

PLANTEAMIENTO METODOLOGICO PARA EL DIAGNOSTICO DE LA PLANTA  
DE SECADO BAJO LAS CONDICIONES DE DISEÑO ESTABLECIDAS POR EL  
FABRICANTE

JOHN ANTONNY PABÓN BELTRÁN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, DC  
2019

PLANTEAMIENTO METODOLOGICO PARA EL DIAGNOSTICO DE LA PLANTA  
DE SECADO BAJO LAS CONDICIONES DE DISEÑO ESTABLECIDAS POR EL  
FABRICANTE

JOHN ANTONNY PABÓN BELTRÁN

Proyecto Integral de Grado Para Optar el Título de:  
INGENIERO QUÍMICO

Director.

FELIPE CORREA MAHECHA

Ingeniero químico.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, DC  
2019

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Felipe Correa Mahecha  
Presidente del Jurado.

---

Jaime Eduardo Arturo Calvache  
Jurado 1.

---

David Triviño Rodríguez  
Jurado 2.

Bogotá D.C. Febrero de 2019

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrado

**Ing. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Decano de la facultad de ingenierías

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director General de Investigación y Proyecto Social

**Dr. MANUEL CANCELADO JIMENÉZ**

Director Programa Ingeniería Química

**Ing. LEONARDO DE JESUS HERRERA GUTIERREZ**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

A mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto. Especialmente deseo agradecer a mis padres ya que gracias a sus extraordinarios esfuerzos me es posible alcanzar esta meta. No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a su apoyo lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos.

John Antony Pabón Beltrán

## CONTENIDO

	pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>14</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>17</b>
<b>1.1 SECADO</b>	<b>17</b>
<b>1.2 EQUIPOS DE SECADO</b>	<b>18</b>
1.2.1 Según el método de transferencia de calor.	19
1.2.1.1 Equipos de secado directos continuos.	19
1.2.1.2 Equipos de secado directos discontinuos.	20
1.2.1.3 Equipos de secado indirectos continuos.	21
1.2.1.4 Equipos de secado indirectos discontinuos.	21
1.2.1.5 Equipos de secado diversos.	22
<b>1.3 CARTA PSICOMÉTRICA</b>	<b>23</b>
1.3.1 Propiedades del aire.	25
<b>1.4 CURVAS DE SECADO</b>	<b>26</b>
1.4.1 Curvas de velocidad de secado.	30
<b>2. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA DE SECADO</b>	<b>32</b>
<b>2.2 EQUIPOS PERIFÉRICOS</b>	<b>33</b>
2.1.1 Sistema de ventilación.	33
2.1.2 Sistema de adecuación de humedad.	35
2.1.3 Sistema de calentamiento.	36
2.1.4 Tablero de control.	36
<b>3. MODELAMIENTO DE LA PLANTA DE SECADO</b>	<b>39</b>
<b>3.1 CÁLCULO DEL PERIODO DE SECADO DE VELOCIDAD CONSTANTE.</b>	<b>40</b>
3.1.1 Efecto de las variables.	47
<b>3.2 SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN</b>	<b>49</b>
<b>3.3 SIMULACIÓN</b>	<b>50</b>
3.3.1 Validación de la simulación.	55
3.3.2 Análisis de resultados.	55
<b>4. GUÍA PLANTA PILOTO PLANTA DE SECADO</b>	<b>58</b>
<b>4.1 GUÍA INTRODUCTORIA AL MANEJO DE LA PLANTA DE SECADO</b>	<b>58</b>
4.1.1 Normas de seguridad.	58
4.1.2 Recomendaciones de seguridad.	61

<b>4.2 GUÍAS EXPERIMENTALES PLANTA DE SECADO</b>	<b>62</b>
4.2.1 Selección del material a secador durante las prácticas	62
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>65</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFIA ANEXOS</b>	<b>67</b>
	<b>70</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores experimentales de un proceso de secado.	27
Tabla 2. Valores de entrada a la simulación.	55
Tabla 3 Resultados de la humedad en base seca.	56
Tabla 4. Resultados de la humedad libre.	57
Tabla 5 Identificación del color de tubería norma NTC 3458.	59
Tabla 6. Significado de los colores de seguridad.	59
Tabla 7. Forma geométrica y significado de las señales.	60
Tabla 8. Señales advertencia.	60

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Cálculo de la eficiencia de un ventilador.	34
Ecuación 2. Potencia suministrada al aire.	35
Ecuación 3. Potencia volumétrica de una bomba.	36
Ecuación 4. Ecuación de Fick.	40
Ecuación 5. Ecuación de Page.	40
Ecuación 6. Curva de velocidad de secado.	41
Ecuación 7. Tiempo de secado en la etapa de velocidad constante.	41
Ecuación 8. Velocidad de transferencia convectiva de calor.	42
Ecuación 9. Transferencia de masa de la superficie del solido al aire.	42
Ecuación 10. Aproximación de la fracción molar.	43
Ecuación 11. Aproximación de la ecuación de transferencia de masa.	43
Ecuación 12. Calor requerido para evaporar el agua.	43
Ecuación 13. Velocidad de secado a partir de las ecuaciones de transferencia de calor.	44
Ecuación 14 Velocidad de secado a partir de las ecuaciones de transferencia de masa.	44
Ecuación 15. Cálculo del coeficiente h para flujos de aire paralelos a la superficie de secado.	45
Ecuación 16. Cálculo del coeficiente h para flujos de aire perpendiculares a la superficie de secado.	45
Ecuación 17. Transferencia de calor por conducción y convección	45
Ecuación 18. Calor por conducción.	46
Ecuación 19. Coeficiente de transferencia de calor por conducción.	46
Ecuación 20. Velocidad de secado Conducción y convección.	46
Ecuación 21. Simplificación de la ecuación de velocidad de secado.	47
Ecuación 22. Cálculo del valor absoluto del error	56

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Carta psicométrica a las condiciones de Bogotá D.C.	24
Figura 2. Propiedades de la carta psicométrica.	25
Figura 3. Curva de velocidad de secado.	31
Figura 4. Diseño de la planta de secado.	32
Figura 5. Tablero de control.	37
Figura 6. Interfaz de la simulación.	51
Figura 7. Programación de la carta psicométrica.	53
Figura 8. Señales de obligación.	61

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Grafica 1. Curva de secado en base seca.	28
Grafica 2. Curva de secado etapa de velocidad constante.	29
Grafica 3. Curva de secado etapas de velocidad decreciente.	30

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Tabla de compatibilidad química (fabricantes).	71
Anexo B. Tabla de compatibilidad química extendida.	77
Anexo C. Lista de chequeo	96
Anexo D. Guía práctica 1.	98
Anexo E. Guía práctica 2.	106

## RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se realizó el planteamiento metodológico para el diagnóstico del equipo de secado de la planta piloto adquirida por la Fundación Universidad de América.

En este se exponen las principales diferencias entre los procesos de secado y evaporación, además de identificar algunos de los equipos empleados a nivel industrial, señalando las principales características de estos y las diferentes maneras de clasificarlos.

Por otra parte, se manifiesta la importancia del uso de la carta psicométrica y la relación entre las propiedades del aire con los procesos de secado junto con la importancia de las curvas de secado.

Se realizó la identificación de las características del equipo basándose en la información que fue adquirida directamente del fabricante, con la cual posteriormente se desarrollaron formatos para facilitar la caracterización del equipo.

Se expuso un modelo matemático basado en los fenómenos de transferencia con el cual se busca predecir el comportamiento del equipo, por lo cual se programó una simulación de este en Excel la cual fue validada con la ayuda de un artículo científico.

Finalmente se realizaron 2 guías prácticas en donde se estudia el efecto de la dirección del aire en los procesos de secado y la segunda guía analiza el efecto de la variación de la temperatura y la velocidad del aire en el proceso.

Palabras clave: Secado, Secado industrial, Simulación, Caracterización de equipos, Procesos industriales, Equipos industriales.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación comprende el planteamiento metodológico para el diagnóstico de la planta de secado bajo las condiciones de diseño establecidas por el fabricante, cuyo equipo principal es un secador de bandejas discontinuo o por lotes a escala piloto, el cual fue adquirido por la Fundación Universidad de América en el presente año.

La importancia de realizar la investigación radica en la diversificación que se le puede dar al equipo adquirido, con el fin de explotar su máximo potencial proporcionando a los educandos herramientas que le permitan realizar una aproximación real al manejo industrial de este tipo de equipos.

Siendo Colombia un país que está saliendo de un conflicto armado de más de 50 años, se hace necesario mejorar el desarrollo industrial el cual apalanca un sector tan importante como lo es el agropecuario. Es donde el secado cobra importancia a nivel industrial ya que se estima que el consumo de frutos deshidratados para el año 2020 será de 4 millones de toneladas, según Alfonso Velásquez presidente ejecutivo de Sierra y Selva Exportadora. La empresa Terrafertil optó por deshidratar Uchuvas lo que le permitió volverse líder a nivel mundial en exportación de esta fruta encargándose del 95% de la exportación de esta en Colombia, generando más de 400 empleos a agricultores independientes donde han afirmado que aproximadamente un 50% de estos venden la totalidad de su cosecha a esta empresa.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Tiempo, C. (2018). Uchuvas secas que llegan a 4 continentes desde Colombia. [Online] Portafolio.co. Available at: <http://www.portafolio.co/negocios/uchuvas-secas-que-llegan-a-4-continentes-desde-colombia-511593> [Accessed 16 Apr. 2018]

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL.**

- Plantear la metodología para el diagnóstico del equipo de secado de la planta piloto de la Fundación Universidad de América a partir de la información suministrada por el fabricante.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Establecer los procedimientos para la Caracterización operacional del equipo de secado de la planta piloto a partir de la información suministrada por el fabricante.
- Desarrollar un modelo matemático para simular el funcionamiento del equipo de secado de la planta piloto.
- Elaborar una guía de prácticas para el uso del equipo de secado en la planta piloto, con el fin de impartir docencia.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 SECADO

Generalmente el secado hace referencia a la remoción de cantidades relativamente pequeñas de agua de un material, de lo contrario podría denominarse cómo evaporación o destilación. En el secado normalmente el agua es eliminada en forma de vapor con aire. Este proceso es llevado a cabo industrialmente con el fin de reducir la humedad del producto final, humedad que puede variar dependiendo del material, el proceso al que se someta y el uso final al cual vaya a ser destinado, esta operación suele ser la etapa final de los procesos debido a que permite que el material tratado sea manipulado con mayor facilidad además de disminuir los costos de transporte.<sup>2</sup>

Por otra parte, en cuanto al proceso de secado, es un procedimiento durante el cual los compuestos que se desean extraer del producto final pasan de una fase a otra, lo que se complica por la necesidad de realizar una transferencia de calor y de masa de manera simultánea, los equipos de secado pueden realizar esta transferencia de calor mediante distintos modos como lo son, la convección, conducción, radiación y por medio del calentamiento dieléctrico. De manera simultánea se produce la transferencia de masa la cual se encarga de retirar la humedad de la superficie del sólido y el movimiento de la humedad interna a la superficie.<sup>3</sup>

Durante el proceso de secado el agua removida de los productos suele variar, desde un pequeño rastro hasta una cantidad significativa como en el caso de las frutas, cuando la cantidad de agua removida es considerable existe la tendencia de que la estructura sufra una reducción de volumen, además debido al fenómeno de transferencia de masa por el cual el agua es retirada del producto también ve reducido su peso final, es por estos factores que luego de realizar un proceso de secado se reduce el costo de transporte del producto.<sup>4</sup> Como sucede en el caso de las hojas que se someten al proceso de secado que además de ser el método más antiguo de conservación de estas pueden llegar a perder hasta un 85% de su peso al secar se lo que es considerado una reducción bastante significativa.<sup>5</sup> Por otro lado cuando se habla de productos biológicos, como lo es, en el caso de las frutas, estas ven prolongada su vida útil luego del proceso de secado debido a la reducción

---

<sup>2</sup> Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

<sup>3</sup> Bahadori, & Alireza. (2016). Chapter 10 - solids handling systems and dryers. Essentials of oil and gas utilities (pp. 423-488) Elsevier Inc.10.1016/B978-0-12-803088-2.00010-9

<sup>4</sup> Cheremisinoff, Nicholas P. (2000). Handbook of Chemical Processing Equipment. (pp. 124-161). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHCPE0003/handbook-chemical-processing/handbook-chemical-processing>

<sup>5</sup> A.K babu 2018 review of leaf drying mechanism and influencing parameters, drying method, nutrient preservation, and mathematical models

de la actividad del agua donde el crecimiento microbiano y las reacciones enzimáticas se reducen al mínimo.<sup>6</sup>

Los procesos de secado deben ser controlados cuidadosamente ya que si estos no lo son la contracción que suelen sufrir los productos no será uniforme lo que puede ocasionar un deterioro del producto final, como ejemplo cuando el papel que se seca bajo tensión y se evita la contracción lateral su estructura se debilita en comparación a cuando este es secado en un desván de manera lenta y controlada. Dependiendo del producto que se someta a este proceso las condiciones a las que este se lleva a cabo varían como lo es en el caso de la leche o frutas las cuales deben secarse rápidamente a la temperatura más baja posible para que estos conserven su sabor, olor y otras características valiosas.<sup>4</sup> Es por la gran cantidad de requerimientos de los distintos materiales sometidos a este proceso que se han diseñado diferentes equipos de secado los cuales puedan brindar las condiciones apropiadas que cada producto requiere.

## 1.2 EQUIPOS DE SECADO

Como se mencionó anteriormente existe una gran variedad de productos que se someten al proceso de secado, sin embargo, los distintos productos requieren diferentes condiciones para llevar a cabo este proceso y obtener un producto final con las características deseadas es por esto que se han diseñado diferentes equipos que cumplen esta función. Dada la gran cantidad de equipos creados con este fin se generan distintas clasificaciones las cuales tienen como finalidad facilitar la identificación los equipos. Los equipos de secado pueden clasificarse de diferentes maneras, las formas más empleadas en su clasificación a grandes rasgos se dividen según el método de transferencia de calor y según la naturaleza de la alimentación.

El proceso de secado es considerado como una operación principal o podría considerarse un proceso unitario. Dependiendo de los productos que se deseen someter a este proceso, sus características físicas, su humedad y valor puede variar el hardware empleado. Debido a que dependiendo del tipo de material estos pueden ser tratados directamente con gases de fuego sin daños o por el contrario algunos deberán ser secados con aire caliente. Debido a la gran cantidad de materiales y a la diversidad de sus propiedades tanto físicas como químicas se han diseñado diferentes equipos que cumplan con este fin a continuación se identificaran algunos de estos equipos.<sup>4</sup>

---

<sup>6</sup> Edgar Mauricio Vargas Solano, & Fredy Alexander Garzón Rodríguez. (2010b). Designing, assembly and start up for a semiautomatic hot-air tray dryer. *Ingeniería E Investigación*, 30(2), 43-51. Retrieved from <https://doaj.org/article/cd2a0fad83c24770a2a97ed0d40f2376>

1.2.1 Según el método de transferencia de calor. La clasificación de los equipos de secado industrial basada en el método de transferencia de calor los divide en tres grandes grupos, los directos en los cuales el calor necesario para que inicie la transferencia de masa del agua del material que se desea secar al aire es proporcionado por el aire el cual entra en contacto directo con el material en cuestión, también se les conoce a estos equipos como secadores convectivos.

En los secadores indirectos el calor se transfiere de una fuente térmica a través de una placa metálica generalmente la cual entra en contacto con el material a secar.<sup>7</sup> Finalmente se encuentra el grupo de secadores diversos,<sup>8</sup> aunque distintos autores dividen este grupo en equipos de radiación y calentamiento dieléctrico.<sup>9</sup> En donde para el primer caso el calentamiento se da por cualquier fuente de radiación como lo puede ser el sol mientras que en el segundo caso el calentamiento se da por medio de radio frecuencias o microondas.

1.2.1.1 Equipos de secado directos continuos. Los equipos de secado continuos son aquellos en los que existe un suministro constante en la corriente de alimentación, así como en la corriente de salida del producto final a continuación se muestran algunos equipos los cuales hacen parte de esta rama dentro de la clasificación junto con algunas de sus principales características y/o usos.

Los equipos de secado continuos generalmente son operados en condiciones de estado estacionario, suelen ser procesos de secado más económicos en comparación con los equipos de secado por lotes o discontinuos<sup>10</sup> en los equipos de secado continuos generalmente el material atraviesa el equipo y para cuando este sale ya ha completado su proceso de secado.

Secadores de pulverización o aspersion. Este tipo de equipos consisten en una cámara cerrada en donde se atomizada una suspensión la cual tiene disuelto el sólido que se desea secar, dentro de esta cámara cerrada cruza una corriente de aire caliente la cual puede alcanzar hasta los 300°F la cual seca la suspensión atomizada, al llegar al fondo del secador esta ya se encuentra completamente seca y en forma de un polvo fino, el tiempo aproximado que duran las gotas de suspensión en secarse y caer es de aproximadamente 15 a 30 segundos según las condiciones. Los secadores flash emplean el mismo principio que los secadores por aspersion, pero a diferencia de estos la temperatura del aire de secado es cercana a los 1200°F y el tiempo de secado es cercano a los 4 segundos donde el aire disminuye su temperatura a 350°F mientras que el material solido no eleva su temperatura a mas de 100°F.<sup>4</sup>

---

<sup>7</sup> OCON; TOJO. "Problemas de Ingeniería Química". Capítulo 9. Aguilar. Madrid. 1974.

<sup>8</sup> Área de tecnología. Secadores. Falcón: Universidad Nacional Experimental Francisco De Miranda.

<sup>9</sup> Sloan, C.E., Drying systems and equipment, Chem. Eng., 19, 1967, 167.

<sup>10</sup> TREYBAL Robert. Operaciones de transferencia de masa. McGraw-Hill. Estados Unidos. Segunda edición. 1988.

Secadores rotatorios. Este tipo de equipos constan esencialmente de un cilindro ligeramente inclinado a la horizontal el cual puede ser rotatorio o puede tener un agitador interno el cual moverá el material que se desea secar, generalmente este tipo de equipos tienen dimensiones cercanas a 9 pies de diámetro por 45 pies de largo lo que los hace relativamente grandes en comparación a los secadores de pulverización o aspersión, la temperatura de este tipo de equipos se regula de tal manera que el material a secar complete su proceso justo antes del punto de descarga, el material a secar es suministrado por el extremo superior mientras el calor necesario para llevar a cabo el proceso es suministrado directamente por aire o gases calientes.<sup>4</sup>

Secadores de cinta, de bandejas continuas o túnel. Este equipo de secado consiste en una serie de compartimientos de bandejas, los sólidos se depositan en las bandejas las cuales durante su recorrido atraviesan una cámara en la cual circulan gases calientes.<sup>2</sup> Estos compartimientos usualmente se encuentran sobre una cinta transportadora o dos cadenas sin fin en forma de cinturón y así formados se desplazan, es proceso puede tardar varios minutos y a la salida de la cámara en donde circulan los gases calientes normalmente un operario descarga el contenido de las bandejas que completaron el recorrido y deposita nuevo material, el proceso se realiza de manera lenta de modo que se necesite la menor cantidad posible de mano de obra.<sup>4</sup>

Secadores instantáneos o neumáticos. Los secadores neumáticos siguen el mismo principio que los secadores de lecho fluidizado en donde la corriente de aire golpea tangencialmente a las partículas sólidas por lo que su funcionamiento es similar, la principal diferencia entre estos equipos de secado es que los secadores neumáticos aumentan la velocidad del aire hasta la velocidad terminal de las partículas sólidas individuales, lo que produce que estas viajen en el mismo sentido que la corriente de aire una vez se encuentran con ella, el tiempo de secado en estos equipos es de tan solo unos segundos por lo que este proceso de secado se ve limitado a casos en los que solo se tiene humedad superficial.

