5,245	3,14
20	94,00	28,4	28,4	45,3	42,9	5,11	5,102	5,013	1,95
25	91,26	27,1	27,1	45,5	41,6	4,54	4,924	4,838	1,89
30	88,61	28,5	28,5	46,4	42,6	5,73	4,752	4,663	1,95
35	85,88	27,5	27,5	45,0	41,3	5,75	4,575	4,491	1,85
40	83,29	28,7	28,7	47,0	41,3	5,45	4,406	4,322	1,85
45	80,70	28,1	28,1	45,1	41,5	4,20	4,238	4,155	1,84
50	78,12	27,9	27,9	45,5	42,2	5,05	4,071	3,988	1,83
55	75,56	29,0	29,0	45,2	42,7	4,51	3,905	3,816	1,95
60	72,82	28,1	28,1	45,5	41,8	4,02	3,727	3,653	1,62

65	70,55	28,7	28,7	45,6	42,0	4,24	3,580	3,512	1,49
70	68,46	28,7	28,7	45,5	41,4	5,11	3,444	3,371	1,60
75	66,22	27,1	27,1	45,6	41,9	4,50	3,298	3,227	1,58
80	64,01	28,3	28,3	44,1	41,7	4,16	3,155	3,079	1,68
85	61,66	27,1	27,1	46,7	41,2	5,60	3,002	2,939	1,39
90	59,71	27,7	27,7	46,3	41,8	4,04	2,876	2,826	1,09
95	58,18	27,2	27,2	44,5	41,6	5,47	2,777	2,714	1,38
100	56,25	27,8	27,8	46,3	42,9	4,03	2,651	2,594	1,26
105	54,49	28,1	28,1	45,1	42,3	4,02	2,537	2,479	1,27
110	52,71	28,5	28,5	46,3	41,3	5,35	2,421	2,367	1,20
115	51,03	27,7	27,7	45,1	41,2	4,29	2,312	2,269	0,95
120	49,70	27,8	27,8	46,9	42,4	5,08	2,226	2,177	1,08
125	48,18	28,5	28,5	46,9	41,8	5,67	2,127	2,084	0,96
130	46,84	28,8	28,8	45,7	42,3	4,76	2,040	1,999	0,91
135	45,57	28,0	28,0	45,0	41,6	5,29	1,958	1,916	0,92
140	44,28	27,7	27,7	44,6	42,2	5,46	1,874	1,828	1,02
145	42,85	28,3	28,3	46,8	42,1	5,05	1,781	1,747	0,75
150	41,80	28,3	28,3	44,7	41,1	5,53	1,713	1,676	0,83
155	40,64	27,5	27,5	44,1	41,9	4,19	1,638	1,603	0,78
160	39,55	27,4	27,4	44,8	41,4	4,30	1,567	1,533	0,75
165	38,50	27,9	27,9	44,9	42,3	4,15	1,499	1,471	0,63
170	37,62	27,9	27,9	46,1	41,2	5,18	1,442	1,415	0,60
175	36,78	28,1	28,1	44,8	41,4	4,67	1,387	1,354	0,74
180	35,74	27,5	27,5	46,2	42,2	4,73	1,320	1,295	0,56
185	34,96	27,8	27,8	44,3	42,6	4,31	1,269	1,246	0,51
190	34,25	28,7	28,7	45,9	41,1	5,63	1,223	1,201	0,50