1.2.1.2 Equipos de secado directos discontinuos. En los equipos de secado discontinuos, por lotes o batch es en los cuales entra una cantidad determinada de material entra al equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo.<sup>2</sup> En este tipo de equipos se opera de forma intermitente en condiciones de estado no estacionario, el material depositado en el equipo permanece en este hasta que completa su proceso de secado luego se descarga luego de completar su proceso y el equipo es vuelto a cargar con nuevo material para repetir el proceso.<sup>10</sup>

Secadores de bandejas, camiones y túneles. En este tipo de equipos el material a secar, se esparce sobre bandejas las cuales son apiladas en unas rejillas las que permiten ordenar las con un espacio óptimo que permita la circulación del aire, el cual es el encargado de suministrar el calor necesario para llevar a cabo el proceso

de secado y retirar la humedad del producto, este aire comúnmente se calienta con la ayuda de un radiador o pasando sobre tubos con aletas.<sup>4</sup>

Secadores de lecho fluidizado. Este tipo de secadores se emplea en materiales sólidos granulares los cuales tengan un tamaño de 0.1 a 36 mm, la principal característica de este tipo de equipos es el flujo tangencial entre el sólido que se desea secar y la corriente de aire caliente, por otra parte, en este tipo de equipos tienen la ventaja de poder controlar fácilmente diferentes variables como lo son el tiempo de reincidencia del sólido desde segundos a horas además de poder emplear diferentes temperaturas del gas.<sup>10</sup>

Liofilización. Este proceso de secado se clasifica entre los métodos directos discontinuos debido a que el material a secar generalmente se congela exponiéndolo a aire a bajas temperaturas, la humedad es retirada como vapor por sublimación, este es uno de los procesos de secado más costosos debido a que se hace necesario emplear vacío y a su lenta velocidad de secado. Por otra parte, genera los productos de mayor calidad debido a que las bajas temperaturas evitan las reacciones de degradación que normalmente ocurren en los procesos de secado convencionales.<sup>2</sup>

1.2.1.3 Equipos de secado indirectos continuos. Secadores de tambor. En este tipo de equipos suelen secar se fluidos con sólidos disueltos o en suspensión, estos fluidos se vierten sobre la superficie interna del tambor la cual se calienta y gira proporcionando el calor necesario para retirar el agua, el tambor suele rotar lentamente de modo que luego de siete octavos de revolución ya es posible retirar un depósito seco, el que generalmente se retira por medio de un cuchillo flexible el cual rueda hacia un contenedor o un transportador de tornillo. Además, tiene distintas distribuciones en donde se puede emplear doble tambor con alimentación central o por salpicadura.<sup>4</sup>

1.2.1.4 Equipos de secado indirectos discontinuos. Secador de anaqueles al vacío. Los secadores de anaqueles al vacío son similares a los equipos de secado de bandejas, sin embargo los gabinetes de este se encuentran contruidos de hierro colado o acero, además que estos poseen puertas herméticas lo que les permite operar a presiones inferiores a la atmosférica.<sup>10</sup> En este tipo de secadores el calor necesario para separar el agua de los sólidos es transferido por medio de los anaqueles y los platos que contienen los sólidos, el calor es suministrado por medio de agua tibia o vapor el cual circula por los anaqueles huecos.<sup>2</sup>

Secadores giratorios de vacío. Este secador es empleado normalmente para secar lodos o pastas de gran valor, los equipos de secado son costosos de producir y de operar por lo que solo se emplean cuando se requieren secar materiales valiosos que no se pueden exponer a temperaturas más elevadas, este secador consta de cubiertas cilíndricas con chaqueta de vapor la cual suministra el calor necesario

para la evaporación del agua, el lodo es agitado por hojas mientras la humedad retirada pasa por un condensador, la humedad que no es posible condensar es retirada con la ayuda de una bomba de vacío.<sup>10</sup>

1.2.1.5 Equipos de secado diversos. El calentamiento dieléctrico es el proceso por el cual mediante ondas de radio, microondas o radiación electromagnética se calienta un material dieléctrico, la ventaja de este tipo de calentamiento es que este se produce directamente dentro del material expuesto por lo que su calentamiento es más uniforme y generalmente consume menos energía.

En el calentamiento por radiofrecuencia, la frecuencia aplicada se encuentra entre  $1,3 \times 10^7$  y  $2,45 \times 10^9$  Hz (Hertz), mientras que en el calentamiento con microondas la frecuencia esta entre  $9,15 \times 10^8$  y  $2,45 \times 10^9$  Hz<sup>13</sup> la frecuencia empleada por estos equipos es menor incluso a la frecuencia del espectro visible, la frecuencia de las ondas del espectro visible se encuentra entre  $3,84 \times 10^{14}$  y  $7,89 \times 10^{14}$  Hz, sin embargo también se logra identificar que los rangos de frecuencia empleados son más amplios que el rango del espectro visible.

Uno de los mejores ejemplos de secadores pertenecientes al grupo de secadores diversos es el secador solar, en donde el material es dispuesto sobre bandejas generalmente de acero inoxidable y expuesto directamente a radiación solar, la que proporcionara el calor necesario<sup>11</sup> para realizar el proceso, una de las principales desventajas de este proceso es la dependencia de las condiciones climáticas ya que en un día nublado se reduce la radiación incidente sobre el material<sup>12</sup> además de estos existen algunos túneles de secado en donde el calentamiento es acelerado con la ayuda de lámparas de luz infrarroja.

Por otra parte los secadores de infrarrojos se han vuelto populares en los últimos años aunque el primer artículo publicado acerca de este tipo de equipos fue publicado en 1952<sup>13</sup>, en las últimas décadas se ha visto un incremento en los estudios realizados en este tipo de equipos, debido a que la transferencia de calor por radiación infrarroja proporciona algunas ventajas significativas con respecto a los procesos de secado comunes, como lo son: mejor tiempo de secado, ahorro de energía, alta calidad del producto entre otras<sup>14</sup>, aparte de esto en estos equipos realizado diferentes investigaciones, algunas enfocadas en los modelos

---

<sup>11</sup> Hernández Elva, Espectro visible (2013). Universidad nacional de México.

<sup>12</sup> Suárez Hernández, L., Barrera Zapata, R., & Forero Sandoval, A. F. (2016). Evaluación de alternativas de secado en el proceso de elaboración de harina de lombriz. *Corpoica Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 17(1), 55. 461

<sup>13</sup> Broughton G., Gilman L. I. (1952). A flexible laboratory infrared heater-dryer

<sup>14</sup> Yayaganbaba A. (2016). A scientific approach with bibliometric analysis related to brick and tile drying A review

matemáticos que permiten un control avanzado del proceso<sup>15</sup> hasta estudios que se enfocan en la simulación del proceso con este tipo de equipos<sup>16</sup>.

1.2.2 Según la naturaleza de la alimentación. En este tipo de clasificación se tiene en cuenta principalmente las características de los materiales que se alimentan al proceso de secado, a partir de estas se identifican los diferentes equipos de secado capaces de llevar a cabo este proceso. La principal característica que se tienen en cuenta en este tipo de clasificación es el tamaño del sólido que se somete a este proceso, es por esto que este tipo de clasificación se encuentra subdividida en los siguientes grupos: Polvos húmedos fluyentes, sólidos granulares, sólidos fibrosos, soluciones coloidales, pastas que pueden ser bombeadas, pastas y sedimentos.

Es recomendable emplear este tipo de clasificación como criterio de selección cuando ya se conoce las características del sólido se desea someter al proceso, ya que algunos equipos de secado gracias a su diseño pueden encontrar sé en dos o más sub divisiones de esta clasificación, además es necesario comprobar que las características de un equipo específico si concuerden con las sub divisiones en las que este se encuentre.

Por ejemplo, los secadores de bandejas se encuentran ubicados en subdivisiones tales como polvos húmedos fluyentes y sólidos granulares entre otras, sin embargo, el secador adquirido por la Fundación universidad américa cuenta con bandejas fabricadas en malla de acero inoxidable con una apertura de 5.5 mm por lo que en este caso particular se debería excluir este equipo de algunas de las subdivisiones en las que se encuentra.

### 1.3 CARTA PSICOMÉTRICA

Las propiedades del aire con el cual se lleva a cabo el proceso de secado afecta de manera directa y en gran medida el resultado final del proceso, es por este motivo que es necesario contar con un medio con el cual se logre determinar y calcular sus propiedades, es aquí donde cobra importancia el manejo del diagrama psicométrico o carta psicométrica la cual analiza los valores de las propiedades del aire en conjunto, el diagrama psicométrico permite identificar propiedades del aire tales como la humedad relativa, la temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, entre otras. Sin embargo, este diagrama varía de acuerdo a la presión del lugar donde se deseen medir las propiedades de este.

Durante la ejecución de este proyecto de investigación es necesario contar con una carta psicométrica que se ajuste a las condiciones ambientales, en este caso para las condiciones de Bogotá D.C. en donde será instalada la planta de secado

---

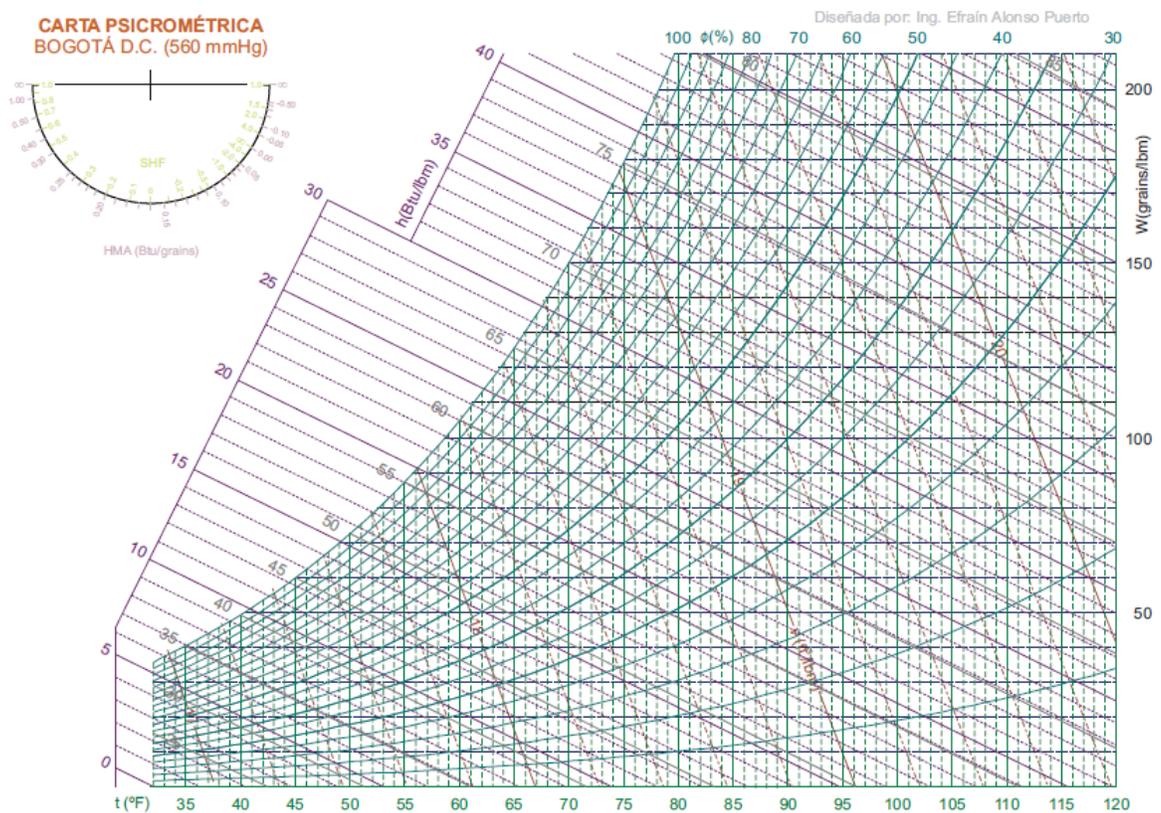
<sup>15</sup> Dhib R. (2007) Infrared Drying: From Process Modeling to Advanced Process Control

<sup>16</sup> Rajan R. (2002). Simulation of infrared drying process (pp 10-34)

adquirida por la Universidad América. Por lo cual se empleará la carta psicrométrica diseñada por Efraín Alonso la cual se encuentra diseñada a las condiciones ambientales de Bogotá D.C. (560 mmHg)

En la carta psicrométrica tal como se muestra en la figura 1 se pueden identificar distintas propiedades del aire, en las ordenadas y abscisas se representan respectivamente la humedad absoluta y la temperatura, aunque no se logre apreciar claramente en la figura 1 el programa permite realizar acercamientos para señalar los puntos dentro del diagrama con gran precisión y una vez señalado un punto en el diagrama su interfaz presenta los valores de todas las propiedades del aire en el punto señalado.

Figura 1. Carta psicrométrica a las condiciones de Bogotá D.C.



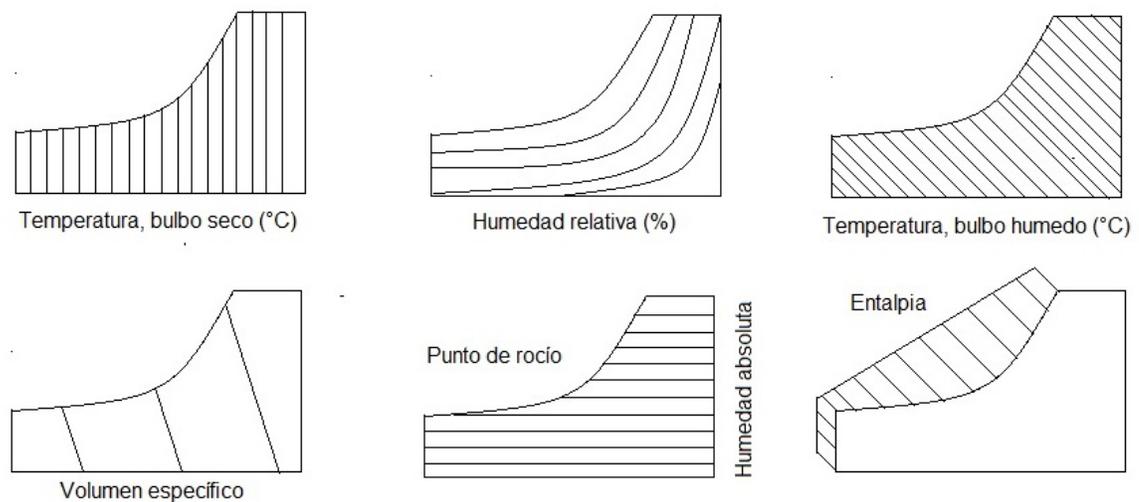
Fuente. Alonso Efraín Carta psicrométrica a las condiciones de Bogotá D.C. [En línea] recuperado de: <https://efrainpuerto.files.wordpress.com/2011/12/bogotc3a1-psychrometric-chart.pdf>

La carta psicrométrica busca mostrar la relación entre muchas de las propiedades del aire, con la carta psicrométrica es posible saber todas las siguientes propiedades si al menos se conocen dos de estas; temperatura de bulbo seco, temperatura de

bulbo húmedo, humedad relativa, humedad específica, punto de rocío, entalpia y el volumen específico.<sup>17</sup>

En la siguiente imagen se representan las líneas que poseen los diagramas psicométricos, además se indica que propiedad puede ser identificada por medio de estas, en el caso de la humedad absoluta y el punto de rocío que se encuentran representadas por el mismo tipo de línea cabe aclarar que la humedad absoluta se identifica en la escala que poseen las cartas psicométricas en el lado derecho, mientras que el punto de rocío se observa en una escala que se encuentra sobre la curva al lado izquierdo.

Figura 2. Propiedades de la carta psicométrica.



Fuente. Creación propia basada en el libro Geankoplis.

1.3.1 Propiedades del aire. Con el fin de entender mejor la carta psicométrica es necesario conocer que representan las propiedades que se encuentran en esta ya ofrece la oportunidad de conocer sus respectivos valores con el fin de analizar los.

Temperatura de bulbo seco. Es la temperatura que se obtiene de la medición de un termómetro en condiciones normales, esta propiedad se encuentra reflejada en la carta psicométrica en las líneas verticales, con origen en el eje horizontal.<sup>17</sup>

Temperatura de bulbo húmedo. Esta temperatura se obtiene de la medición de un termómetro el cual se encuentra envuelto en su bulbo o sensor por un trapo húmedo, esta temperatura sirve como indicador de que tan seco se encuentra el aire, ya que entre más seco se encuentre este una mayor cantidad de agua pasará del trapo a la fase del aire lo que disminuirá la lectura del termómetro.<sup>2</sup>

<sup>17</sup> Carl E. Berg. (1997). Volviendo a lo básico: psicometría y la carta psicométrica

Humedad relativa. Es la relación entre la cantidad de agua presente en una muestra determinada de aire con respecto a la máxima cantidad de agua que puede contener la misma cantidad de aire, por lo que la humedad relativa será de 100% si la muestra contiene su máxima capacidad de agua, lo que indica que la muestra de aire se encuentra saturada de agua, por el contrario, si la muestra de aire no contiene agua su humedad relativa será de 0% e indica que el aire se encuentra seco.<sup>17</sup>

Humedad específica. A diferencia de la humedad relativa esta no se da en términos de porcentaje, el valor de la humedad específica indica la cantidad en peso de vapor de agua contenido en una libra (o gramos o kilogramos) de aire seco.<sup>17</sup>

Entalpía. Normalmente esta propiedad describe el calor total de una sustancia y se da en unidades de BTU/Lb, en el caso de la carta psicrométrica se muestra la entalpía de la mezcla aire-vapor y normalmente se muestra en unidades de BTU/Lb de aire seco.<sup>17</sup>

Volumen específico. Es el inverso de la densidad este “se mide en pies cúbicos de mezcla agua-vapor por libras de aire seco”<sup>17</sup>. Dentro del diagrama psicrométrico se puede hallar el volumen específico con la ayuda de las líneas diagonales inclinadas a la izquierda.

El término calor húmedo (s): es la cantidad de energía (Btu) necesaria para elevar la temperatura de 1 lb de aire seco más el vapor de agua que contiene en 1 °F.

El calor húmedo aumenta al aumentar el contenido de vapor del aire y, por lo tanto, es una función de la humedad. Dado que en el rango de condiciones involucradas los calores específicos de aire seco y vapor de agua son sustancialmente constantes, siendo 0.24 y 0.45, respectivamente, la siguiente expresión puede usarse para estimar el calor húmedo:  $s = 0.24 + 0.45H$ .<sup>4</sup>

#### 1.4 CURVAS DE SECADO

Durante los procesos de secado uno de los factores más importantes a conocer indudablemente es el tiempo de secado, es decir el tiempo que tarda un material en llegar de un contenido de humedad inicial a un contenido de humedad final siendo la humedad final menor que la inicial.

El proceso de secado normalmente se lleva a cabo bajo unas condiciones de operación establecidas. Este factor es de gran importancia debido a que a nivel industrial establece cuanto tardara un equipo bajo ciertas condiciones de operación en completar el proceso y obtener la humedad deseada en el producto, con él además es posible identificar qué efecto y de qué manera afecta el cambio de las condiciones en el tiempo de secado además de permitir calcular cuánto material es posible secar en una unidad determinada de tiempo, si el equipo se encuentra en la

fase de diseño con este factor es posible estimar el tamaño que el equipo requerirá para cumplir con las características de producción.

Es por esto que cobran importancia las curvas de secado ya que con la ayuda de estas es posible determinar este factor asimismo permite identificar de manera visual y clara como afecta el cambio de las condiciones de operación al proceso.

En los procesos de secado generalmente se emplean dos tipos de diagramas para describir el proceso, el primero de ellos se construye generalmente de datos experimentales en el que se representa el contenido de humedad del material contra el tiempo, este diagrama es el que comúnmente se conoce como curva de secado, por otra parte existe el diagrama o curva de velocidad de secado el cual se obtiene de graficar la velocidad de secado la cual puede ser obtenida a partir de la curva de secado por medio de la pendiente contra el contenido de humedad.

Con el fin de identificar las partes de una curva de secado y explicar de manera clara en que consiste cada una de ellas se tomaron los datos de un proceso de secado real realizado por Luis Santana y David Cubillos, los resultados obtenidos de este proceso se evidencian a continuación en la Tabla 1.<sup>18</sup>

Tabla 1. Valores experimentales de un proceso de secado.

<b>Tiempo</b>	<b>Humedad</b>
<b>0</b>	90.40%
1	82.29%
2	64.53%
3	36.48%
4	19.38%
5	12.32%
6	7.92%
7	6.75%

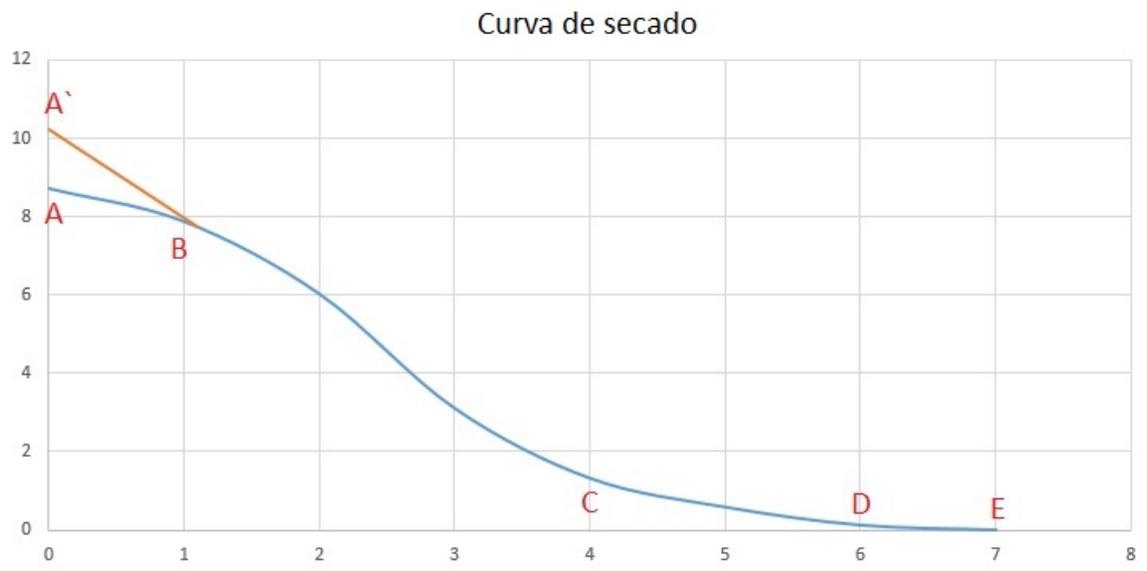
Fuente. Santa Luis., Cubillos David (2016). Propuesta de diseño de un deshidratador tipo bandeja para la producción de frutas orgánicas tipo snaks para ecovitale orgánico.

A continuación, en la Gráfica 1. Se evidencia la curva de secado obtenida a partir de los datos suministrados en la Tabla1, en esta grafica además se encuentran señalados diversos segmentos los cuales poseen un significado especial el cual será enseguida.

---

<sup>18</sup> Santana Luis., Cubillos David (2016). Propuesta de diseño de un deshidratador tipo bandeja para la producción de frutas orgánicas tipo snaks para ecovitale orgánico.

Grafica 1. Curva de secado en base seca.

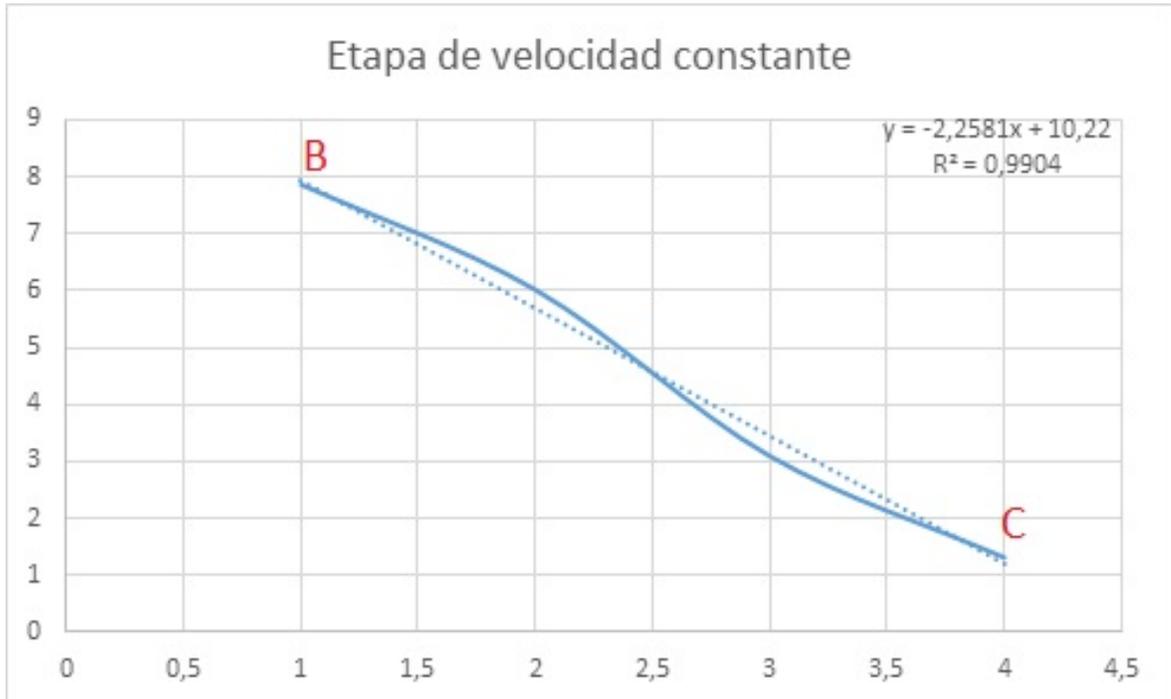


Fuente. Elaboración propia basada en Santana Luis., Cubillos David (2016). Propuesta de diseño de un deshidratador tipo bandeja para la producción de frutas orgánicas tipo snaks para ecovitale orgánico.

En la etapa A-B identificada en la gráfica 1. Es el periodo donde ocurre una adaptación del material a secar, generalmente es un calentamiento del material, mientras ocurre esta adaptación el cambio en el contenido de humedad no es muy significativo y suele dar sé en periodos de tiempo cortos, por lo que este periodo no se suele tener en cuenta para el cálculo del tiempo de secado, por otra parte si el material a secar entra al proceso con la temperatura de bulbo húmedo del aire esta adaptación no tendrá lugar y el comportamiento de la gráfica sería similar al comportamiento que se ve en los puntos A'-B .

Por otro lado, la etapa comprendida entre los puntos B-C se caracteriza por tener una velocidad de secado constante y es considerada la etapa más importante durante los procesos de secado debido a que en esta etapa ocurre la mayor reducción en la humedad en un tiempo relativamente bajo, en esta etapa se retira la humedad no ligada del material que se desea secar, en la gráfica 2. Se identifica que esta etapa representa una línea recta debido a la velocidad constante, en la gráfica 2 las desviaciones son ocasionadas debido a que se graficó con datos experimentales.

Grafica 2. Curva de secado etapa de velocidad constante.



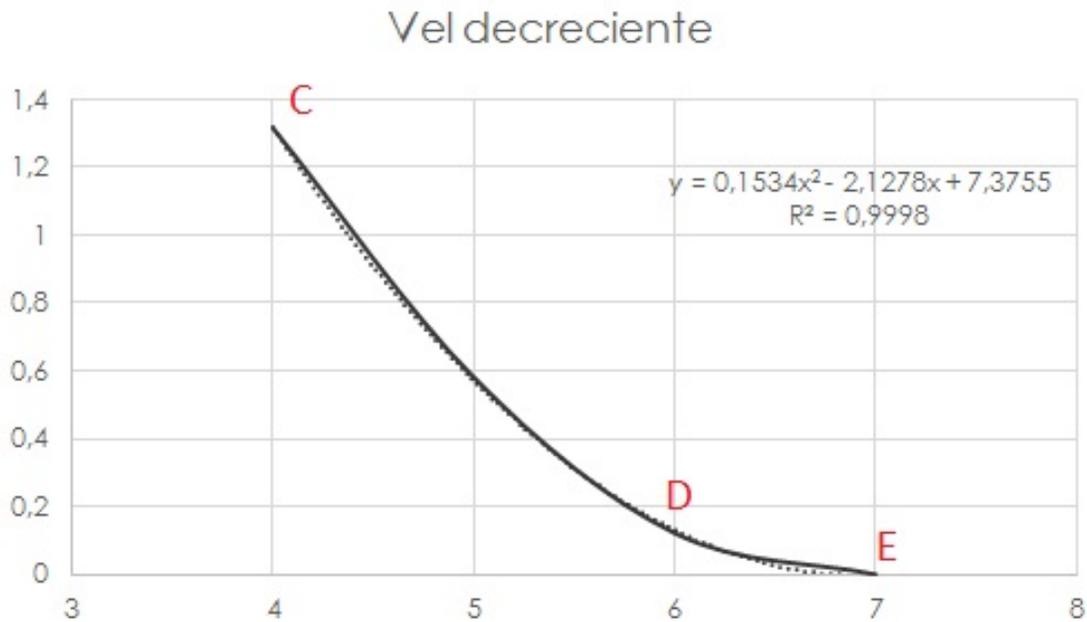
Fuente. Elaboración propia.

La etapa comprendida entre los puntos C-D se conoce como la primera etapa de velocidad decreciente en esta etapa la superficie del sólido ya no se encuentra en su totalidad con una fina capa de agua, por lo que empieza la aparición de pequeñas zonas secas, en esta etapa se empieza a retirar la humedad ligada del material.

Finalmente la etapa comprendida entre los puntos D-E es la segunda etapa de velocidad decreciente, generalmente tiene la velocidad de secado más baja y a nivel industrial no es empleada ya que requiere un tiempo de operación muy largo en comparación a las demás etapas y la cantidad de humedad removida no es muy significativa, por lo que el proceso normalmente se detiene antes de llegar a este punto, esta etapa continua hasta que el material que se somete al proceso de secado llega a condiciones de equilibrio con el aire.

En la gráfica 3. Evidencia el punto de inflexión (el punto D) en donde cambia la velocidad de secado entre las dos etapas de velocidad decreciente, en la segunda etapa de velocidad decreciente la velocidad disminuye aún más debido a que la totalidad del agua removida en esta etapa se comporta como agua ligada.

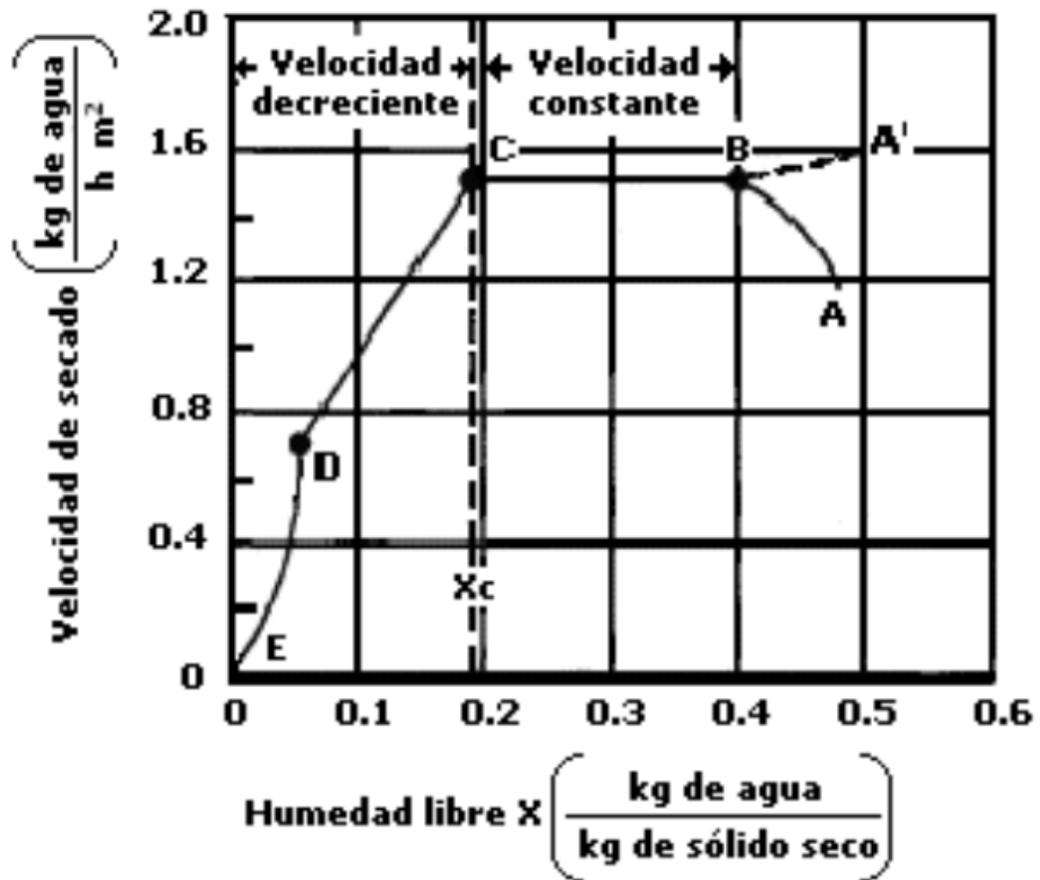
Grafica 3. Curva de secado etapas de velocidad decreciente.



Fuente. Elaboración propia.

1.4.1 Curvas de velocidad de secado. Como se mencionó anteriormente además de las curvas de secado también se suelen emplear las curvas de velocidad de secado, las cuales a diferencia de las curvas de secado muestran la relación entre la velocidad de secado y el contenido de humedad a lo largo del proceso, estas se pueden obtener de graficar la velocidad de secado la cual puede ser hallada con la ayuda de la curva de secado por medio de la pendiente versus el contenido de humedad.

Figura 3. Curva de velocidad de secado.



Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579.

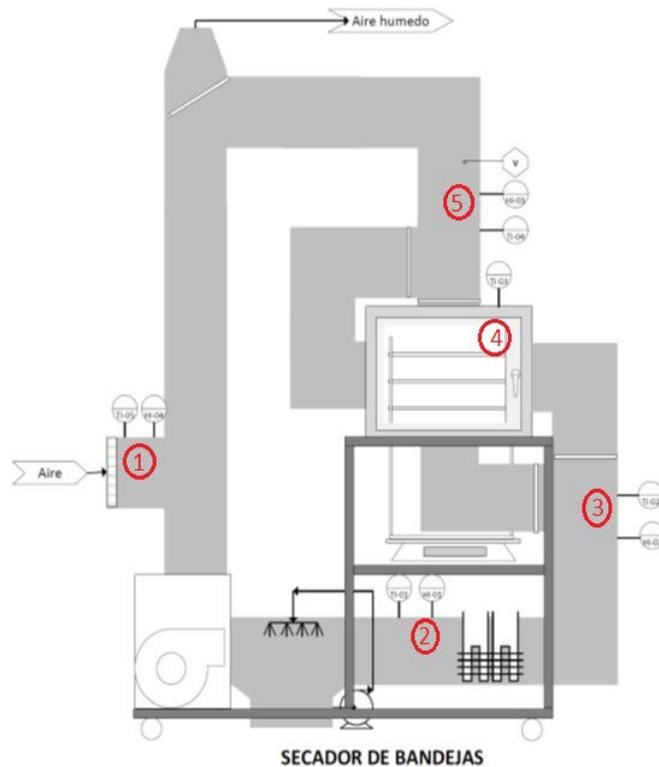
En la figura 3 se observa una curva de velocidad de secado, se debe tener cuenta que en el tiempo cero el contenido de humedad libre inicial corresponde al punto A. Al igual que en las curvas de secado en las curvas de velocidad de secado es posible identificar las etapas del proceso y se encuentran señaladas en la curva de velocidad de secado con los mismos indicadores.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA DE SECADO

En este proyecto de investigación se analizan e identifican las características de la planta de secado adquirida por la Fundación Universidad América la cual fue adquirida a la compañía PS+E Process Solutions and Equipment esta planta de secado se identifica por la compañía con el código SB500. Este equipo como se mencionó en el capítulo anterior se encuentran clasificado como un equipo directo discontinuo dentro de la clasificación que hace referencia al método de transferencia de calor y su modo de operación, en cuanto a la clasificación según el tipo de alimentación este equipo se encuentra en diferentes ramas como lo son; la rama de polvos húmedos fluyentes y la de sólidos granulares.

Sin embargo, debido al diseño de las bandejas del equipo, las cuales fueron fabricadas en malla tejida de acero inoxidable estas poseen una apertura de 5 mm por lo que no es posible someter al proceso de secado en este equipo específicamente materiales que tengan un diámetro inferior a 5 mm, por lo que para el caso específico de este equipo no debe ser incluido en todas las ramas de este tipo de clasificación en donde normalmente se encuentra.

Figura 4. Diseño de la planta de secado.



Fuente. Manual de operación secador de bandejas ref SB500

## 2.1 CÁMARA DE SECADO

El equipo principal de la planta es una cámara de secado con un sistema de bandejas, la cámara de secado tiene unas dimensiones de 40 cm de longitud, alto y ancho, esta se encuentra construida en acero inoxidable (SS) 304, con aislamiento interno mientras que la puerta frontal del equipo cuenta con un vidrio el cual permite el seguimiento visual del proceso. Por otra parte, en el interior de la cámara de secado se cuenta con un sistema de tres bandejas cuadradas removibles de 30 cm de largo y ancho fabricadas en malla tejida de acero inoxidable con una apertura de 5 mm, el equipo cuenta con ductos de aire en las paredes superior e inferior, y en las paredes laterales de la cámara<sup>19</sup>.

Aparte de esto el equipo cuenta con sensores capaces de determinar la temperatura y la humedad de las corrientes de aire en la entrada, la salida además de la temperatura al interior del equipo, asimismo cuenta con un anemómetro capaz de determinar la velocidad de salida del aire de la cámara y una balanza la cual posee rango de operación de 0 a 10Kg con una sensibilidad de 1g.

Además de establecer las características anteriormente mencionadas para caracterizar la cámara de secado y el proceso de secado es pertinente identificar una las propiedades del aire, tales como: la humedad ambiental, la temperatura ambiental, la temperatura de secado, el flujo máximo de aire, la cantidad máxima de material que es posible secar<sup>20</sup>, aparte de este es necesario seleccionar el material a secar cuidadosamente, de tal forma que este sea compatible con los materiales en los que se encuentra construida la planta de secado, en la sección de anexos se encuentra una tabla en la que se indica la afinidad de diferentes materiales con los materiales de construcción de la planta de secado, en caso de no encontrar sé en la tabla el material que se someterá al proceso de secado es pertinente buscar más información sobre este.

## 2.2 EQUIPOS PERIFÉRICOS

Aparte del equipo principal el cual se mencionó anteriormente la planta de secado cuenta con distintos equipos periféricos que funcionan en conjunto con el equipo principal para realizar los procesos para los cuales fue diseñada la planta, estos equipos se mencionan a continuación con sus principales características y/o funciones.

**2.1.1 Sistema de ventilación.** El sistema de ventilación cuenta con un ventilador centrífugo capaz de proveer 500 pies cúbicos de aire por minuto, además, posee un variador de velocidad que permite regular el flujo de aire. Por otra parte, el sistema

---

<sup>19</sup> Procesess solutions and equipment. (2018). Manual de operación secador de bandejas ref.SB500

<sup>20</sup> Espinoza v, Menjívar A, Najarro A. (2018). Diseño, construcción y caracterización de un secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos.

de toma de aire cuenta con un filtro el cual evita la contaminación de las muestras o productos a secar con partículas o microorganismos.

En la figura 4 Se encuentra señalada la entra del aire al sistema, lugar en el que se encuentra ubicado el filtro mencionado anteriormente, más adelante se encuentra la representación del ventilador el cual impulsa el aire hacia las resistencias y al equipo de secado, la planta solo cuenta con un ventilador y un filtro de aire, para la caracterización del sistema de ventilación es necesario identificar o conocer las siguientes características y propiedades enunciadas a continuación:

- Material o materiales en los que se encuentra construido el ventilador.
- Área de la boca de entrada y salida del ventilador.
- Determinar si el ventilador es axial o centrífugo.
- Número de revoluciones por minuto (rpm) del giro del rotor del ventilador.
- Calcular el rendimiento del ventilador.
- Máximo flujo volumétrico capaz de suministrar el ventilador.
- Material del filtro de aire (Nylon, metal, carbón activado, etc.).
- Área del filtro.

Para realizar el cálculo del rendimiento del ventilador se puede definir como el cociente entre la potencia que entrega el ventilador al aire ( $Pot_a - W$ ) sobre sobre la potencia que el ventilador recibe en su eje ( $Pot_v - W$ ).

Ecuación 1. Cálculo de la eficiencia de un ventilador.

$$\eta = \frac{Pot_a}{Pot_v}$$

Fuente. Espinoza v, Menjívar A, Najarro A. (2018). Diseño, construcción y caracterización de un secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos.

Sin embargo, la potencia entregada al aire depende del caudal que circula y la presión necesaria para vencer las pérdidas del sistema de conductos, por lo que puede expresarse de la siguiente forma:

Ecuación 2. Potencia suministrada al aire.

$$Pot_a = Q \cdot h_{tv} \cdot g$$

Fuente. Espinoza v, Menjívar A, Najarro A. (2018). Diseño, construcción y caracterización de un secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos

Donde Q es el caudal del aire (m<sup>3</sup>/s), h<sub>vt</sub> es la altura de presión total a entregar por el ventilador en (mmcda) y g es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)<sup>21</sup>.

2.1.2 Sistema de adecuación de humedad. El equipo cuenta con un almacenamiento de agua ubicado entre las resistencias de calentamiento y el ventilador, este almacenamiento de agua alimenta una bomba la cual lleva el agua hasta un sistema de aspersión con el cual es posible controlar la humedad del aire de entrada al proceso de secado, este sistema de aspersores se encuentra ubicado justo después del ventilador por lo que el aire de entrada se humidifica antes de entrar al sistema de calentamiento.

Al igual que en el sistema de ventilación es necesario establecer los parámetros mencionados a continuación con el fin de cumplir con la caracterización de los equipos mencionados<sup>22</sup>:

- Identificar los materiales en los cuales se encuentra construida la bomba.
- Definir qué tipo de bomba es.
- Clasificar la bomba en alguno de los siguientes grupos: bombas de desplazamiento positivo o volumétricas, bombas de embolo alternativo, bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas, bombas rotodinámicas.
- Indicar el valor nominal de la presión (presión de trabajo para la cual está diseñada la bomba).
- Calcular el rendimiento y el caudal.

Para los cálculos mencionados anteriormente es necesario conocer que el rendimiento se puede expresar en función de las potencias y como rendimiento

---

<sup>21</sup> Torres J. (2016). Proceso de secado en lotes de granos de trigo en un sistema de lecho fluidizado.

<sup>22</sup> Solorzano, R. (2018). Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas. Retrieved from <https://www.hydraulicspneumatics.com/blog/principios-ingenieriles-b-sicos-bombas-hidr-ulicas>

volumétrico en función de los caudales, para lo cual el rendimiento volumétrico queda expresado como<sup>23</sup>:

Ecuación 3. Potencia volumétrica de una bomba.

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_{teorico}}$$

Fuente. Solorzano, R. (2018). Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas.

En donde Q es el caudal impulsado por la bomba (m<sup>3</sup>/s) mientras que Q<sub>teórico</sub> es el caudal teórico o el caudal bombeado por el rodete (m<sup>3</sup>/s), el término del rendimiento en función a la potencia de la bomba es similar al anteriormente expuesto cambiando los términos de caudal por potencias reales y teóricas<sup>24</sup>.

2.1.3 Sistema de calentamiento. El aire se calienta por medio de resistencias las cuales pueden proveer una potencia máxima de 6.75 KW, estas resistencias se encuentran ubicadas a la salida del ventilador, posterior al sistema de adecuación de humedad tal como se observa en la figura 3. Estas resistencias poseen un regulador de potencia con el cual es posible controlar la temperatura del aire de entrada al proceso de secado durante el proceso de caracterización es adecuado definir las siguientes características del sistema de calentamiento<sup>25</sup>:

- Materiales de construcción
- Área superficial de la resistencia.
- Tipo de resistencia.