195	33,55	27,9	27,9	46,8	43,0	5,21	1,178	1,153	0,53
200	32,80	28,2	28,2	46,6	41,4	4,97	1,129	1,110	0,43
205	32,20	28,8	28,8	44,0	42,2	5,75	1,090	1,070	0,44
210	31,58	28,6	28,6	46,2	42,7	5,86	1,050	1,030	0,43
215	30,98	28,5	28,5	45,4	41,4	4,80	1,011	0,997	0,31
220	30,54	27,7	27,7	46,6	42,7	5,92	0,982	0,966	0,36
225	30,04	27,1	27,1	44,5	41,4	4,44	0,950	0,933	0,36
230	29,53	27,8	27,8	45,6	41,6	4,83	0,917	0,902	0,34
235	29,06	27,7	27,7	44,2	42,2	4,49	0,886	0,877	0,21
240	28,76	27,1	27,1	44,7	42,1	5,37	0,867	0,855	0,26
245	28,39	28,2	28,2	45,3	41,4	4,77	0,843	0,831	0,26
250	28,03	28,8	28,8	46,5	41,1	5,28	0,819	0,806	0,29
255	27,63	28,0	28,0	45,7	42,1	4,19	0,794	0,777	0,36
260	27,13	28,7	28,7	44,7	42,6	5,50	0,761	0,754	0,15
265	26,92	28,5	28,5	47,0	42,4	5,26	0,747	0,738	0,20
270	26,64	28,2	28,2	45,5	42,0	4,79	0,729	0,719	0,24
275	26,31	28,6	28,6	44,9	42,4	6,00	0,708	0,702	0,13
280	26,13	27,5	27,5	44,2	41,6	4,12	0,696	0,689	0,15
285	25,92	27,5	27,5	46,6	42,9	5,10	0,683	0,676	0,15
290	25,71	28,2	28,2	46,2	41,6	4,69	0,669	---	---