2.1.4 Tablero de control. En el tablero de control se encuentra una unidad de encendido de los indicadores de temperatura y humedad, se encuentran los sistemas de encendido de las resistencias, la bomba de agua, el ventilador y el control variador de la velocidad, además de esto cuenta con un controlador para el sistema de calentamiento del aire y 5 botones los cuales controlan la energización del sistema, el encendido de resistencias de calentamiento, encendido de sistema de termopares, encendido ventilador y el encendido de la bomba.

---

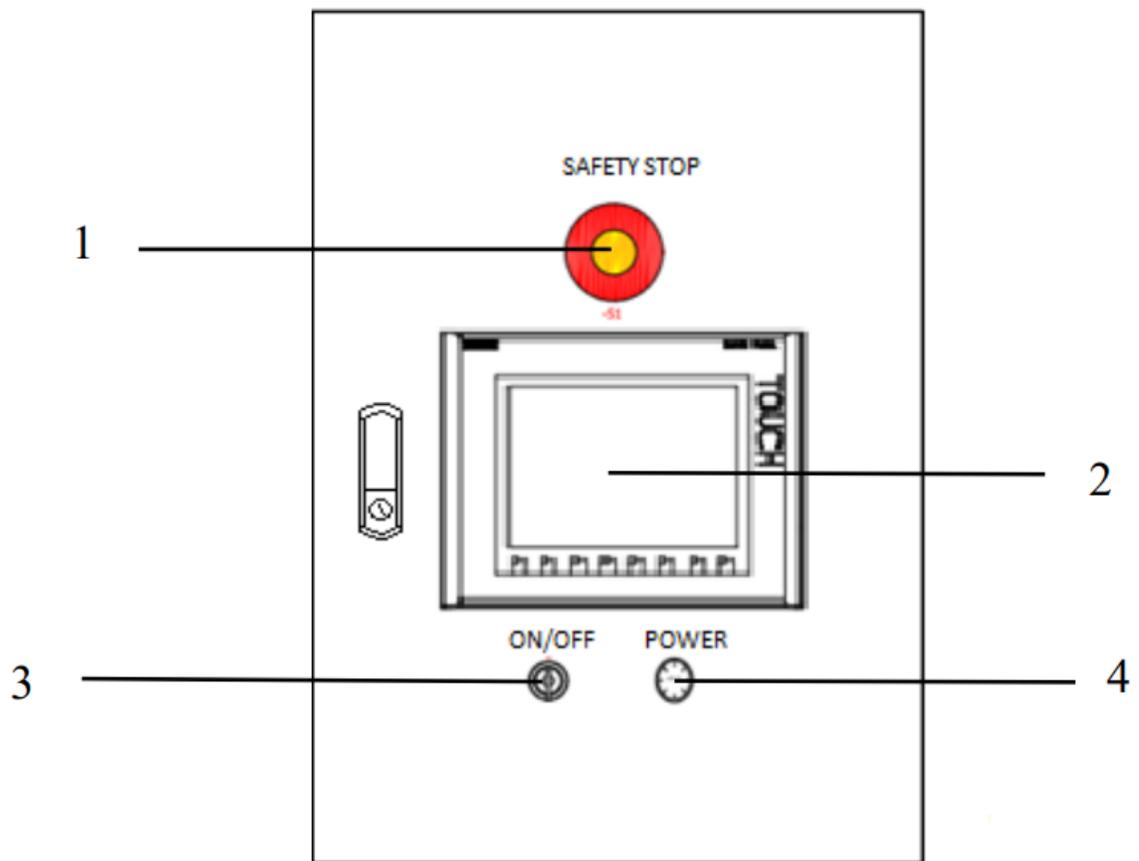
<sup>23</sup> Universidad de alicante. (2011). Mecánica de fluidos, Tema 2. Impulsión de fluidos.

<sup>24</sup> Eficiencia en bombas. (2018). Retrieved from <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/eficienciaenbombas/eficienciaenbombas.html>

<sup>25</sup> Industrial, J., & Industrial, J. (2018). Aspectos fundamentales detrás del PT100. Retrieved from <https://www.jmi.com.mx/literatura/blog/item/6-resistencias-calefactoras.html>

Se debe comprobar que en la planta se encuentren cuatro termohigrómetros en las posiciones 1, 2,3 y 5 tal y como se indica en la figura 3, estos generan indicaciones de temperatura y humedad. Una termocupla en la posición 4 según la figura 3 capaz de dar las indicaciones de temperatura dentro de la cámara de secado, y un anemómetro en la posición 5 con el cual se controla el flujo volumétrico de aire.

Figura 5. Tablero de control.



Fuente. Manual de operación secador de bandejas ref SB500 pp 15.

En la figura 5. Se puede observar la imagen del tablero de control la cual fue proporcionada directamente por los fabricantes del equipo en donde se señalan diferentes partes de este, en el punto uno se encuentra el botón de parada de emergencia, el segundo punto señala la pantalla táctil en donde se muestra la lectura de los sensores, el punto 3 corresponde al encendido general del equipo y finalmente el 4 corresponde al bombillo testigo del tablero.

Con el fin de ayudar en el proceso de caracterización de la planta se desarrollaron herramientas de ayuda con las listas de chequeo en las cuales solo se debe verificar si la información suministrada por el fabricante es verídica, mediante la observación del equipo.

Estas listas de chequeo se encuentran en la sección de anexos y busca facilitar la verificación de la información obtenida a través del fabricante mediante la visualización el equipo, en las listas se encuentran algunas casillas subrayadas, estas casillas deben ser completadas con la información solicitada a los fabricantes por medio de un cuestionario el cual al igual que las listas de chequeo se encuentra en la sección de anexos.

Finalmente, en la columna de medidas las casillas que se encuentran marcadas con X, indican que para ese elemento indicado en la tabla no es necesario indicar las medidas que posea, sin embargo, se debe indicar si el instrumento si se encuentra instalado en la planta marcando en las casillas de si o no según corresponda.

### 3. MODELAMIENTO DE LA PLANTA DE SECADO

Las curvas de secado describen el cambio de humedad en el sólido a lo largo del tiempo durante el proceso de secado. Estas curvas se ven afectadas por las propiedades del material a secar y del aire, el tamaño de partícula, la porosidad del lecho, la dirección del flujo de aire, la geometría del sistema, y en general a las condiciones en las que se lleve a cabo el secado (Flujos, temperaturas, presiones, etc.).

La determinación del contenido de humedad en el punto crítico el cual como se ha mencionado es el punto donde termina etapa de velocidad de secado constante e inicia la etapa de velocidad de secado decreciente y la forma de la curva de secado, son parámetros importantes en el diseño de los secadores.

Debido a la dificultad para predecir el comportamiento de un sólido bajo unas condiciones de secado específicas, las curvas de secado generalmente se obtienen de forma experimental. No obstante se han desarrollado diversos modelos matemáticos que permiten predecir un comportamiento aproximado al comportamiento real de las curvas de secado bajo condiciones o suposiciones establecidas, como en el caso del estudio de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu en el cual se emplea la ecuación de Fick (ecuación 1) y la ecuación de Page (ecuación 2) con el fin de realizar una comparación entre estas y los datos experimentales con el fin de determinar la ecuación que mejor se ajusta a los valores experimentales<sup>26</sup>.

En la ecuación de Fick se considera la muestra como una placa plana infinita, difusividad efectiva constante, sin considerar el encogimiento de la muestra y ausencia de cualquier resistencia al transporte de masa<sup>27</sup>. Por otra parte cabe mencionar que esta ecuación ha sido empleada por diversos investigadores en el estudio del secado en alimentos<sup>28</sup>.

---

<sup>26</sup> Giraldo A, Arévalo A. Silva A. Valdes J. Pavlak M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas

<sup>27</sup> CRANK, J. (1975). *The mathematical of diffusion*. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 414 p.

<sup>28</sup> AGUIRRE, R. J.; GABITO, J. F.; CHIRIFE, J. (1985). Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by the internal diffusion. *Journal of Food Technology*

Ecuación 4. Ecuación de Fick.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n - 1)^2} \exp \left[ -(2n - 1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right]$$

Fuente. Giraldo A, Arévalo A. Silva A. Valdes J. Pavlak M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas.

En donde  $X =$  *humedad media en el instante t*,  $X_e =$  *humedad en el equilibrio*,  $X_0 =$  *humedad inicial*,  $L =$  *espesor medio* y  $D_{ef} =$  *difusividad efectiva*. Mientras que el modelo de Page empleado fue el siguiente donde las humedades se encuentran expresadas en kg de agua/kg solido seco.

Ecuación 5. Ecuación de Page.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = C \exp(-Kt^n)$$

Fuente. Giraldo A, Arévalo A. Silva A. Valdes J. Pavlak M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas.

En donde  $X =$  *humedad media en el instante t*,  $X_e =$  *humedad en el equilibrio*,  $X_0 =$  *humedad inicial* y C, K y n son parámetros del modelo.

### 3.1 CÁLCULO DEL PERIODO DE SECADO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

El factor más importante a determinar en los procesos de secado es probablemente el tiempo requerido para llevar a un material con un contenido de humedad inicial  $X_1$  hasta un contenido de humedad final  $X_2$  la forma de determinar este factor varía dependiendo de la etapa en la cual se encuentre el proceso o si el rango en el que se evalúa involucra más de una etapa. Para la etapa de velocidad constante es posible estimar la velocidad y el tiempo de duración de esta etapa mediante curvas obtenidas experimentalmente, también es posible encontrar buenas aproximaciones al comportamiento real mediante modelos matemáticos el que se empleó en este caso será por predicciones de coeficientes de transferencia de masa y transferencia de calor.

El tiempo de secado de un material específico en el periodo de velocidad constante puede ser determinado de diferentes maneras, el más apropiado es aquel en el que se cuenta con datos experimentales suficientes para realizar la construcción de la

curva de secado y a partir de esta es posible determinar gráficamente el tiempo de secado<sup>2</sup>.

Por otra parte, en la etapa de velocidad de secado constante también es posible determinar el tiempo de secado a través de la curva de velocidad de secado, la velocidad de secado (R.) se define de la siguiente manera<sup>2</sup>:

Ecuación 6. Curva de velocidad de secado.

$$R = -\frac{Ls}{A} * \frac{dX}{dt}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En donde Ls es el peso del sólido seco (kg) que se emplea en la operación, A es el área superficial del sólido (m<sup>2</sup>), o el área expuesta al proceso de secado. En la ecuación anterior es necesario reordenar despejando dt para permitir calcular el tiempo de secado desde una humedad X<sub>1</sub> hasta una humedad X<sub>2</sub>, por lo que al reordenar e integrar se obtiene la siguiente expresión:

$$t = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

A partir del término obtenido al reorganizar y teniendo en cuenta que el análisis se realizó para la etapa de velocidad constante indica que R (kg/h\*m<sup>2</sup>) no varía con respecto al tiempo, por lo que se obtiene que R = R<sub>c</sub> donde R<sub>c</sub> es la velocidad en la etapa de velocidad constante y X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> > X<sub>c</sub> donde X<sub>c</sub> representa el contenido de humedad en el punto crítico, por lo que sacando a R de la integral se obtiene:

Ecuación 7. Tiempo de secado en la etapa de velocidad constante.

$$t = \frac{Ls}{AR_c} * (X_1 - X_2)$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

Es necesario tener en cuenta que la expresión que se obtuvo en la ecuación 5 es solo válida cuando X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> > X<sub>c</sub> ya que luego de pasar por la humedad crítica (X<sub>c</sub>) el comportamiento de la curva de secado cambia y este se representa por medio de otros modelos, los cuales en este caso no se tendrán en cuenta ya que las operaciones de secado se suelen detener antes de llegar a las etapas de velocidad de secado decreciente.

Otra manera de predecir el comportamiento de la curva de secado es por medio de la predicción de los coeficientes de transferencia, ya que el secado en el periodo de velocidad constante se da por la transferencia de masa del agua de la superficie saturada del material que se somete al proceso de secado hacia la fase gaseosa y la velocidad de secado se encuentra controlada por la velocidad de transferencia de calor hasta la superficie de evaporación donde se suministra el calor latente para la evaporación del líquido, cuando el equipo se opera en estado estacionario la velocidad de transferencia de masa es igual a la velocidad de transferencia de calor.

Si la transferencia de calor se da del gas caliente a la superficie por convección y de la superficie al gas por transferencia de masa y se supone que no se da transferencia de calor por radiación y/o conducción es posible expresar la transferencia de calor de la siguiente forma<sup>29</sup>:

Ecuación 8. Velocidad de transferencia convectiva de calor.

$$q = h(T - T_w)A$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En donde h es el coeficiente de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup>\*K), A es el área de secado expuesta, T<sub>w</sub> es la temperatura de bulbo húmedo (°C) y q es la velocidad de transferencia convectiva de calor (W). Por otra parte, teniendo en cuenta la transferencia del agua la cual representa el flujo de agua desde la superficie del sólido sometido al proceso de secado hasta el aire se puede expresar de la siguiente forma<sup>29</sup>:

Ecuación 9. Transferencia de masa de la superficie del sólido al aire.

$$N_A = k_y(y_w - y)$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

Donde N<sub>A</sub> son las moles de agua evaporada por unidad de tiempo y área, y<sub>w</sub> es la fracción molar de vapor de agua en el gas en la superficie, y k<sub>y</sub> es el coeficiente de transferencia de masa. Teniendo en cuenta que M<sub>B</sub> es el peso molecular del aire el cual puede considerarse constante con un valor aproximado de 29 g/mol<sup>29</sup> y M<sub>A</sub> es el peso molecular del agua al cual le corresponde un valor de 18 g/mol<sup>29</sup>, es posible emplear la siguiente expresión para realizar una aproximación en la ecuación de transferencia de masa:

---

<sup>29</sup> Laidler, Keith. Meiser. (2002). Fisicoquímica

Ecuación 10. Aproximación de la fracción molar.

$$y \cong \frac{XM_B}{M_A}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

Realizando la aproximación expuesta en la ecuación 8 es posible reescribir la ecuación 7 lo que nos da la posibilidad de expresar la cantidad de agua evaporada en relación con los pesos moleculares y la humedad, los cuales son valores que pueden ser determinados de manera sencilla con la ayuda de los sensores de la planta de secado:

Ecuación 11. Aproximación de la ecuación de transferencia de masa.

$$N_A = k_y \frac{M_B}{M_A} (X_w - X)$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

Una vez obtenida la cantidad de agua que pasara del solido al aire ( $N_A$ ) se procede a realizar el cálculo del calor necesario para remover la, para tal fin se emplea la siguiente igualdad en donde se relaciona la cantidad de agua que se retira del material con el peso molecular, el calor latente y el área<sup>2</sup>:

Ecuación 12. Calor requerido para evaporar el agua.

$$q = M_A N_A \lambda_w A$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

Donde  $\lambda_w$  es el calor latente de evaporación (kJ/kg). Se puede re escribir la ecuación de velocidad de secado obtenida a partir de las ecuaciones de transferencia de calor y transferencia de masa.

Ecuación 13. Velocidad de secado a partir de las ecuaciones de transferencia de calor.

$$R_C = \frac{h(T - T_W)}{\lambda_W}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECOSA, pp.579-634.

Empleando las formulas obtenidas a partir de los fenómenos de transferencia de calor se obtiene la ecuación 11 la cual relaciona la velocidad de secado en la etapa de velocidad constante con el coeficiente de transferencia de calor, el calor latente de evaporación y las temperaturas.

Ecuación 14 Velocidad de secado a partir de las ecuaciones de transferencia de masa.

$$R_C = k_y M_B (X_W - X)$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECOSA, pp.579-634.

A diferencia de la expresión obtenida a partir de los fenómenos de transferencia de calor, la expresión que se obtiene en relación con el fenómeno de transferencia de masa no depende del coeficiente de transferencia de calor ni de las temperaturas, en cambio este varía de acuerdo a la humedad y el coeficiente de transferencia de masa, además se encuentra relacionado con peso molecular del aire el cual puede considerar se un valor constante<sup>2</sup>.

Aunque las ecuaciones 11 y 12 predicen de manera correcta la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante es recomendable emplear la expresión obtenida a partir de las ecuaciones de transferencia de calor ya que las variaciones de T y T<sub>w</sub> afectan en mayor medida el resultado de la velocidad en comparación a la variaciones de X y X<sub>w</sub>, por lo que la ecuación basada en el fenómeno de transferencia de masa es menos susceptible a los errores, los cuales pueden ser ocasionados en la toma de datos principalmente por errores humanos.

Para estimar el valor de la velocidad en el periodo de velocidad constante empleando la expresión formada a partir del fenómeno de transferencia de calor es necesario conocer el valor del coeficiente de transferencia de calor (h). Para realizar el cálculo de este coeficiente se debe tener en cuenta la dirección del flujo de aire, cuando el flujo de aire es paralelo a lo superficie de secado es posible emplear la siguiente expresión:

Ecuación 15. Cálculo del coeficiente  $h$  para flujos de aire paralelos a la superficie de secado.

$$h = 0.0204 \times G^{0.8}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

El valor de  $G$  corresponde al cálculo de la velocidad del aire por su densidad ( $\text{kg/h}\cdot\text{m}^2$ ). Es apropiado emplear la expresión anterior cuando la temperatura del aire de secado se encuentra entre  $45$  y  $150^\circ\text{C}$ , además este debe tener una velocidad entre  $0.61$  a  $7.6$  m/s, estas condiciones se encuentran en la mayoría de los procesos de secado sobretodo en procesos donde se busca secar alimentos en los cuales la temperatura no puede ser muy alta. Por otra parte, cuando el flujo de aire es perpendicular a la superficie de secado se debe emplear la siguiente expresión<sup>2</sup>.

Ecuación 16. Cálculo del coeficiente  $h$  para flujos de aire perpendiculares a la superficie de secado.

$$h = 1.17 \times G^{0.37}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En esta expresión la temperatura debe ser similar al caso anterior, sin embargo, la velocidad del aire se debe encontrar entre  $0.9$  a  $4.6$  m/s.

Por otra parte teniendo en cuenta la naturaleza del equipo adquirido por la Fundación Universidad de América que es posible que se presente una transferencia de calor por medio de la bandeja en la cual se deposita el sólido se incluyó el análisis de la velocidad de secado teniendo en cuenta este fenómeno por lo que el calor que será transferido al sólido se puede expresar como:

Ecuación 17. Transferencia de calor por conducción y convección

$$q = q_c + q_k$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En la ecuación 17 se indica que el calor transferido al sólido ya no solo se realizara por medio de convección entre el aire y el sólido sometido al proceso de secado ( $q_c$ ), en cambio ya se incluye el valor de  $q_k$  el cual hace referencia al calor transferido por conducción el cual como se mencionó anteriormente se da por el contacto del

solido con la bandeja y despreciando la transferencia de calor por radiación. El calor por conducción se encuentra expresado como:

Ecuación 18. Calor por conducción.

$$q_k = U_K(T - T_w)A$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En donde A hace referencia a el área del solido que se somete al proceso de secado que se encuentra en contacto directo con el metal o bandeja, esta área puede ser diferente al área expresada para el calor por convección la cual hace referencia a la superficie del solido que está en contacto con el aire, es por esto que para el caso del equipo adquirido en el cual las bandejas se encuentran construidas en malla de acero inoxidable esta es menor es menor. Por otra parte,  $U_K$  hace referencia al coeficiente de transferencia de calor por conducción, este se expresa como:

Ecuación 19. Coeficiente de transferencia de calor por conducción.

$$U_K = \frac{1}{1/h + z_m/k_m + z_s/k_s}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En donde  $z_m$  es el espesor del metal (m),  $k_m$  es la conductividad térmica del metal o bandeja en W/m.K,  $z_s$  es el espesor del solido sometido al proceso de secado en m,  $k_s$  es la conductividad térmica del solido en W/m.K y h es el coeficiente de transferencia de calor en W/K.

Una vez se conoce el valor del coeficiente de transferencia de calor por conducción es posible expresar la velocidad de secados en términos del calor por convección y conducción el cual queda expresado de la siguiente manera:

Ecuación 20. Velocidad de secado Conducción y convección.

$$R_C = \frac{h_c(T - T_w) + U_K(T - T_w)(A_2/A_1)}{\lambda_s}$$

Fuente. Creación propia basada en el libro Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En la ecuación 20. Se emplea como  $h_c$  el mismo valor del coeficiente h del cual se habló anteriormente, en cuanto al  $A_2$  hace referencia al área que entra en contacto

con el sólido, o metal de la bandeja, esta área suele ser menor que el  $A_1$ , esta representa el área superficial del sólido que entra en contacto con el aire. Cuando estas dos áreas son iguales es posible simplificar y el término de la velocidad de secado queda expresado de la siguiente forma:

Ecuación 21. Simplificación de la ecuación de velocidad de secado.

$$R_c = \frac{(U_K + h_c)(T - T_W)}{\lambda_s}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En la ecuación 21, a diferencia de la ecuación 20, el término de las áreas se cancela y se realiza la simplificación de la esta, esta velocidad de secado se encuentra expresada en términos de  $\text{Kg/h.m}^2$ .

3.1.1 Efecto de las variables. La mejor manera de obtener las curvas de secado de un material es por medio de datos experimentales ya que estas se ven influenciadas por diferentes características de los sólidos las cuales en muchos casos no se tienen en cuenta en las ecuaciones de predicción. Sin embargo, las ecuaciones de predicción son bastante útiles cuando se tienen datos experimentales limitados, ya que con estas es posible pronosticar el efecto de los cambios de las variables de operación en el proceso.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que las condiciones de secado dependen también del producto que se someta al proceso ya que a partir de este se determinan las mejores condiciones que permitan obtener la mayor calidad de los productos, por otra parte, además de tener en cuenta las condiciones de operación se deben considerar otras variables como lo son condiciones climáticas entre las cuales se tiene la temperatura del aire, la humedad relativa, entre otras. A continuación, se describe el efecto de las variables en los procesos de secado<sup>5</sup>.

Las condiciones climáticas influencia en gran medida los resultados de las operaciones de secado, principalmente en los secadores solares en donde se ve más la influencia de la radiación solar, la humedad y la velocidad del aire, sin embargo en los secadores mecánicos como la bomba de calor y los secadores de bandeja, también es posible observar una influencia de estas condiciones en el proceso ya que generalmente el consumo de energía será menor si el proceso se lleva a cabo en condiciones ambientales secas, ya que se reduce la energía extra requerida para deshumidificar el aire atmosférico<sup>5</sup>.

Cuando la temperatura de entrada del bulbo seco del aire aumenta desde el ambiente, la humedad relativa disminuye y el potencial de conducción de secado

aumentará<sup>30</sup>. El aumento de la temperatura con una circulación reducida tiene control sobre la velocidad de secado al aumentar la capacidad de retención de humedad del aire, y también al acelerar la velocidad de difusión de la humedad a través de los materiales de la hoja<sup>31</sup>

En un día cálido, es posible retirar una mayor cantidad de agua del sólido pues se cuenta con una mayor cantidad de energía térmica disponible proveniente del aire, la cual contribuye al proceso. Esta observación es confirmada por numerosos estudios<sup>32</sup>.

La temperatura y la humedad relativa del aire de entrada y salida están interconectados con la absorción de humedad del aire y el nivel de humedad del producto de secado. Cuando el aire de entrada al proceso de secado cuenta con una humedad relativa alta se ve disminuida la velocidad de secado, además la cantidad de agua que puede contener el aire disminuye lo que indica que es necesario emplear una mayor cantidad de aire. La humedad relativa se puede reducir aumentando la temperatura del bulbo seco del aire para evaporar la humedad del material.

El tiempo de secado y la calidad del producto dependen de la velocidad del aire y su circulación uniforme. El aire en la superficie de los productos de secado que ha recogido la humedad se debe reemplazar de manera continua por aire fresco de baja humedad relativa, el cual es muy eficiente para eliminar la humedad<sup>33</sup>. Si el volumen de aire está por debajo del valor normal requerido para el secado efectivo del producto, la temperatura tendrá que aumentarse para producir la misma cantidad de calor<sup>5</sup>.

El tiempo de secado se ve afectado en gran medida por las condiciones a las cuales se realice el proceso de secado, en general un aumento en la temperatura del aire produce una disminución en el tiempo de secado. Un mayor gradiente de humedad y calor aumentará la velocidad de secado. Diferentes materiales tienen diferentes curvas de velocidad de secado. Si el gradiente no es suficiente, la velocidad de secado se reducirá y dará como resultado un período de secado más prolongado.

---

<sup>30</sup> Premi Monica, Sharma Harish, (2012). Upadhyay Ashutosh. Effect of air velocity and temperature on the drying kinetics of drumstick leaves (*Moringa oleifera*).

<sup>31</sup> Bensebia O, Allia K. (2015). Drying and extraction kinetics of rosemary leaves: experiments and modeling. *J Essent Oil Bear Plants*

<sup>32</sup> Sandra Sagrin M, Chong GH. (2013). Effects of drying temperature on the chemical and physical properties of *Musa acuminata* Colla (AAA group) leaves.

<sup>33</sup> Rocha Ronicely Pereira, Melo Evandro de Castro, Demuner Antonio Jacinto, Radunz Lauri Lourenco, Braun Heder. (2012). Effect of drying air velocity on the quality of essential oil from lemon grass.

Por lo que, se necesitan una alta temperatura, baja humedad relativa y alta velocidad del aire para un secado más rápido<sup>34</sup>, Mientras se garantiza que la calidad del producto no se vea comprometida es recomendable variar estas condiciones de operación para lograr obtener el tiempo de secado más bajo posible.

### 3.2 SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

Se han diseñado diferentes modelos matemáticos los cuales buscan predecir el comportamiento de los procesos de secado, incluso se han intentado diseñar modelos para el proceso de secado que involucren todos los principales mecanismos de transferencia de la humedad considerando las propiedades de los materiales<sup>35-36</sup>.

Sin embargo, para la simulación de estos modelos se han empleado diferentes programas entre estos se encuentran programas tales como LabView, CFD y Excel entre otros. No obstante, estos programas de simulación se ven enfocados a algunos tipos de simulación.

Como en el caso de las simulaciones por CFD las cuales son simulaciones complejas que analizan el comportamiento de los fluidos en puntos determinados de los equipos, estos modelos requieren ecuaciones complejas para su correcta simulación, asimismo las simulaciones en programas como CFD en muchas ocasiones implican modelos capaces de mostrar el comportamiento en los fluidos 2 y 3 dimensiones<sup>37-38</sup>.

En cuanto a programas de simulación como LabView, que no requieren de modelos matemáticos tan complejos o específicos como en el caso de las simulaciones por CFD, se ve obstaculizado uso de este ya que es empleado principalmente para realizar cambios en las variables de los procesos en tiempo real.

Las simulaciones en LabView requieren de la instalación de un computador para poder realizar la manipulación de las variables en tiempo real, lo que implicaría la instalación de este al sistema de adquisición de datos de la planta, es por este motivo que se descartó este software.

---

<sup>34</sup> Erbay Zafer, Icier Filiz. (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology.

<sup>35</sup> Peishi C, Pei DCT. (1989). A mathematica lmodel of drying processes. Int J Heat Mass Transf

<sup>36</sup> Zhang Z, Yang S, Liu D. (1999). Mechanism and mathematical model of heat and mass transfe during convective drying of porous materials. Heat TransfRes.

<sup>37</sup> Misha S, Mat S, Ruslan MH, Sopian K, Salleh E. (2013). The prediction of drying uniformity in tray dryer system using CFD simulation. Int J Mach Learn Comput

<sup>38</sup> Misha S, Mat S, Ruslan MH, Sopian K, Salleh E. (2014). Comparison between 2D and 3D simulations of a tray dryer system using CFD software. World Appl Sci J

Por otra parte, ya que se espera que la simulación realizada sea empleada por los estudiantes de la Fundación Universidad de América para el desarrollo de sus prácticas en la planta de secado se seleccionó Excel como programa de simulación ya que es un programa de fácil acceso para los estudiantes, el uso de este programa no es complejo lo que facilitará su uso y contribuirá al proceso de aprendizaje de los estudiantes.

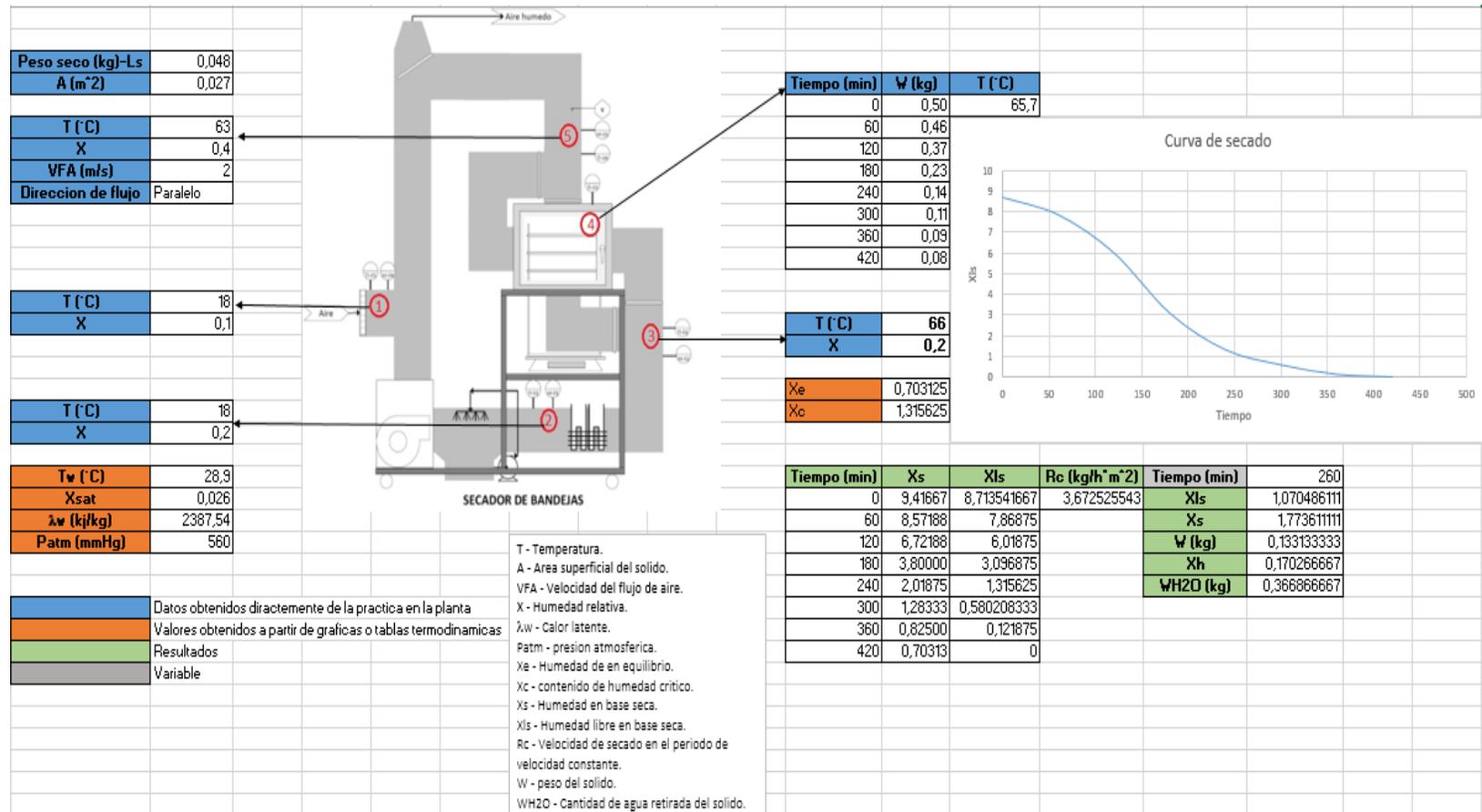
### 3.3 SIMULACIÓN

Con el fin de desarrollar un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento del equipo de secado adquirido por la Fundación universidad de américa y desarrollar una herramienta útil en el proceso de aprendizaje de los estudiantes, se elaboró una simulación del equipo basada en el modelo explicado al inicio del capítulo en Excel.

En la figura 6. Se observa la interfaz a la cual los estudiantes tendrán acceso, en esta se situará la información requerida para desarrollar el modelo y además se presentarán los resultados de este, ya que el desarrollo matemático permanecerá oculto en una hoja diferente con el fin de evitar que los estudiantes alteren su desarrollo.

La interfaz cuenta con el diagrama de la planta el cual fue enviado por los fabricantes, en este se señalaron y enumeraron los puntos donde se encuentran los diferentes sensores, por lo que además de predecir el comportamiento de la planta de secado este también permite conocer la estructura básica de la planta.

Figura 6. Interfaz de la simulación.



Fuente. Elaboración propia.

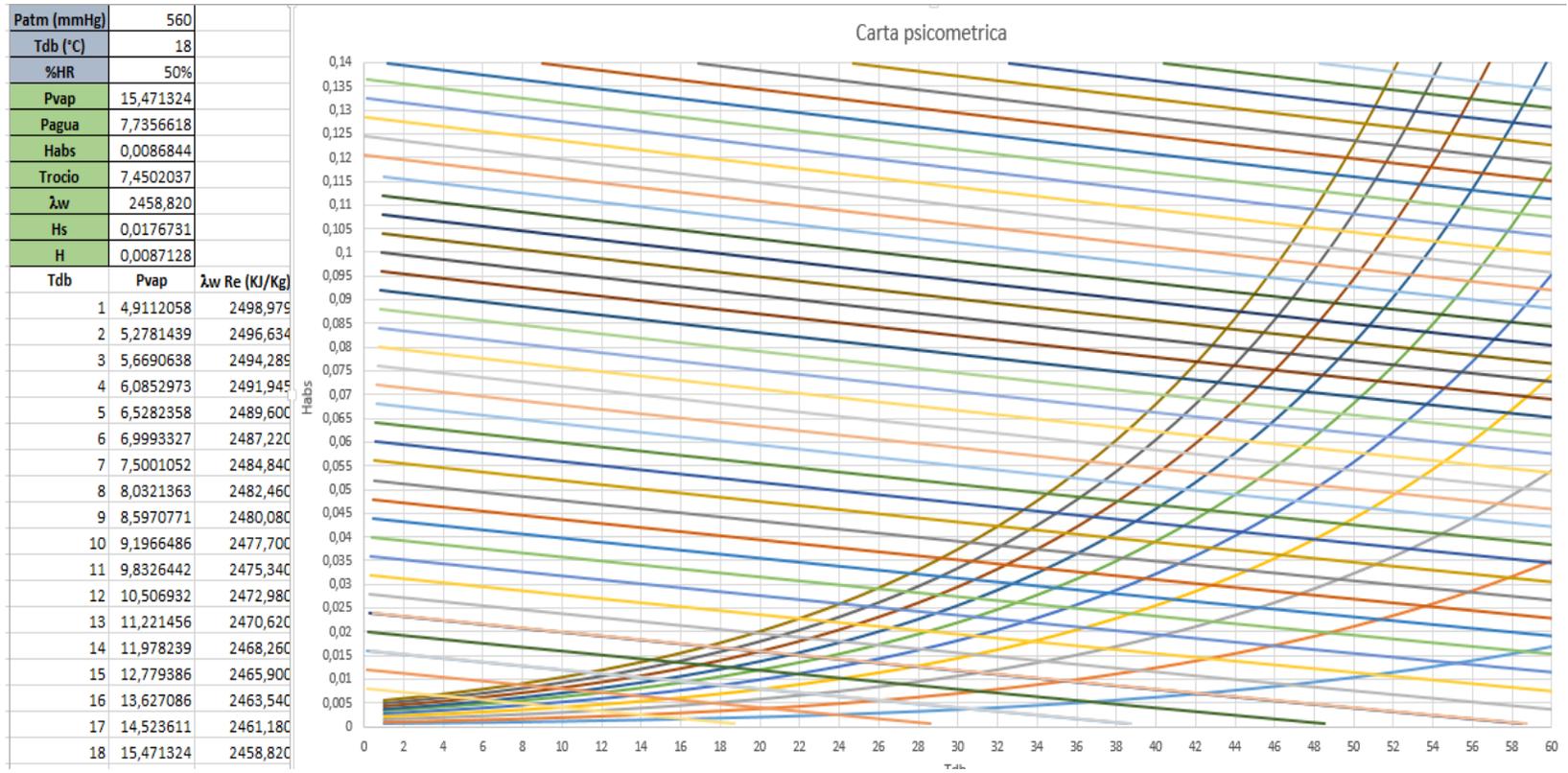
En cada ubicación señalada en el diagrama de la planta cuenta con un tipo de sensor, por lo que la información solicitada depende de este, por ejemplo en los puntos 1, 2 y 3 en los cuales se encuentran ubicados los higrómetros se solicita ingresar la información de humedad y temperatura, a diferencia del punto 5 en el cual además de encontrarse un higrómetro también se encuentra el anemómetro, por lo cual se solicita la información de la velocidad del aire y en qué sentido paso este a través de la cámara de secado.

Por otra parte, en la interfaz se logran identificar 4 tipos distintos de celdas, las cuales se encuentran representadas por diferentes colores. Las celdas azules representan, toda la información que es posible conocer durante la operación en la planta, esta información es provista principalmente por los sensores de la planta, sin embargo, también se requiere información tal como el tiempo de operación el cual requiere del uso de un cronometro, también se solicita el peso del solido seco. Para conocer esta propiedad posible emplear la muestra sometida al proceso de secado y calentar la en una estufa hasta que su peso no varié, sin embargo, si no se desea dañar el material secado es posible realizar este análisis con una muestra y estimar el peso total o si es un sólido con una humedad inicial conocida puede realizar se el cálculo de este.

Una vez ingresada la información de las celdas azules, se generará, la curva de secado y será necesario definir la información solicitada en las celdas naranjas, en estas celdas se solicita información que puede ser obtenida con ayuda de la curva de secado anteriormente generada, como la humedad en el punto crítico y la humedad en el equilibrio, la información restante puede ser encontrada con la ayuda de la carta psicométrica y tablas termodinámicas.

Con el propósito de facilitar la búsqueda de esta información a parte de exponer la carta psicométrica del capítulo 2 la cual se encuentra a las condiciones de Bogotá, condiciones a las cuales operara la planta lo que permite el uso de esta para la determinación de las propiedades, se programó la estructura básica de la carta psicométrica tal como se muestra en la figura 7, además de contar con las casillas de la esquina superior izquierda en la cual es posible realizar la lectura del valor exacto de las propiedades a las condiciones indicadas.

Figura 7. Programación de la carta psicométrica.



Fuente. Creación propia.

Tal como en la simulación del proceso de secado las casillas de color gris indican las variables que pueden ser modificadas, al variar la presión se modificara tanto los resultados de las casillas verdes como el diagrama psicométrico, las casillas verdes indican los resultados para condiciones específicas del aire, a diferencia del diagrama estos no depende solo de la presión, sino que además varían de acuerdo al porcentaje de humedad relativa y la temperatura de bulbo seco.

Para la validación de la simulación de la carta psicométrica se realizaron la lectura de diferentes puntos en la carta psicométrica creada por Efraín Alonso la cual se encuentra a las condiciones ambientales de Bogotá y posteriormente se cambiaron las condiciones de presión en la simulación para generar la gráfica a las mismas condiciones y realizar la comparación de las lecturas dando como resultado la muy cercanos.

A parte de las propiedades que se obtienen de la lectura de la carta psicométrica se incluyó el cálculo del calor latente de evaporación en los resultados ya que es un parámetro solicitado en la simulación del proceso, el cálculo de este se realizó por medio de dos métodos, inicialmente este se calculó basados en los datos de tablas termodinámicas y se realizó la regresión lineal de estos para hallar el valor en de este a cada temperatura. Por otra parte se realizó el cálculo de este con la ayuda de la ecuación de Clausius Clapeyron, ya que con esta ecuación es posible relacionar el calor latente de evaporación, la temperatura y el contenido de humedad (la cantidad de agua presente en una determinada cantidad de aire.), al realizar este cálculo se estimó el error promedio tomando como valor real el resultado obtenido por medio la regresión lineal anteriormente mencionado obteniendo un error promedio de 0.40%.

Se seleccionaron como variables la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la presión ya que el valor de estas propiedades puede ser determinado de manera sencilla con el uso de la planta de secado y conociendo la presión de la ciudad en la que se encuentre.

Una vez ingresados los valores de los parámetros de las casillas naranjas además de conocer la curva de secado se obtienen otros resultados como la humedad en base seca ( $X_s$ ) en cada periodo de tiempo, la humedad libre en base seca ( $X_{ls}$ ) y la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante ( $R_c$ ).

Finalmente se encuentra la casilla de color gris la cual sirve como variable si se desean conocer las propiedades del solido en un determinado tiempo, el cálculo de estas inicia con la determinación de la humedad libre en base seca, esta se calcula realizando una interpolación lineal entre los 2 datos más cercanos de tiempo, a partir de este valor se recalculan las demás propiedades como el peso del solido en ese instante de tiempo ( $W$ ), la cantidad de agua removida ( $W_{H_2O}$ ), la humedad en base seca entre otras ( $X_s$ ).

3.3.1 Validación de la simulación. La validación de la simulación se realizó con la ayuda del artículo “Evaluation of the drying of the Musa Paradisiaca (banana) using the SBAN laboratory apparatus”<sup>39</sup> en el cual se somete plátano al proceso de secado, en este artículo se empleó un secador de bandejas.

Para la validación de la simulación se cargó la información del artículo con el fin de poder realizar una comparación entre las propiedades obtenidas por los autores de este artículo y la simulación. En el artículo el proceso de secado se llevó a cabo a 50°C con una velocidad del aire a 9.1 m/s, en la tabla 2. Se observan los valores de peso y tiempo que fueron ingresados a la simulación, basados en la información suministrada por el artículo.

Tabla 2. Valores de entrada a la simulación.

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>W (kg)</b>
0	0	0.0891
0.15	9	0.0841
0.32	19.2	0.0792
0.57	34.2	0.0742
0.73	43.8	0.0693
0.98	58.8	0.0643
1.15	69	0.0594
1.40	84	0.0495

Fuente. Figueredo M. Rcardo R. González. (2017). Evaluation of the frying of the Musa paradisiaca (banana) using the SBAN laboratory apparatus.

La información del artículo con el cual se busca realizar la comparación de los resultados obtenidos expresa el tiempo de operación en horas (h), por lo tanto, es necesario realizar el cambio de unidades a minutos ya que la simulación se encuentra programada para hacer el cálculo de las propiedades cuando el tiempo se encuentra expresado en minutos.

Además de esto en el artículo se brinda la información del área superficial de secado la cual para este caso es de 0.4322 m<sup>2</sup>, la dirección del flujo de aire la cual en este caso ellos indican que es de forma axial, por lo que para este caso en la simulación se elige la dirección de flujo paralelo que corresponde al flujo axial.