Prueba Toronjil

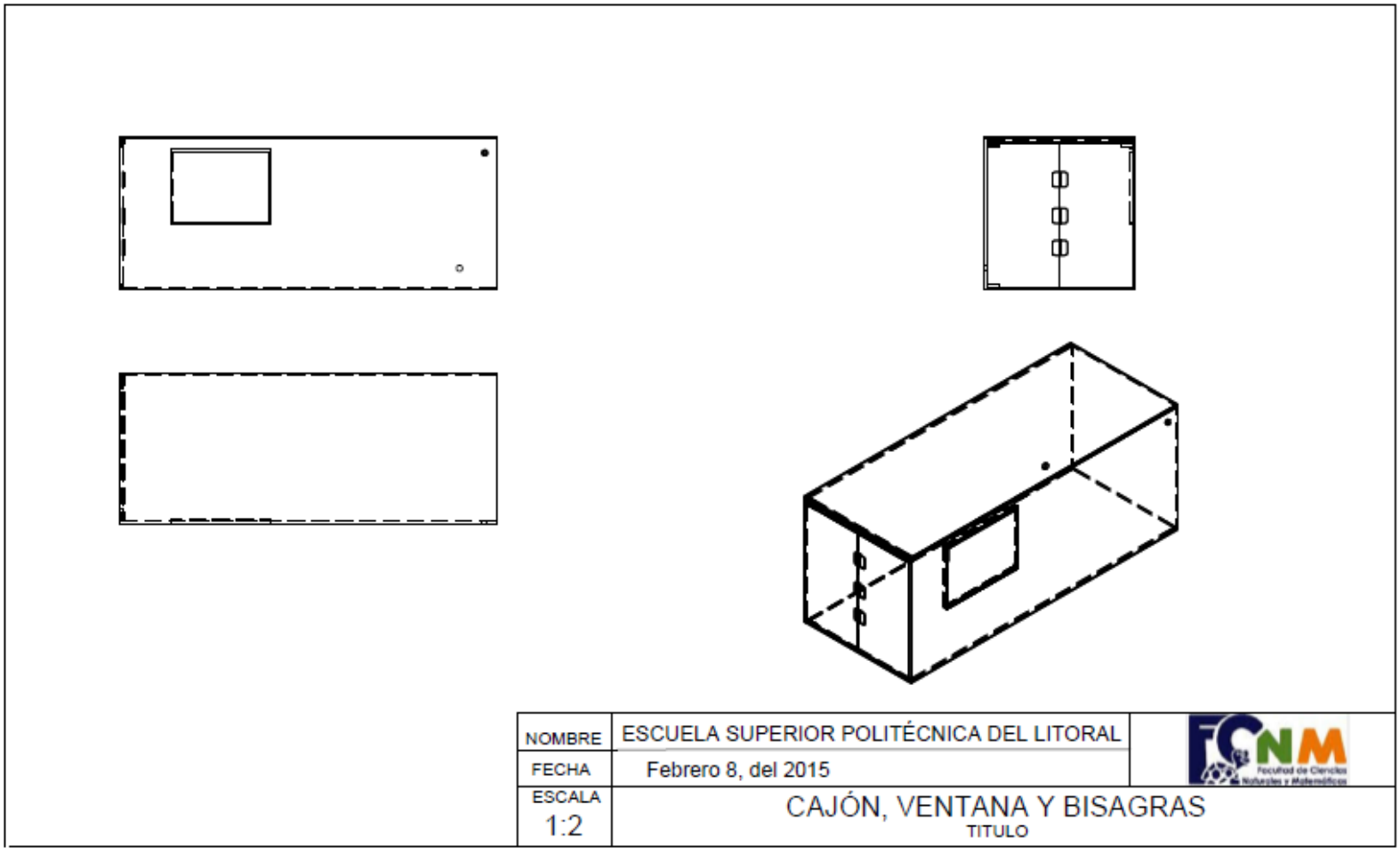
Peso inicial de la muestra = 26,48 g

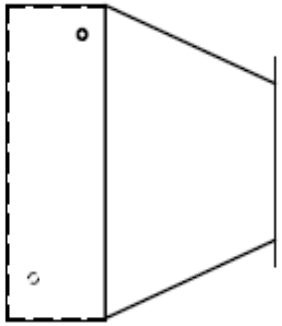
Peso seco (7,48%) = 1,98 g

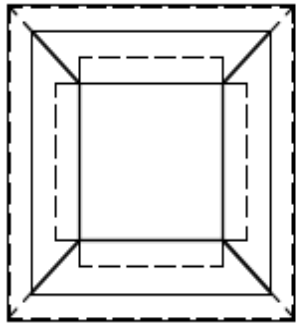
Tiempo (min)	Peso (g)	T_W entrada (°C)	T_W salida (°C)	T_S entrada (°C)	T_S salida (°C)	V_S (m/s)	H (kg/kg peso seco)	H media (kg/kg peso seco)	Velocidad media de secado (kg/hm^2)
0	26,48	28,0	28,0	44,4	42,2	5,42	12,369	11,993	0,14
5	24,99	28,8	28,8	45,2	43,2	5,48	11,617	11,276	0,12
10	23,64	27,2	27,2	44,5	43,8	5,36	10,935	10,657	0,10
15	22,54	28,6	28,6	45,7	41,1	4,75	10,380	10,072	0,11
20	21,32	27,1	27,1	46,4	43,6	4,66	9,764	9,403	0,13
25	19,89	27,8	27,8	45,5	41,3	4,75	9,042	8,918	0,04
30	19,40	28,2	28,2	44,6	43,6	4,70	8,794	8,466	0,12
35	18,10	28,2	28,2	44,3	42,5	4,98	8,138	8,067	0,03
40	17,82	28,9	28,9	45,5	43,7	5,58	7,997	7,747	0,09
45	16,83	27,2	27,2	46,1	41,3	4,42	7,497	7,353	0,05
50	16,26	28,2	28,2	46,2	41,4	4,89	7,209	7,060	0,05
55	15,67	28,9	28,9	45,6	43,5	5,73	6,911	6,719	0,07
60	14,91	28,2	28,2	46,5	41,9	5,81	6,528	6,391	0,05
65	14,37	27,6	27,6	44,4	41,3	4,09	6,255	6,030	0,08
70	13,48	27,4	27,4	46,2	41,0	5,06	5,806	5,700	0,04
75	13,06	27,7	27,7	46,9	42,3	5,77	5,594	5,553	0,01