3.3.2 Análisis de resultados. Con el fin de determinar si el modelo programado es capaz de predecir el comportamiento real de una planta de secado se procede a

<sup>39</sup> Figueredo M. Rcardo R. González. (2017). Evaluation of the frying of the Musa paradisiaca (banana) using the SBAN laboratory apparatus.

realizar la comparación entre los valores de la humedad en base seca y la humedad libre obtenidos en el artículo de Figueredo M. y los valores obtenidos en la simulación bajo las mismas condiciones de operación indicadas en el artículo.

Es pertinente mencionar que no se realizó la comparación para la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante ya que, en el artículo, aunque se menciona que se monitorio la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo mas no se indica el valor de esta última durante del proceso de secado por lo cual no es posible realizar el cálculo ni el análisis de forma correcta sin valor de esta variable.

En la tabla 3. A continuación se muestran los resultados de la humedad en base seca tanto del modelo simulado en la hoja de cálculo como los resultados obtenidos en el artículo, los resultados obtenidos mediante la simulación se identifican en la columna  $X_{S1}$  mientras que los resultados del artículo se encuentran en la columna  $X_{S2}$ .

Tabla 3 Resultados de la humedad en base seca.

$X_{S1}$	$X_{S2}$
1.34740	1.3474
1.21567	1.2421
1.08658	1.1263
0.95485	0.9474
0.825576	0.8916
0.69403	0.6211
0.56493	0.5158
0.30411	0.3895

Fuente. Elaboración propia.

Una vez se obtuvieron los resultados de la simulación se calculó el valor absoluto del error entre los datos con la siguiente expresión, considerando los resultados del artículo como el valor teórico y los resultados de la simulación como los valores experimentales:

Ecuación 22. Cálculo del valor absoluto del error

$$Error = \left| \frac{Valor\ teórico - Valor\ real}{Valor\ teórico} \right| = \left| \frac{X_{S2} - X_{S1}}{X_{S2}} \right|$$

Conociendo el valor del error entre cada par de datos se procede a realizar el promedio de estos lo que da como resultado un promedio de 7.127% de error en el cálculo de las humedades en base seca con respecto a los resultados obtenidos en el artículo.

Tabla 4. Resultados de la humedad libre.

$X_{IS1}$	$X_{IS2}$
1.2947	1.2947
1.1629	1.1895
1.0338	1.0737
0.9021	0.8947
0.7731	0.7789
0.6413	0.6211
0.5122	0.5158
0.2514	0.3895

Fuente. Elaboración propia.

De modo similar en la tabla 4 se presentan los resultados de la humedad libre obtenidos a partir de la simulación ( $X_{IS1}$ ) y los presentados en el artículo ( $X_{IS2}$ ), a diferencia de la humedad en base seca el error promedio entre las humedades libres es de 5.865%.

Se debe tener en cuenta que el valor de los errores puede ser ocasionado por el uso de una velocidad de aire de 9.1 m/s ya que como se mencionó anteriormente el modelo con el cual se realizó la simulación es aconsejable usar flujos de aire entre 0.61 y 7.6 m/s.

## 4. GUÍA PLANTA PILOTO PLANTA DE SECADO

Con el fin de lograr una buena manipulación de los equipos dentro de la planta piloto adquirida por la fundación universidad américa se realizarán 2 guías prácticas con fines pedagógicos y una guía teórica. La guía teórica contendrá los conceptos básicos sobre la operación en este caso específicamente sobre el proceso de secado, además de contener información sobre las normas de seguridad.

La segunda guía corresponde a la primera guía práctica la cual se espera sea empleada durante las prácticas en el equipo de secado, esta tendrá la información sobre los objetivos de la práctica los materiales que serán empleados y el procedimiento que deberá ser llevado a cabo.

### 4.1 GUÍA INTRODUCTORIA AL MANEJO DE LA PLANTA DE SECADO

El desarrollo de una guía introductoria tiene como finalidad brindar a los estudiantes y maestros que operen en la planta piloto la información básica de seguridad que deben conocer y seguir con el propósito de evitar accidentes durante la manipulación de los equipos.

La guía introductoria está basada principalmente en las normas de seguridad NTC 1461 y NTC 3458 las cuales como se observa a continuación brinda información sobre las señales ubicadas dentro de la planta piloto, además de permitir identificar los tipos de tuberías que se encuentran en la planta y que tipos de sustancias son transportadas por ellas.

4.1.1 Normas de seguridad. Durante la estadía en la planta piloto adquirida por la Fundación Universidad de América es necesario conocer las normas de seguridad entre las cuales se encuentra la norma NTC 3458: 1992 la cual suministra la información correspondiente a las figuras y el código de colores de las señales ubicadas en la planta además de especificar los colores para la identificación de la tubería.

Inicialmente es pertinente conocer el color y el significado de este en las tuberías, según la norma estos colores indican que tipo de sustancia es transportada por estos, aunque en el proceso de secado se emplean principalmente corrientes de agua líquida y aire es necesario saber identificar todas las tuberías ya que la planta de secado será instalada junto a otros diferentes equipos como el banco de reactores, los que emplean corrientes con diferentes tipos de fluidos.

Tabla 5 Identificación del color de tubería norma NTC 3458.

<b>Contenido del tubo</b>	<b>Nombre del color</b>
Agua	Verde
Vapor	Gris-plata
Aceites (mineral, vegetal o animal). Combustibles líquidos.	Marrón
Gases (en condición gaseosa o licuada) excepto aire.	amarillo ocre
Ácidos y álcalis	Violeta
Aire	azul claro
Otros líquidos	Negro
Servicios eléctricos y conductos de ventilación	Naranja

Fuente. Norma NTC 3458.

Por otra parte, en la norma NTC 1461:1987 nos brinda la información necesaria sobre las figuras y los colores de las señales que deben encontrar se ubicadas en la planta piloto.

A continuación, se realizará una explicación sobre los colores y las señales de seguridad cuyo propósito es llamar la atención rápidamente hacia objetos o situaciones que afecten la seguridad y la salud. Las señales de seguridad deben ser empleadas solo en casos donde se vea involucrada la seguridad y/o salud.

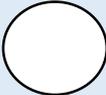
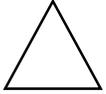
Tabla 6. Significado de los colores de seguridad.

<b>Color de seguridad</b>	<b>Significado u objetivo</b>	<b>Ejemplos de uso</b>
Rojo	Pare Prohibición	Señales de pare Paradas de emergencia Señales de prohibición
Azul	Acción de mando	Obligación de vestir equipo de protección personal
Amarilla	Precaución, riesgo de peligro	Indicaciones de peligro (Fuego, explosión, intoxicación, etc.)
Verde	Condición de seguridad	Salidas de emergencia, estaciones de primeros auxilios y rescate.

Fuente. Norma NTC 1461 higiene y seguridad.

A parte de los colores las señales también poseen formas especiales las cuales tienen significados, a continuación, en la tabla 7 se evidencian las formas que pueden tener estas señales y sus significados.

Tabla 7. Forma geométrica y significado de las señales.

Forma	Significado
	Prohibición o acción de mando.
	Prevención
	Información.

Fuente. Normal NTC 1461 Higiene y seguridad.

A continuación, exponen las señales que deben estar ubicadas en la planta de secado, con su significado, estas se dividirán en tablas según el tipo de señal que sean.

Tabla 8. Señales advertencia.

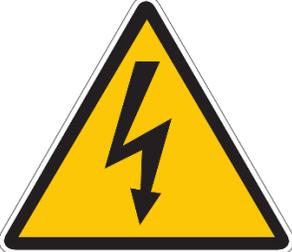
 <p data-bbox="480 1352 708 1383">Riesgo eléctrico</p>	 <p data-bbox="1032 1352 1325 1383">Riesgo de incendios</p>
 <p data-bbox="423 1652 764 1684">Riesgo caída de objetos</p>	 <p data-bbox="1049 1652 1308 1684">Superficie caliente</p>

Figura 8. Señales de obligación.



Fuente. Gestión calidad consulting. (2016). Señalización de riesgos laborales.

4.1.2 Recomendaciones de seguridad. Durante la permanencia en la planta piloto y para el uso de la planta de secado se realizan las siguientes recomendaciones de seguridad las cuales buscan evitar accidentes en los cuales las personas puedan salir afectadas y en los cuales se les causen daños a los equipos.

- Operar el proceso con mínimo dos personas para evitar accidentes, y respaldar y/o relevar en las actividades del proceso. Informar a la persona responsable el inicio y parada de operación en la planta.
- Operar el equipo en una zona con ventilación adecuada para evitar acumulación de vapores de solventes. De lo contrario se pueden generar atmosferas inflamables o asfixiantes.
- Mantenga en un lugar accesible un botiquín de primeros auxilios.
- Mantenga en un lugar accesible un extintor de fuego.
- No separarse de las unidades de proceso por tiempo prolongado. Si es necesario ausentarse, avisar al relevo.
- Las personas que operan el equipo no deben trabajar más de 8 horas continuas sin descanso, el cansancio puede propiciar accidentes graves.
- Evitar el acceso al panel interno de las cajas eléctricas.
- No exceder los límites establecidos para las variables de operación.
- Desocupar el reservorio de agua si el equipo no se va a emplear durante un periodo prolongado.

- Dejar los equipos limpios después de la operación evitando la corrosión y la contaminación cruzada entre lotes de procesamiento.
- Para descargar el tanque siempre utilizar overol, guantes de carnaza y si es posible una pechera del mismo material para evitar quemaduras si el material aún está caliente.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Mantener limpia y aseada el área de operación, y el tablero de control.

#### 4.2 GUÍAS EXPERIMENTALES PLANTA DE SECADO

Se ha planteado elaborar dos guías prácticas para el uso de la planta de secado, los temas principales de estas serán: la influencia de la dirección del flujo de aire en el proceso de secado, para el desarrollo de esta práctica se aprovechara la capacidad del equipo ya que este cuenta con compuertas laterales y verticales en la cámara de secado, en donde se buscara que además de aprender a usar la planta los estudiantes logren identificar que efecto tiene la dirección del aire en el proceso de secado.

La segunda guía experimental será del efecto de la variación de la temperatura y velocidad del aire en el proceso de secado para lo cual se plantea realizar 3 repeticiones del proceso de secado, dos manteniendo la velocidad del aire constante y variando la velocidad y el tercer ensayo seleccionando una de las 2 temperaturas previamente empleadas y variar la velocidad del aire, con el fin de tener suficiente información para realizar el análisis de resultados.

El documento de las guías prácticas se encontrará al final en la sección de anexos, estas guías prácticas se desarrollarán como un juego de roles en donde cada estudiante que entre a la planta piloto asuma un rol como si este perteneciese a una fábrica con la finalidad de brindar una experiencia aún más real al ámbito laboral, además de permitir identificar las tareas básicas de cada rol de trabajo dentro de una fábrica.

4.2.1 Selección del material a secador durante las prácticas. Debido a que la planta de secado se espera sea empleada para diversos fines, ya sean con fines prácticos o con fines de investigación se propone secar materiales orgánicos frescos como frutas, ya que el componente a separar en este tipo de materiales es agua.

El cual tiene buena compatibilidad con los diferentes materiales, de los cuales se encuentra compuesta la planta de secado, tal como se puede evidenciar en la sección de Anexos tabla de compatibilidad o la tabla de compatibilidad extendida en la que a diferencia de la tabla de compatibilidad se incluye una mayor cantidad de sustancias,

De igual manera es aconsejable emplear elementos orgánicos en el proceso de secado ya que se evita el riesgo de contaminación con sustancias tóxicas y/o peligrosas que puedan influir en la seguridad o resultados de futuras prácticas o investigaciones.

En relación a lo anterior, se realizó la búsqueda de información de procesos de secado de diferentes frutas con el fin de lograr seleccionar la mejor opción basados principalmente el tiempo de secado que requiere cada una de estas, las frutas analizadas son: manzana, uchuva, fresas, plátano y perejil.

Se tomó como el factor más importante el tiempo de secado debido a que los procesos de secado normalmente son procesos largos que requieren de un tiempo de operación extenso, por lo cual es importante minimizar esta variable con el fin de lograr realizar las prácticas en periodos de tiempo no muy extensos, ya que entre las recomendaciones de seguridad como se mencionó anteriormente se encuentra la indicación de no trabajar más de ocho horas seguidas.

Entre la revisión bibliográfica realizada se encontró el proceso de secado de la manzana, el cual fue un estudio realizado Barraza en donde se realiza la curva de secado de manzana en este estudio es posible observar que el tiempo requerido para secado de esta es de aproximadamente 220 min o 3.66 h<sup>40</sup>.

Por otra parte se observa el estudio del secado de fresas realizado por Alvarado en el 2017 sin embargo este estudio se realizó para el secado de fresas en un horno microondas, el cual como se ha mencionado anteriormente no emplea aire caliente para suministrar el calor necesario al proceso, es por esto que el secado en equipos de microondas suele ser más corto, en este estudio el secado tardó alrededor de 45 min<sup>41</sup>, pero al realizar la comparación con el estudio realizado por Luis Santana este toma 7 horas<sup>18</sup> y este si es llevado a cabo con la ayuda de un secado de bandejas, por la gran cantidad de tiempo requerido para secar este material en un secador de bandejas descarta la fresa como posible material para las prácticas.

El estudio realizado para del proceso de secado del perejil muestra que se desarrolló durante 120 min (2 h) a una temperatura de 50 °C<sup>42</sup>, mientras que el proceso de secado del plátano se realizó por completo en un secador de bandejas en 1.57 h (94.2 min) a 50°C<sup>43</sup>.

---

<sup>40</sup> Barraza G. (2013). Cinética de secado de rodajas de manzana (*Pirus malus L*) variedad pachacamac osmodeshidratadas.

<sup>41</sup> Alvarado M. (2017). Study of the strawberry drying process using microwave dryer.

<sup>42</sup> García M, Rugel J, Rodríguez E, Vargas E. (2010). Aprovechamiento de cilantro (*coriandrum sativum*) y perejil (*petroselinum crispum*) aplicando procesos combinados de deshidratación.

<sup>43</sup> Figueredo M, Rcardo R, González. (2017). Evaluation of the frying of the *Musa paradisiaca* (banana) using the SBAN laboratory apparatus.

Basado en la información anterior se empleará plátano como material en los procesos de secado durante las prácticas, debido a que el tiempo de uso de la planta seguramente se vea limitado por el uso de esta en diferentes horarios, por lo cual es necesario emplear un material cuyo tiempo de secado sea corto con el fin de lograr finalizar las practicas.

## 5. CONCLUSIONES

- Con la validación realizada, podemos observar que el porcentaje de error en el cálculo de la humedad en base seca es mayor que el error en el cálculo de la humedad libre, sin embargo, es necesario considerar que una parte del error obtenido pudo ser ocasionado debido a la velocidad del aire empleada en el artículo ya que en este se empleó una velocidad de 9.1 m/s y en la explicación del modelo se menciona que es aconsejable usar velocidades menores a 7.6 m/s para flujos paralelos.
- Con el desarrollo del proyecto se realizó la programación del modelo matemático expuesto el cual permite predecir el comportamiento del equipo, este software servirá como una herramienta educativa para los individuos que manipulen la planta de secado.
- Para establecer los procedimientos de caracterización del equipo se señalan las características que deberá tener el equipo adquirido por la Universidad América para facilitar esta tarea se han diseñado diferentes formatos como las listas de chequeo.
- Se generó material pedagógico el cual comprende la elaboración de dos guías prácticas del uso de la planta de secado y una guía teórica la cual da a conocer las normas de seguridad y las sugerencias que se deben tener en cuenta antes de operar la planta.

## 6. RECOMENDACIONES

- Realizar la curva de secado de diferentes materiales a distintas condiciones de operación con el fin de determinar los materiales y las condiciones óptimas a las cuales se puedan llevar a cabo las prácticas en la planta, teniendo en cuenta el tiempo de duración de dichas prácticas y los posibles futuros usos de la planta.
- Incluir la información solicitada a los fabricantes de la planta de secado por medio del cuestionario el cual fue enviado, con el fin de completar la caracterización de la planta de secado.
- Se debe tener en cuenta que los procesos de secado realizados en secadores de bandejas normalmente son procesos largos los cuales requieren una gran cantidad de tiempo, por lo que es necesario evaluar si es posible realizar las prácticas en 3 horas o si es pertinente ampliar el tiempo para la realización de estas.
- Ajustar la señalización de la planta de secado a las normas NTC 1461:1987 y NTC3458:1992 en caso de que esta aún no se encuentre instalada o se realizar sin tener encuentra ningún tipo de normativa, en caso de que se realizara basada en otras normas indicar las principales diferencias con las normas anteriormente mencionadas.

## BIBLIOGRAFIA

A.K Babu 2018 review of leaf drying mechanism and influencing parameters, drying method, nutrient preservation, and mathematical models

AGUIRRE, R. J.; GABITO, J. F.; CHIRIFE, J. (1985). Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by the internal diffusion. *Journal of Food Technology*

Alvarado M. (2017). Study of the strawberry drying process using microwave dryer. Bahadori, & Alireza. (2016). Chapter 10 - solids handling systems and dryers. *Essentials of oil and gas utilities* (pp. 423-488) Elsevier Inc.10.1016/B978-0-12-803088-2.00010-9

Barraza G. (2013). Cinética de secado de rodajas de manzana (*Pirus malus L*) variedad pachacamac osmodeshidratadas.

Bensebia O, Allia K. (2015). Drying and extraction kinetics of rosemary leaves: experiments and modeling. *J Essent Oil Bear Plants*

Broughton G., Gilman L. I. (1952). A flexible laboratory infrared heater-dryer  
Carl E. Berg. *Volviendo a lo basico: psicometría y la carta psicométrica*

Cheremisinoff, Nicholas P. (2000). *Handbook of Chemical Processing Equipment*. (pp. 124-161). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHCPE0003/handbook-chemical-processing/handbook-chemical-processing>

CRANK, J. (1975). *The mathematical of diffusion*. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 414 p.

Dhib R. (2007) *Infrared Drying: From Process Modeling to Advanced Process Control*

Edgar Mauricio Vargas Solano, & Fredy Alexander Garzón Rodríguez. (2010b). Designing, assembly and start up for a semiautomatic hot-air tray dryer. *Ingeniería E Investigación*, 30(2), 43-51. Retrieved from <https://doaj.org/article/cd2a0fad83c24770a2a97ed0d40f2376>

Eficiencia en bombas. (2018). Retrieved from <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/eficienciaenbombas/eficienciaenbombas.html>

Erbay Zafer, Icier Filiz. (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology.

Espinoza v, Menjívar A, Najarro A. (2018). Diseño, construcción y caracterización de un secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos.

Figueredo M. Rcardo R. González. (2017). Evaluation of the frying of the Musa paradisiaca (banana) using the SBAN laboratory apparatus.

García M, Rugel J. Rodríguez E, Vargas E. (2010). Aprovechamiento de cilantro (*coriandrum sativum*) y perejil (*petrosilenum cruspum*) aplicando procesos combinados de deshidratación.

Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

Gestión calidad consulting. (2016). Señalización de riesgos laborales

Giraldo A, Arévalo A. Silva A. Valdes J. Pavlak M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas

Hernández Elva, Espectro visible (2013). Universidad nacional de México.

Industrial, J., & Industrial, J. (2018). Aspectos fundamentales detrás del PT100. Retrieved from <https://www.jmi.com.mx/literatura/blog/item/6-resistencias-calefactoras.html>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

Laidler, Keith. Meiser. (2002). Fisicoquímica

Luis Santana., David Cubillos (2016) Propuesta de diseño de un deshidratador tipo bandeja para la producción de frutas orgánicas tipo snacks para ecovital orgánico.

Misha S, Mat S, Ruslan MH, Sopian K, Salleh E. (2013). The prediction of drying uniformity in tray dryer system using CFD simulation. Int J Mach Learn Comput

Misha S, Mat S, Ruslan MH, Sopian K, Salleh E. (2014). Comparison between 2D and 3D simulations of a tray dryer system using CFD software. World Appl Sci J

OCÓN; TOJO. "Problemas de Ingeniería Química". Capítulo 9. Aguilar. Madrid. 1974.

Peishi C, Pei DCT. (1989). A mathematical model of drying processes. *Int J Heat Mass Transf*

Premi Monica, Sharma Harish, (2012). Upadhyay Ashutosh. Effect of air velocity and temperature on the drying kinetics of drumstick leaves (*Moringa oleifera*).  
Processes solutions and equipment. (2018). Manual de operación secador de bandejas ref.SB500

Radunz Lauri Lourenco, Braun Heder. (2012). Effect of drying air velocity on the quality of essential oil from lemon grass.

Rajan R. (2002). Simulation of infrared drying process

Rocha Ronicely Pereira, Melo Evandro de Castro, Demuner Antonio Jacinto,

Sandra Sagrin M, Chong GH. (2013). Effects of drying temperature on the chemical and physical properties of *Musa acuminata* Colla (AAA group) leaves.

Sloan, C.E. (1967). Drying systems and equipment, *Chem. Eng.*, 167.

Solorzano, R. (2018). Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas. Retrieved from <https://www.hydraulicspneumatics.com/blog/principios-ingenieriles-b-sicos-bombas-hidr-ulicas>

Suárez Hernández, L., Barrera Zapata, R., & Forero Sandoval, A. F. (2016). Evaluación de alternativas de secado en el proceso de elaboración de harina de lombriz. *Corpoica Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 17(1), 55. 461

Tiempo, C. (2018). Uchuvas secas que llegan a 4 continentes desde Colombia. [Online] Portafolio.co. Available at: <http://www.portafolio.co/negocios/uchuvas-secas-que-llegan-a-4-continentes-desde-colombia-511593> [Accessed 16 Apr. 2018]

Torres J. (2016). Proceso de secado en lotes de granos de trigo en un sistema de lecho fluidizado.

TREYBAL Robert. Operaciones de transferencia de masa. McGraw-Hill. Estados Unidos. Segunda edición. 1988.

Universidad de Alicante. (2011). Mecánica de fluidos, Tema 2. Impulsión de fluidos.  
Yayaganbaba A. (2016). A scientific approach with bibliometric analysis related to brick and tile drying A review

Zhang Z, Yang S, Liu D. (1999). Mechanism and mathematical model of heat and mass transfer during convective drying of porous materials. *Heat TransfRes*.

# **ANEXOS**

## ANEXO A.

TABLA DE COMPATIBILIDAD QUÍMICA (FABRICANTES).

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Aceite de coco	A	A	A	D
Aceite de maíz	B	A	B	C
Aceite de motor	A	A	N/A	D
Aceite de oliva	B	A	A	D
Aceite de palma	A	A	A	A
Aceite hidráulico (petro)	A	A	A	D
Aceite hidráulico (sintético)	A	A	A	D
Aceite mineral	A	A	A	D
Aceites combustibles	A	B	B	D
Acetaldehído	E	A	D	A
Acetato de amilo	A	A	D	A
Acetato de isoamilo	A	N/A	D	B
Acetato de isobutilo	A	N/A	D	C
Acetato de isopropilo	C	A	D	B
Acetato de metilo	A	A	D	C
Acetato de sodio	B	A	D	A
Acetato de vinilo	B	A	D	B
Acetileno	A	A	A	A
Acetona	A	A	D	A
Ácido acético	D	A	B	A
Ácido acético 20%	B	A	B	A
Ácido acético 80%	D	A	B	A
Ácido acético glacial	C	A	D	B
Ácido benzoico	B	A	A	D
Ácido carbónico	B	A	A	B
Ácido cítrico	B	A	A	A
Ácido cítrico 5%	A	A	A	A
Ácido clórico	A	A	A	A
Ácido clorhídrico	D	A	N/A	N/A
Ácido clorhídrico 100%	D	A	A	D
Ácido clorhídrico 20%	D	A	A	A
Ácido clorhídrico 37%	D	A	A	C
Ácido cloro acético	D	A	D	B

Ácido clorosulfónico	D	A	D	D
Ácido crómico 5%	B	A	A	A
Ácido crómico 50%	C	A	A	B
Ácido esteárico	V	A	A	B
Ácido fórmico	C	A	C	A
Ácido fosfórico 10%	A	A	A	A
Ácido fosfórico 20%	A	A	A	A
Ácido fosfórico 50%	A	A	A	B
Ácido fosfórico concentrado	A	A	A	B
Ácido ftálico	B	A	B	A
Ácido láctico	B	A	A	A
Ácido láctico 5%	A	A	A	A
Ácido linoleico	B	A	B	D
Ácido monocloroacético	D	D	C	C
Ácido nítrico concentrado	A	A	A	D
Ácido nítrico 5-10%	A	A	A	B
Ácido nítrico 20%	A	A	A	B
Ácido nítrico 50%	B	A	A	D
Ácido oleico (red oil)	B	A	B	B
Ácido oxálico 5% (caliente y frío)	B	A	A	A
Ácido oxálico frío	D	A	A	A
Ácido palmítico	B	A	A	B
Ácido perclórico	D	A	A	B
Ácido salicílico	B	A	A	A
Ácido sulfúrico 95%	A	A	A	C
Ácido sulfúrico 75%	C	A	A	C
Ácido sulfúrico 60%	D	A	A	C
Ácido sulfúrico 50%	D	A	A	B
Ácido sulfúrico 25%	B	A	A	
Ácido sulfúrico 10%	A	A	A	A
Ácido sulfúrico < 10%	D	A	A	A
Ácido sulfúrico concentrado (frío)	C	A	B	C
Ácido sulfúrico concentrado (caliente)	D	A	A	D
Ácido úrico	B	A	N/A	N/A
Ácido grasos	B	A	A	D
Agua carbonatada	A	N/A	A	N/A

Agua de mar	C	A	A	A
Agua des ionizada	A	A	A	A
Agua destilada	A	A	A	A
Agua regia(80% HCl, 20% HNO <sub>3</sub> )	D	A	C	C
Alcohol amílico	A	A	A	A
Alcohol bencílico	B	A	A	B
Alcohol isobutílico	A	A	A	A
Almidón	B	A	A	B
Aminas	A	A	D	C
Amoniaco 10%	A	A	D	A
Amoniaco, liquido	N/A	A	D	A
Anhídrido ftálico	A	AA	A	A
Azúcar (líquidos)	A	A	A	A
Benceno	B	A	A	D
Benzaldehído	B	A	D	B
Benzoato de sodio	N/A	A	A	A
Bicarbonato de potasio	B	A	A	A
Bicarbonato de sodio	A	AA	A	A
Bisulfito de sodio	D	A	A	A
Bórax	B	A	A	A
Butano	A	A	A	D
Butanol	A	A	A	B
Buteno	A	N/A	A	D
Café	A	N/A	A	A
Carbonato de calcio	B	A	A	A
Carbonato de magnesio	B	A	A	C
Carbonato de sodio	A	A	A	N/A
Cetonas	A	A	N/A	A
Ciclohexano	B	A	A	D
Clorobenceno	A	B	A	D
Cloroformo	A	A	A	D
Coca cola	A	A	N/A	A
Colorantes	A	N/A	A	N/A
Detergentes	A	A	A	A
Dicromato de potasio	B	A	A	A
Diésel	A	A	A	D
Dietil éter	B	A	D	D

Dietilamina	A	D	A	B
Dietilenglicol	A	A	A	A
Difenilo	B	A	A	D
Dimetil formamida	A	A	C	B
Dióxido de azufre	D	A	A	B
Estireno	A	A	B	D
Etanol	A	A	A	A
Etanolamina	A	A	D	B
Éter de petróleo	A	D	D	A
Éter de isopropilo	A	A	D	D
Etil acetato	B	A	D	B
Etil éter	B	A	D	D
Etilenglicol	B	A	A	A
Fenol	B	A	A	N/A
Formaldehido 100%	A	A	D	A
Formaldehido 40%	A	A	A	A
Furfural	A	A	D	D
Gasolina	A	A	A	D
Gelatina	A	A	A	A
Glicerol	A	A	A	A
Glucosa (jarabe de maíz)	A	A	A	A
Heptano	A	A	A	D
Hexano	A	A	A	D
Hidroquinona	B	A	B	D
Hidrosulfito de sodio	N/A	A	A	B
Hidróxido de calcio 10% (en ebullición)	A	N/A	A	A
Hidróxido de magnesio	B	A	A	A
Hidróxido de potasio	B	A	B	A
Hipoclorito de sodio < 20%	C	A	A	B
Hidróxido de sodio 20%	B	A	C	N/A
Hidróxido de sodio 50%	B	A	D	B
Hidróxido de sodio 80%	D	A	A	B
Hidróxido de sodio 100%	D	A	A	B
Isobutanol	A	A	A	N/A
Isooctano	A	A	A	D
Isopropanol	B	A	A	B

Jet fuel (JP3, JP4, JP5)	A	A	A	D
Jugo de caña	A	A	A	A
Jugos de frutas	A	A	A	N/A
Lacas	A	A	A	D
Latex	A	A	A	A
Leche	A	A	A	A
Licor de azúcar de caña	A	A	A	A
Liquidos de remolacha	A	A	A	A
Lubricantes	A	A	A	D
Melaza	A	A	A	A
Metanol	A	A	C	A
Metasilicato de sodio	A	A	A	A
Metil butil cetona	A	N/A	D	B
Metil etil cetona	A	A	D	A
Metil isobutil cetona	B	A	D	C
Metil isopropil cetona	A	A	D	C
Metilamina	A	A	D	A
Miel	A	A	A	A
Monoetanolamina	A	A	D	B
Nafta	A	B	A	D
Naftalina	A	A	A	D
Nitrato de calcio	C	A	A	B
Nitrato de sodio	B	A	A	A
Nitrobenceno	B	A	B	D
Oxido de calcio	A	A	B	A
Oxido de magnesio	A	A	C	N/A
Pentano	C	A	A	D
Permanganato de potasio	B	A	A	A
Peróxido de hidrogeno 100%	B	A	A	D
Peróxido de hidrogeno 50%	B	A	A	B
Peróxido de hidrogeno 30%	B	A	A	B
Peróxido de hidrogeno 10%	B	A	A	A
Peróxido de sodio	B	A	A	A
Piridina	B	A	D	B
Propano (licuado)	A	A	A	D
Propanol	A	A	A	N/A
Propilenglicol	B	A	A	A

Propileno	B	A	A	D
Queroseno	A	A	A	D
Sulfato de calcio	B	A	A	A
Sulfato de magnesio	A	A	A	A
Sulfato de potasio	B	A	A	A
Sulfato de sodio	B	A	A	A
Sulfato de zinc	B	A	A	A
Tintas	C	A	A	A
Tiosulfato de sodio	B	A	A	A
Tolueno	A	A	C	D
Trietilamina	A	A	D	A
Urea	B	A	A	A
Vinagre	B	A	A	A
Xileno	B	A	B	D
Yodo	D	A	A	B

## ANEXO B.

TABLA DE COMPATIBILIDAD QUÍMICA EXTENDIDA.

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Aceite Crudo	A	A	A	*
Aceite de Alquitrán	A	A	A	D
Aceite de Castor	A	A	A	B
Aceite de Coco	*	A	A	A
Aceite de Grasa de Cerdo	*	A	A	B
Aceite de Linaza	A	A	A	D
Aceite de Maíz	B	A	A	C
Aceite de Oliva	A	A	A	B
Aceite de Palma	B	A	A	D
Aceite de Pino	A	A	A	D
Aceite de Soja	A	A	A	B
Aceite de Templado	A	A	A	*
Aceite de Transformador	A	A	A	*
Aceite Hidráulico (Base Petróleo)	A	A	A	D
Aceite Lubricante (Base Petróleo)	A	A	A	D
Aceite Vegetal	A	A	A	D
Aceites Animales	A	A	B	*
Aceites de Pescado	A	A	A	D
Aceites Minerales	A	A	A	D
Aceites Solubles	A	A	A	*
Acetaldehído	A	A	C	B
Acetamida	B	A	*	*
Acetato de Aluminio	A	A	D	A
Acetato de Amilo	A	A	D	B

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Acetato de Amonio	B	A	D	A
Acetato de Butilo	A	A	D	D
Acetato de Celulosa	B	A	D	B
Acetato de Cobre	*	A	D	B
Acetato de Etilo	B	A	D	C
Acetato de Metilo	A	A	D	B
Acetato de Plomo	*	A	B	B
Acetato de Sodio	A	A	A	B
Acetato de Vinilo	*	A	*	A
Acetato Isopropílico	*	A	*	D
Acetato Polivinílico	*	A	*	B
Acetileno	A	A	A	A
Acetona	A	A	D	A
Ácido Acético, 10 %	A	A	D	B
Ácido Acético, 80 %	D	A	D	C
Ácido Acético, aireado	*	A	C	*
Ácido Acético, crudo	B	A	D	*
Ácido Acético, glacial	*	A	C	B
Ácido Acético, libre de aire	*	A	D	*
Ácido Acético, puro	B	A	D	*
Ácido Arsénico	B	A	A	B
Ácido Benzoico	B	A	B	D
Ácido Bórico	B	A	A	B
Ácido Butírico	B	A	C	C
Ácido Cianídrico	A	A	A	B

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Ácido Cítrico	A	A	A	B
Ácido Clorosulfónico, seco	D	A	D	D
Ácido Cresílico	*	A	B	D
Ácido Crómico < 50 %	D	A	C	C
Ácido Crómico > 50 %	D	A	C	C
Ácido Esteárico	B	A	A	B
Ácido Fénico	*	A	A	B
Ácido Fluobórico	*	A	*	*
Ácido Fluorosilícico	*	A	C	C
Ácido Fórmico, caliente	D	A	A	*
Ácido Fórmico, frío	D	A	B	*
Ácido Fosfórico, 10 %	B	A	A	B
Ácido Fosfórico, 50 % caliente	B	A	A	B
Ácido Fosfórico, 50 % frío	B	A	A	B
Ácido Fosfórico, 85 % caliente	D	A	*	*
Ácido Fosfórico, 85 % frío	B	A	B	*
Ácido Gálico 5 %	B	A	A	C
Ácido Hidrofluosilícico	*	A	A	B
Ácido Láctico Concentrado, caliente	D	A	B	B
Ácido Láctico Concentrado, frío	B	A	A	B
Ácido Láctico Diluido, caliente	B	A	D	*
Ácido Láctico Diluido, frío	A	A	A	B
Ácido Linoleico	A	A	B	D
Ácido Maleico	B	A	A	D
Ácido Málico	*	A	A	*

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Ácido Nicotínico	*	A	B	D
Ácido Nítrico, 10 %	A	A	A	*
Ácido Nítrico, 100 %	B	A	B	D
Ácido Nítrico, 30 %	A	A	A	B
Ácido Nítrico, 80 %	A	A	B	D
Ácido Nítrico Anhidro	*	A	A	D
Ácido Nitroso, 10 %	*	A	A	*
Ácido Olaico	B	A	C	*
Ácido Oleico	B	A	A	D
Ácido Oxálico	B	A	A	B
Ácido Palmítico	B	A	A	B
Ácido Pírico	B	A	B	B
Ácido Pirogalico	A	A	A	*
Ácido Salicílico	*	A	A	B
Ácido Sulfúrico, 0 a 77 %	D	A	A	*
Ácido Sulfúrico, 100 %	B	A	B	C
Ácido Sulfuroso	D	A	A	C
Ácido Tánico	B	A	A	B
Ácido Tartárico	B	A	A	B
Ácido Tricloroacetico	*	A	D	*
Ácido Úrico	*	A	*	*
Ácidos Grasos	*	A	A	D
Acrlonita	*	A	C	D
Agua Carbonatada	A	A	A	A
Agua Clorada	D	A	A	*

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Agua de Mar	B	A	A	A
Agua Destilada	A	A	A	B
Agua Oxigenada, concentrada	B	A	B	B
Agua Oxigenada, diluida	B	A	A	B
Aguarrás	B	A	A	D
Aguas Cloacales	B	A	B	B
Aire	A	A	A	A
Alcohol Amílico	A	A	B	A
Alcohol Butílico	A	A	A	C
Alcohol de Óleum	B	A	A	D
Alcohol Diacetona	A	A	D	B
Alcohol Etílico	B	A	A	A
Alcohol Isopropílico	B	A	A	A
Alcohol Metílico	B	A	C	A
Alcohol Propílico	B	A	A	A
Alcoholes Grasos	B	A	*	*
Aldehído Benzoico	*	A	D	A
Almidón	B	A	A	C
Alquitrán	A	A	*	D
Alquitrán para caminos	A	A	A	D
Alumbre	*	A	B	*
Alumbre Amoniacal	B	A	*	*
Alumbre de Cromo	B	A	B	B
Alúmina	B	A	*	A
Aluminato de Sodio	B	A	A	B

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Aminas	B	A	D	C
Amoníaco (solución)	A	A	D	B
Amoníaco Acuoso	A	A	A	*
Anhídrido Amoniacal líquido	*	A	D	B
Anhídrido Acético	B	A	D	C
Anhídrido Fosfórico	*	A	B	*
Anhídrido Maleico	*	A	B	D
Anilina	B	A	C	C
Azúcar, Jarabe y Mermelada	A	A	*	*
Azufre	D	A	B	B
Azufre Fundido	D	A	B	B
Barniz	B	A	B	D
Benceno (Benzol)	B	A	B	D
Benzoato de Sodio	*	A	*	*
Bicarbonato de Amonio	B	A	A	A
Bicarbonato de Potasio	B	A	*	*
Bicarbonato de Sodio	B	A	A	A
Bicromato de Potasio	B	A	B	*
Bicromato de Sodio	A	A	*	*
Bisulfato de Magnesio	*	A	B	B
Bisulfato de Potasio	*	A	A	*
Bisulfato de Sodio, 10 %	*	A	A	B
Bisulfito de Calcio	D	A	A	D
Bisulfito de Potasio	B	A	A	B
Bisulfito de Sodio, 10 %	B	A	A	B

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Bisulfuro de Carbono	B	A	A	D
Bisulfuro de magnesio	*	A	B	B
Borato de Sodio	B	A	A	B
Bromo, seco	*	A	B	D
Bromuro de Amonio, 5 %	*	A	*	*
Bromuro de Etilo	*	A	B	B
Bromuro de Metilo	*	A	B	D
Bromuro de Plata	B	A	*	*
Bromuro de Potasio	B	A	A	B
Bromuro de Propilo	*	A	B	B
Bromuro de Sodio, 10 %	*	A	A	B
Bromuro de Zinc	*	A	B	B
Butadieno	A	D	B	C
Butano	A	A	A	D
Butileno	A	A	D	D
Café	A	B	A	A
Carbonato de Amonio	B	A	B	A
Carbonato de Bario	B	A	A	A
Carbonato de Calcio	B	A	A	B
Carbonato de Cobre	*	A	*	*
Carbonato de Magnesio	A	A	B	B
Carbonato de Manganeso	*	A	*	*
Carbonato de Potasio	B	A	A	B
Carbonato Sodio	A	A	A	B
Caseína	B	A	B	B

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Ceras	A	A	A	C
Cerveza	A	A	A	B
Cetonas	A	A	D	D
Cianuro de Bario	D	A	B	B
Cianuro de Cobre	B	A	B	B
Cianuro de Mercurio	B	A	A	A
Cianuro de Plata	B	A	B	*
Cianuro de Potasio	D	A	A	A
Cianuro de Sodio	B	A	A	B
Ciclohexano	B	A	A	D
Ciclohexanona	B	A	*	*
Citrato de Amonio Ferroso	D	A	*	*
Citrato de Sodio	D	A	*	*
Clorato de Calcio	D	A	B	B
Clorato de Potasio	B	A	A	B
Clorato de Sodio	B	A	A	B
Cloro gas, seco	B	A	B	D
Clorobenceno, húmedo	B	A	A	D
Clorofila, seca	*	A	B	B
Cloroformo, seco	A	A	B	D
Cloruro de Acetileno	*	A	D	D
Cloruro de Aluminio (solución)	D	A	A	*
Cloruro de Aluminio, seco	D	A	A	A
Cloruro de Amilo	*	A	D	D
Cloruro de Amonio	D	A	A	A

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Cloruro de Bario	B	A	A	A
Cloruro de Calcio	D	A	A	B
Cloruro de Etilo, húmedo	*	A	B	B
Cloruro de Etilo, seco	A	B	B	C
Cloruro de Litio	*	A	B	B
Cloruro de Magnesio	D	A	A	A
Cloruro de Mercurio	D	A	A	A
Cloruro de Metileno	D	A	C	D
Cloruro de Metilo	B	A	B	D
Cloruro de Níquel	B	A	A	B
Cloruro de Potasio	D	A	A	A
Cloruro de Sodio	B	A	A	B
Cloruro Ferroso	D	A	A	A
Cloruro Polivinílico	*	A	*	B
Cloruros de Azufre	*	A	A	C
Cola	B	A	A	B
Colorantes de Anilina	B	A	B	C
Combustible JP 4	A	A	A	*
Combustible JP 5	A	A	A	*
Combustible JP 6	A	A	A	*
Combustible para Quemadores	A	A	A	*
Cromato de Potasio	A	A	B	B
Cromato de Sodio	A	A	A	B
Detergentes Sintéticos	B	A	A	B
Dextrina	*	A	B	B

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Dicloroetano	B	A	*	D
Dicloroetil Éter	*	A	D	D
Dicromato de Potasio	*	A	A	B
Diesel Oil	A	A	A	D
Dietil Benceno	*	A	*	D
Dietilamina	B	A	D	C
Dietilenglicol	B	A	B	A
Dioxano	D	A	D	C
Dióxido de Azufre, húmedo	B	A	*	B
Dióxido de Azufre, seco	B	A	A	A
Dióxido de Carbono, seco	B	A	B	B
Dipentano	*	A	B	D
Emulsión de Resina	*	A	B	*
Esencias Minerales	*	A	A	*
Esmalte	*	A	*	D
Estireno	B	A	B	D
Etano	B	A	A	D
Eter Isopropílico	A	A	D	D
Eteres	A	A	C	D
Etil Eter	A	A	D	C
Etilacrilato	*	A	D	D
Etilbenceno	*	A	*	C
Etilencloruro	*	A	D	D
Etilendicloruro	*	A	D	*
Etilenglicol	*	A	A	D

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Fenol	A	A	B	A
Ferricianuro de Potasio	B	A	A	D
Ferrocianuro de Potasio	C	A	A	B
Ferrocianuro de Sodio	C	A	*	*
Fluidos Siliconados	C	A	B	*
Fluor Gas, seco	C	A	*	*
Fluoruro de Aluminio	*	A	A	A
Fluoruro de Sodio	*	A	A	B
Fosfato de Amonio	*	A	A	A
Fosfato de Calcio	*	A	B	B
Fosfato de Potasio	*	A	A	A
Fosfato de Sodio	*	A	A	A
Fosfato de Tributilo	*	A	D	B
Fosfato Di-básico de Amonio	B	A	A	*
Fosfato Di-básico de Sodio	B	A	A	A
Fosfato Disódico	*	A	B	*
Fosfato Ester	C	A	*	A
Fosfato Tri-básico de Amonio	B	A	A	*
Fosfato Tri-básico de Sodio	B	A	A	A
Fosfato Trisódico	*	A	B	B
Freon 11, MF, 112, BF	B	A	D	C
Freon 113, TF	B	A	C	C
Freon 12, 13, 32, 114	B	A	D	A
Freon 21, 30	B	A	D	D
Freon 22	B	A	D	D