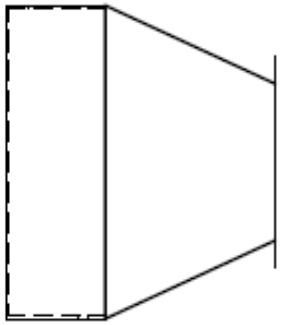
80	12,90	28,2	28,2	45,5	43,2	4,64	5,513	5,334	0,07
85	12,19	28,9	28,9	44,5	42,8	5,62	5,154	5,106	0,02
90	12,00	28,1	28,1	46,0	43,1	4,32	5,058	4,922	0,05
95	11,46	28,1	28,1	46,7	42,4	5,07	4,786	4,753	0,01
100	11,33	27,3	27,3	46,9	41,4	4,95	4,720	4,561	0,06
105	10,70	27,0	27,0	44,6	41,6	5,60	4,402	4,352	0,02
110	10,50	27,1	27,1	46,5	41,8	4,32	4,301	4,251	0,02
115	10,30	27,7	27,7	44,2	43,2	5,17	4,200	4,124	0,03
120	10,00	28,3	28,3	44,3	43,3	4,87	4,049	3,973	0,03
125	9,70	28,5	28,5	45,0	42,7	4,92	3,897	3,900	0,00
130	9,71	28,1	28,1	45,0	43,1	4,89	3,902	3,900	0,00
135	9,70	28,0	28,0	46,0	43,3	4,01	3,897	---	---

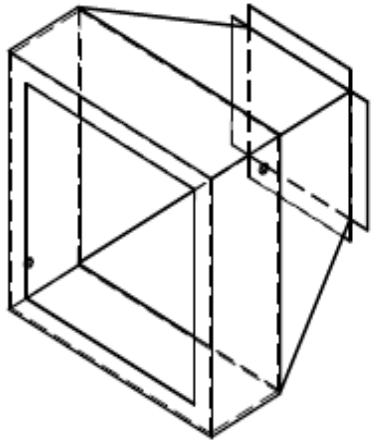
E. Planos del equipo



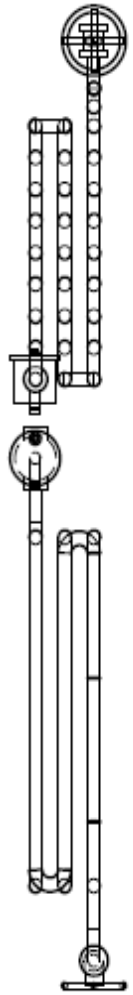


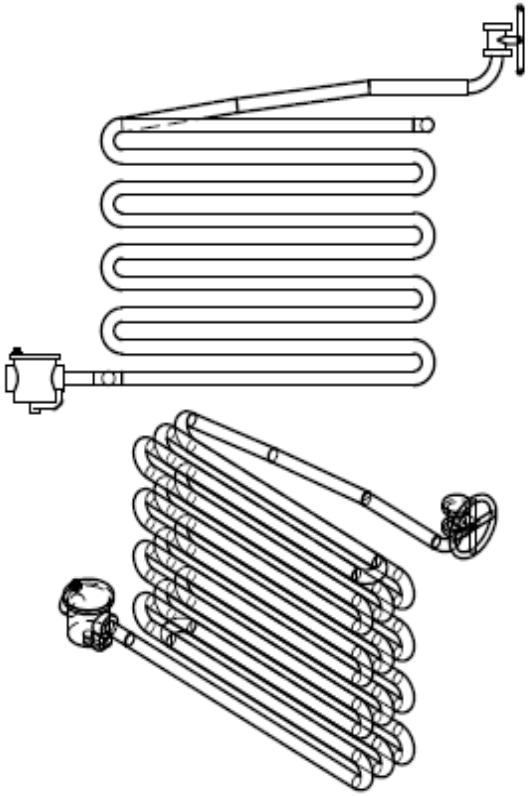






NOMBRE	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL	
FECHA	Febrero 8, del 2015	
ESCALA 1:1.2	CAMPANA TITULO	

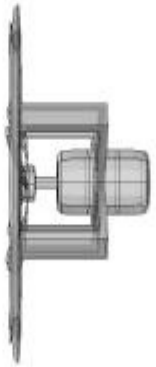


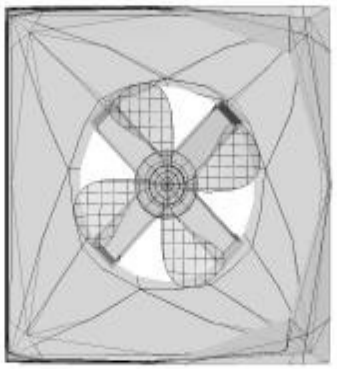


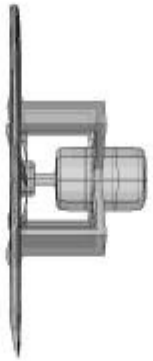
NOMBRE	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FECHA	Febrero 8, del 2015
ESCALA	1:1

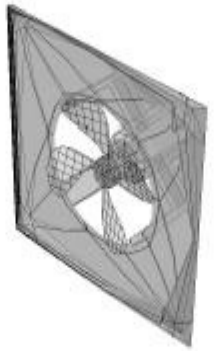
SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR

TITULO

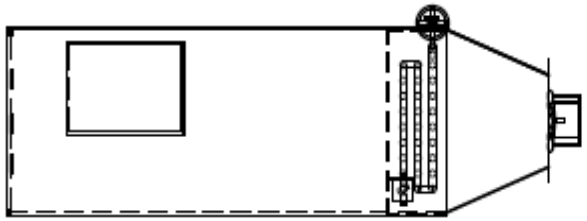


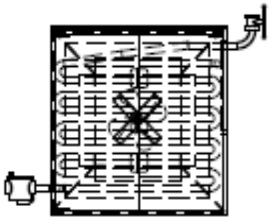


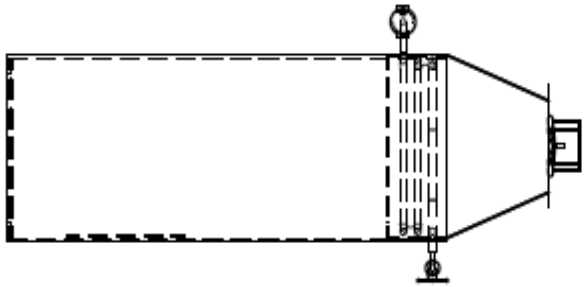


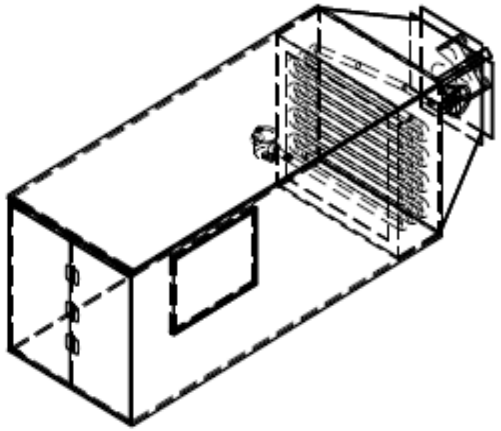


NOMBRE	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FECHA	Febrero 8, del 2015
ESCALA 3:1	VENTILADOR TITULO









NOMBRE	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FECHA	Febrero 8, del 2015
ESCALA 1:2	SECADOR COMPLETO TITULO

BIBLIOGRAFÍA

1. Foust, A., Leonard W., Curtis C., et.al. Principios de Operaciones Unitarias, McGraw Hill, 2da. Edición.
2. Geankoplis, C. Procesos de trasporte y operaciones unitarias. Compañía Editorial Continental. México, 1998. Págs. 284 – 296 y 585 – 599
3. Perry, J. Manual del ingeniero químico. Unión Tipográfica Editorial, México, 1980. 3ra. Edición. Págs. 1239 (Tomo I)
4. Hernández, J.; Quinto, P. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. Revista Científica, volumen 9. México, 2005. Pág. 63
5. Perry, J. Manual del ingeniero químico. Unión Tipográfica Editorial, México, 1980. 3ra. Edición. Págs. 1262 (Tomo I)
6. Treybal, E. Operaciones de transferencia de masa. McGraw Hill, 2da. Edición. Pág. 728
7. Ocon, J. y Tojo, G. Problemas de Ingeniería Química. Aguilar, Tomo II. Pág. 241
8. Cengel, Y. y Boles, M. Termodinámica, McGraw Hill, 6ta. Edición. Pág 733
9. McCabe, W., Smith, J., Harriot, P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. McGraw Hill, 7ma. Edición. Pág. 652
10. Badger, W. y Banchero, J. Introducción a la ingeniería química. McGraw Hill. Pág. 508

11. Foust, A., Leonard W., Curtis C., et.al. Principios de Operaciones Unitarias, McGraw Hill, 2da. Edición. Págs. 460 – 461
12. Cárdenas, J. y Fischer, G. Clasificación botánica y morfología de manzano, peral, duraznero y ciruelo. Facultad de Agronomía de Universidad Nacional de Colombia. Pág.2. Disponible en: http://www.researchgate.net/profile/Gerhard_Fischer/publication/256495323_Clasificacin_botnica_y_morfologa_de_manzano_peral_duraznero_y_ciruelo/links/0c9605231c18fdc273000000
13. La manzana: propiedades y características. Disponible en: http://www.alimentacion-sana.org/informaciones/novedades/manzana.htm. Última actualización: 24 de julio del 2014
14. Agricultura: el cultivo de la manzana. Disponible en: http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tradicionales/manzana.htm. Última actualización: 15 de marzo del 2013.
15. Cultivo del manzano, *Malus domestica*. Disponible en: http://articulos.infojardin.com/Frutales/fichas/manzanas-manzana-2.htm. Última actualización: 24 de julio del 2014
16. Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO). Disponible en: http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E
17. FLACSO, Ministerio de Industrias y Productividad. Boletín mensual de análisis sectorial MIPYMES, Nº 19. Noviembre 2011.

18. Navarro, M. Potencial de los aceites esenciales de toronjil (*Melissa officinalis*), orégano (*Origanum vulgare L*) y bleo (*Presekia bleo*) para ser utilizados como saborizantes en aceites comestibles de mesa. Universidad de Cartagena, 2012. Págs. 22 – 23
19. Vargas, V. Elaboración de té aromático a base de cedrón (*Aloysiacitrodora*) y toronjil (*Melissa officinalis*) procesado con stevia (*Steviarebaudiana bertoni*) endulzante natural, utilizando el método de deshidratación. Universidad Técnica de Cotopaxi. Págs. 48 – 49.
20. Melissa officinalis. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Melissa _officinalis. Última actualización: 25 de noviembre del 2014
21. Sánchez, C. y Lucero, J. Innovación tecnológica de sistemas de producción y comercialización de especies aromáticas y cultivos élite en agricultura orgánica protegida con energías alternativas de bajo costo. SAGARPA, CONACYT. Págs. 15 – 20
22. García, H. Efecto de la radiación UV-C sobre la capacidad oxidante de hojas frescas de toronjil (*Melissa officinalis*) y perejil (*Pretoselinum sativum*) de la zona andina de Cotacachi. Universidad Tecnológica Equinoccial. Pág. 36
23. Proyecto de apoyo técnico al proceso de negociación del Tratado de Libre Comercio (TLC) Ecuador – EE.UU. para el sector agropecuario. Págs. 14 – 17

24. Sánchez, E., León, M. et. al. Caracterización farmacognóstica de *Melissa officinalis L.* (toronjil). Revista Cubana de plantas medicinales, ISSN 1028-4796. Versión en línea: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1028-47962010000400003&script=sci_arttext
25. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Ecuador. Anuario meteorológico 2010, Nº 50. Pág. 110
26. Kern, D. Procesos de transferencia de calor. Editorial continental. Págs. 200 – 201 y 231 – 234, Anexos.
27. Punto de ignición. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Punto_de_ignici%C3%B3n
28. Precios de equipos de secado, disponible en http://www.quiminet.com/productos/secadores-industriales-2512082309/precios.htm