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Freon Gas, seco	A	A	C	C
Freon Gas, húmedo	F	A	D	B
Fuel Oil	B	A	A	D
Gas Amoniaco, caliente	A	A	D	A
Gas Licuado del Petróleo	B	A	A	D
Gas Manufacturado	B	A	A	*
Gas Natural	A	A	A	D
Gas Natural, ácido	A	A	A	D
Gas Odorizante	B	A	A	*
Gas Propano	B	A	A	D
Gases de Combustión	B	A	C	D
Gases Nitrosos	B	A	*	*
Gasolina con Plomo	A	A	A	*
Gasolina sin Plomo	A	A	A	*
Gasolina Sulfurada	B	A	A	D
Gasolina, aviación	A	A	A	*
Gasolina, refinada	A	A	A	D
Gelatina	A	A	A	A
Glicerina (Glicerol)	A	A	B	A
Glicol	B	A	A	A
Glicol Amina	D	*	D	D
Glucosa	A	A	A	A
Grafito	*	A	B	B
Helio, gas	A	A	B	B
Heptano	A	A	A	D

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Hexafluoruro de Azufre	B	A	*	*
Hexano	*	A	A	D
Hidrato de Bario	*	A	*	*
Hidrogeno gas, caliente	*	A	*	B
Hidrogeno gas, frio	A	A	A	B
Hidrosulfito de Zinc	*	A	A	A
Hidróxido de Sodio, 20 % caliente	A	A	C	B
Hidróxido de Sodio, 20 % frio	A	A	B	B
Hidróxido de Sodio, 50 % caliente	B	A	C	*
Hidróxido de Sodio, 50 % frio	A	A	C	B
Hidróxido de Sodio, 70 % caliente	B	A	C	B
Hidróxido de Sodio, 70 % frio	B	A	C	B
Hidróxido de Aluminio	A	A	A	A
Hidróxido de Amonio, 28 %	B	A	A	B
Hidróxido de Amonio, concentrado	B	A	A	A
Hidróxido de Bario	B	A	A	B
Hidróxido de Calcio	A	A	A	A
Hidróxido de Magnesio	A	A	A	A
Hidróxido de Magnesio, caliente	A	A	A	*
Hidróxido Férrico	A	A	*	*
Hipoclorito de Sodio	D	A	A	*
Sodio Hiposulfito de Sodio	*	A	*	*
Iodoformo	B	A	A	*
Ioduro de Potasio	B	A	A	B
Iso-Butano	*	A	*	D

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Iso-Octano	*	A	A	D
Jugo de Ananá	B	A	A	*
Jugo de Manzana	B	A	*	B
Jugo de Tomate	B	A	A	*
Jugos Cítricos	B	A	A	*
Jugo de Caña de Azúcar	B	A	A	B
Jugos de Frutas	B	A	A	A
Kerosene	A	A	A	D
Lactato de Sodio	A	A	B	*
Lactosa	*	A	A	B
Leche y derivados	A	A	A	A
Lecitina	*	A	*	D
Licor de Amoniaco	*	A	B	*
Licor Polisulfuroso	*	A	A	B
Líquidos de Freno	D	A	B	B
Líquidos Azucarados	A	A	*	B
Mayonesa	A	A	B	*
Melaza Comestible	A	A	D	*
Melaza Impura	A	A	A	*
Mercurio	A	A	A	A
Metafosfato de Sodio	*	A	*	B
Metano	B	A	A	*
Metanol	A	A	B	D
Metasilicato de Sodio, caliente	B	A	*	*
Metasilicato de Sodio, frio	B	A	B	*

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Metilacetona	A	A	D	A
Metilamina	B	A	D	B
Metilcelulosa	B	A	*	*
Metiletilcetona	B	A	D	B
Mezcla de Ácidos (frío)	*	A	B	D
Mezclas Agua – Petróleo	B	A	A	*
Monoclorobenceno, seco	*	A	*	*
Monosulfato de Amonio	*	A	*	*
Monóxido de Carbono	B	A	B	B
Mostaza	A	A	A	*
Naftaleno	B	A	A	D
Nitrato Cúprico	*	A	*	*
Nitrato de Aluminio	*	A	D	B
Nitrato de Amonio	A	A	A	A
Nitrato de Bario	A	A	*	*
Nitrato de Calcio	B	A	*	B
Nitrato de Cobre	B	A	A	B
Nitrato de Magnesio	A	A	B	*
Nitrato de Níquel	B	A	A	A
Nitrato de Plata	A	A	A	A
Nitrato de Potasio	B	A	A	B
Nitrato de Sodio	A	A	A	B
Nitrato de Férrico	D	A	A	A
Nitrato de Mercurio	*	A	B	*
Nitrito de Sodio	B	A	B	A

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Nitrobenceno	B	A	C	C
Nitrógeno	A	A	A	B
Oleum	B	A	C	D
Óxido de Etileno	B	A	D	D
Óxido Nitroso	*	A	A	*
Oxígeno	A	A	A	A
Ozono, húmedo	A	A	B	B
Ozono, seco	A	A	B	A
Parafina	A	A	A	D
Para formaldehído	B	A	*	D
Paraldehído	*	A	*	D
Pentano	A	A	A	D
Perborato de Sodio	*	A	A	A
Percloroetileno, seco	A	A	A	D
Permanganato de Potasio	B	A	A	B
Peróxido de Sodio	B	A	A	A
Persulfato de Amonio	*	A	B	B
Petrolato	*	A	A	*
Petróleo Refinado	A	A	A	D
Pinturas y Solventes	B	A	B	D
Polifosfato de Sodio	*	A	*	A
Propilenglicol	*	A	A	B
Pulpa de Papel	B	A	B	B
Resina	B	A	A	*
Resinas de Melamina	*	A	*	*

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Resorcinol	*	A	*	*
Sal	B	A	A	*
Salicilato de Sodio	A	A	*	*
Salmuera	B	A	B	B
Sangre (Jugos de Carne)	*	A	B	B
Silicato de Calcio	*	A	B	B
Silicato de Etilo	*	A	B	B
Silicato de Sodio	B	A	A	B
Silicato de Sodio, caliente	B	A	*	B
Soda Cáustica	A	A	B	B
Solución de Jabón (Estereato)	A	A	A	A
Solución Electrolítica de Cianuro	*	A	B	B
Solución de Sales saturadas	*	A	A	A
Solución Electrolítica de Plata	*	A	*	*
Soluciones Fertilizantes	*	A	*	*
Solventes Aromáticos	A	A	*	D
Solventes Clorados	B	A	C	D
Solventes de Acetato	B	A	D	*
Sulfato de Magnesio	A	A	A	A
Sulfato de Manganeso	A	A	B	B
Sulfato de Aluminio	B	A	A	A
Sulfato de Amonio	B	A	B	A
Sulfato de Bario	B	A	A	B
Sulfato de Berilio	B	A	B	B
Sulfato de Calcio	B	A	A	B

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Sulfato de Cobre	B	A	A	A
Sulfato de Cromo	B	A	B	B
Sulfato de Etilo	*	A	A	C
Sulfato de Níquel	B	A	A	B
Sulfato de Níquel Amonio	B	A	D	B
Sulfato de Plomo	*	A	B	B
Sulfato de Potasio	B	A	A	A
Sulfato de Sodio	B	A	A	A
Sulfato de Zinc	B	A	A	A
Sulfato de Dietílico	*	A	B	C
Sulfato de Férrico	B	A	A	A
Sulfato de Ferroso	B	A	A	A
Sulfato de Ferroso, saturado	B	A	B	B
Sulfato, Licor blanco	B	A	C	*
Sulfato, Licor Negro	B	A	C	B
Sulfato, Licor verde	B	A	C	*
Sulfito de Amonio	A	A	A	B
Sulfito de Potasio	A	A	B	A
Sulfito de Sodio	A	A	B	B
Sulfuro de Amonio	*	A	D	A
Sulfuro de Bario	B	A	A	A
Sulfuro de Hidrógeno, húmedo	B	A	A	B
Sulfuro de Hidrógeno, seco	B	A	A	A
Sulfuro de Potasio	*	A	*	*
Sulfuro de Sodio	B	A	A	B

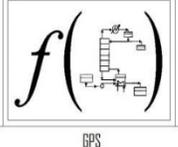
Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflon (PTFE)	Viton	EPDM
Tetraborato de Sodio	*	A	*	B
Tetracloruro de Carbono, húmedo	D	A	B	D
Tetracloruro de Carbono, seco	A	A	B	D
Tiosulfato de Sodio	B	A	A	A
Tolueno	A	A	B	D
Tricloroetileno	B	A	B	D
Tricloruro Fosforoso	B	A	B	B
Trietanolamina	*	A	*	B
Trietilamina	*	A	*	*
Trióxido de Azufre	*	A	B	*
Trióxido de Azufre, seco	*	A	A	B
Urea	A	A	D	B
Vapor de Agua (100°C)	A	A	C	B
Vapores de Ácido Acético	*	A	*	*
Vinagre	A	A	D	A
Whisky y Vinos	A	A	A	A
Xileno, seco	A	A	B	D

ANEXO C.  
LISTA DE CHEQUEO

Instrumento	Criterio de evaluación	Características	Medidas	Si	No
cámara de secado	Dimensiones	Longitud	40 cm		
		Alto	40 cm		
		Ancho	40 cm		
	Material de construcción	SS 304	XXXXX		
	Bandejas removibles (3)	Largo	30 cm		
		Ancho	30 cm		
		Apertura	5 mm		
		Malla de SS 304	XXXXX		
	Ductos de aire	Superior e inferior	XXXXX		
		Paredes laterales	XXXXX		
Sistema de ventilación	Ventilador	Centrifugo	XXXXX		
		Axial	XXXXX		
		Regulador de velocidad	XXXXX		
		Material:	XXXXX		
		Área boca de entrada			
		Área boca de salida			
	Filtro	Alto			
		Ancho			
		Material:	XXXXX		
	Sistema de adecuación de humedad	Tanque de almacenamiento	Material:	XXXXX	
volumen					
Bomba		Material:	XXXXX		

		Tipo:	XXXXXX		
<b>Instrumento</b>	<b>Criterio de evaluación</b>	<b>Características</b>	<b>Medidas</b>	<b>Si</b>	<b>No</b>
Sistema de calentamiento	Resistencias	Potencia máxima	6,75 KW		
		Regulador de potencia	XXXXXX		
Tablero de control	indicadores	Temperatura	XXXXXX		
		Humedad	XXXXXX		
	Sistema de encendido	Resistencias	XXXXXX		
		Bomba de agua	XXXXXX		
		Ventilador	XXXXXX		
		Variador de velocidad	XXXXXX		
		Termopares	XXXXXX		
Sensores	Instalados	Termo higrómetros (4)	XXXXXX		
		Termopar	XXXXXX		
		Anemómetro	XXXXXX		

ANEXO D.  
GUÍA PRÁCTICA 1.

	<p><b>Fundación universidad de américa</b></p> <p><b>Efecto de la dirección del aire en los procesos de secado</b></p> <p><b>Bogotá D.C.</b></p> <p><b>2018</b></p>	 <p>BPS</p>
---	---	--

**Normas generales.**

- Implementos básicos que debe traer cada estudiante para realizar la practica.
  - ✓ Overol
  - ✓ Gafas de seguridad.
  - ✓ Zapatos cerrados o botas.
  - ✓ Bitácora de laboratorio.
  - ✓ Para desocupar el tanque utilizar guantes de carnaza.
- Es necesario que cada estudiante prepare previamente la práctica, teniendo en cuenta el manejo del equipo, los materiales y los procedimientos que se realizaran.
- Previamente se deben consultar las hojas de seguridad de los reactivos a utilizar reconociendo principalmente las medidas de seguridad, las acciones de primeros auxilios en casos de accidente y la disposición del reactivo final de su uso.
- Es necesario que cada estudiante conozca las normas básicas de seguridad y el significado de las señales dentro de la planta

**Objetivos**

- Determinar de qué manera influye en el proceso de secado la dirección del aire.
- Asumir un rol de trabajo típico de una fábrica en la cual se lleven a cabo procesos de secado.

- Comprobar si el modelo matemático propuesto concuerda con los datos obtenidos experimentalmente.

### Fundamentos teóricos.

Las curvas de secado describen el cambio de humedad en el sólido a lo largo del tiempo durante el proceso de secado. Estas curvas se ven afectadas por las propiedades del material a secar y del aire, el tamaño de partícula, la porosidad del lecho, la dirección del flujo de aire, la geometría del sistema, y en general a las condiciones en las que se lleve a cabo el secado (Flujos, temperaturas, presiones, etc.).

La etapa de velocidad constante es considerada la etapa más importante en los procesos de secados debido a que es en esta donde se ve la mayor reducción de humedad con respecto al tiempo, es posible estimar velocidad de la etapa de velocidad constante y el tiempo de duración de esta etapa mediante curvas obtenidas experimentalmente, sin embargo también es posible encontrar buenas aproximaciones al comportamiento real mediante modelos matemáticos.

Con el fin de evidenciar el efecto que tiene la dirección del flujo de aire en los procesos de secado se realizara la comparación entre el modelo matemático expuesto a continuación y los valores obtenidos mediante la práctica. Para la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante se tiene la siguiente expresión la cual se obtuvo a partir del fenómeno de transferencia de calor:

$$R_c = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w}$$

Ecuación 1. Velocidad en la etapa de velocidad constante.

En donde:  $R_c$  es la velocidad en la etapa de velocidad constante,  $T_w$  es la temperatura de bulbo húmedo del aire,  $T$  la temperatura del aire de secado,  $\lambda_w$  es el calor latente de evaporación y  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor. Para el cálculo del Coeficiente  $h$  se emplean las siguientes ecuaciones de dependiendo si el flujo es paralelo a la superficie de secado o perpendicular respectivamente.

$$h = 0.0204 \times G^{0.8}$$

Ecuación 2. Coeficiente de transferencia de calor para flujos de aire horizontales.

$$h = 1.17 \times G^{0.37}$$

Ecuación 3. Coeficiente de transferencia de calor para flujos de aire verticales.

## Metodología.

Cada estudiante tendrá determinado rol de trabajo durante el proceso sus tareas dependen de este rol, el cual se encuentra representado por los cargos típicos dentro de una fábrica, cada cargo posee diferentes tareas y/o actividades que debe llevar a cabo para el correcto funcionamiento del proceso de producción, a continuación se indican los diferentes puestos en los cuales se debe indicar el nombre del estudiante que se hará cargo.

<b>Datos generales</b>	
<b>Nombre del puesto</b>	Gerente
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Toma de decisiones, supervisar y liderar a los trabajadores.
<b>Tareas</b>	Representar al equipo de trabajo ante terceros (presentación de resultados).
	Analizar junto al equipo de trabajo los resultados obtenidos.
	Determinar las condiciones de operación.
	Supervisar el correcto y oportuno funcionamiento y cumplimiento de las actividades a desarrollar.

<b>Datos generales</b>	
<b>Nombre del puesto</b>	Jefe de producción
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Velar por el correcto funcionamiento de máquinas y equipos, además de planear y proponer las actividades.
<b>Tareas</b>	Realizar estudios previos al taller a trabajar.
	Orientar al equipo de trabajo con respecto al programa de actividades.
	Supervisar el correcto funcionamiento de la planta.
	Adecuación de la materia prima.

<b>Datos generales</b>	
<b>Nombre del puesto</b>	Encargado de compras
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Supervisar el estado de los insumos y materias primas.
<b>Tareas</b>	Conocimiento previo de los materiales e insumos.
	Orientar al equipo de trabajo con respecto al programa de actividades.
	Realizar un informe sobre el costo de los insumos y la materia prima usada durante el proceso.
	Controlar el peso y calidad de los materiales.

<b>Datos generales</b>	
<b>Nombre del puesto</b>	Operario.
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Controlar el equipo dentro de los rangos indicados.
<b>Tareas</b>	Tomar datos obtenidos del proceso de secado en cada una de sus etapas.
	Supervisar el peso y calidad de los productos.
	A visar en caso de emergencia cuando se active alguna advertencia en el equipo o al notar cualquier anomalía.
	Otras funciones que se le asignen.

Se recomienda que los cargos se les asignen a los estudiantes según la nota recibida al realizar un cuestionario sobre las normas básicas de seguridad en la planta y las recomendaciones de uso de la misma de tal forma que los estudiantes de mayor a menor calificación tendrán respectivamente los siguientes roles, Gerente, Jefe de producción, Encargado de compras y operario.

Cada rol debe realizar un trabajo diferente el cual deberá ser presentado antes de ingresar a la planta, el gerente deberá realizar un estudio en el cual defina las condiciones de operación que van a ser empleadas en la planta argumentando porque se seleccionaron estas.

El jefe de producción, deberá determinar el grosor con el cual se adecuara la metería prima la cual en este caso serán plátanos, se recomienda que la medida de encuentre entre 2 y 5 mm, argumentando porque se seleccionó esta medida. Por otra parte trabajara junto con el encargado de compras en la estimación del número de plátanos requeridos para realizar el proceso

El encargado de compras deberá estimar el número de plátanos que se requerirán para realizar la práctica teniendo en cuenta que el equipo de secado posee 3 bandejas removibles con dimensiones de 30 cm de largo y ancho, teniendo en cuenta que el material debe cubrir la totalidad de estas, por lo tanto el encargado de

ventas debe recolectar información sobre el diámetro y el largo de al menos 5 plátanos.

Una vez obtenida esta información el encargado de compras trabajara junto con el Jefe de producción para estimar el número total de plátanos requerido, para lo cual se deben presentar en las siguientes tablas los resultados de las medidas obtenidas.

<i>Numero de datos</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Largo</i>
<b>1</b>		
<b>2</b>		
<b>3</b>		
<b>4</b>		
<b>5</b>		
<b>6</b>		
<b>7</b>		

La estimación se realiza teniendo en cuenta el grosor seleccionado por el jefe de producción y el promedio del largo de los datos tomados con los cual se determina el número aproximado de rodajas producidas por unidad. Posteriormente se realizara el cálculo del área promedio de estas para lo cual se empleara el diámetro promedio y se multiplica por el número de rodajas. Finalmente se divide el área de las bandejas sobre el área obtenida anteriormente.

Por otra parte el operario deberá realizar un formato con el cual se realizara la toma de datos durante el proceso de secado, este formato debe considerar que el equipo cuenta con 4 termo higrómetros, una termocupla, un anemómetro, la balanza de la cámara de secado, además que se deben registrar el tiempo en el cual se realiza la lectura de los sensores.

### **Proceso de producción.**

Una vez en la planta el gerente deberá exponer a sus compañeros de trabajos las condiciones bajo las cuales se va a llevar a cabo el proceso, mientras que el jefe de producción del mismo modo da a conocer las características con las que será procesada la materia prima (el grosor de los discos de plátano). Ambos deben expresar los motivos por los cuales eligen estos parámetros.

Posteriormente el jefe de producción debe verificar el estado del equipo y realizar la preparación del equipo para el arranque en donde se debe comprobar principalmente que:

- Las compuertas de entrada y salida de aire se encuentren abiertas para no generar cambios de presión en el equipo que puedan provocar le fallos.

- El nivel del reservorio de agua el cual debe ser superior a la mitad de su capacidad total.
- Verificar que las compuertas horizontales o verticales de la cámara de secado se encuentren abiertas o cerradas según corresponda. (para la primera parte de la práctica las compuertas horizontales se deben encontrar abiertas mientras que las verticales cerradas).

El gerente debe verificar que todos se encuentren empleando los elementos de seguridad correspondientes, en caso de que falte algún elemento de seguridad es necesario dar un informe.

Al mismo tiempo el encargado de compras y el operario realizarán la adecuación de la materia prima la cual consiste principalmente en contar los plátanos según las indicaciones expuestas por el jefe de producción.

Una vez encendido el equipo y cargadas las bandejas con la materia prima adecuada el gerente y el jefe de producción revisarán las lecturas de los sensores a lo largo de la duración de la práctica.

El operario será el encargado de recopilar la información de estas lecturas en el formato que diseñó previamente. Mientras que el encargado de compras se encargará de vigilar el tablero de control y comprobar que las lecturas de los sensores si corresponden a las indicadas en el tablero de control además de indicar si es necesario aumentar o disminuir el flujo de aire y la temperatura según las condiciones de operación establecida por el gerente al inicio de la práctica.

Debido al que el propósito de esta práctica es determinar de qué manera influye la dirección del flujo de aire en el proceso de secado es necesario llevar a cabo el proceso bajo las mismas condiciones de operación de temperatura, humedad, velocidad del aire entre otras y variar únicamente la dirección del flujo de aire con la ayuda de los ductos de aire de la cámara de secado.

Es por esto que el proceso se va a llevar a cabo 2 veces cambiando la dirección del flujo del aire, cada proceso tendrá un tiempo aproximado de 1 hora y 30 min, por lo que teniendo en cuenta el tiempo para la adecuación de la materia prima y el arranque del equipo la práctica tendrá una duración de 4h.

Una vez obtenidos los valores experimentales tanto para el proceso de secado con flujo de aire horizontal como vertical se debe apagar el equipo desactivando inicialmente primero el sistema de calentamiento, el sistema de control de humedad y finalmente el ventilador, para retirar las bandejas de la cámara de secado es necesario el uso de aguantes de carnaza, las bandejas se deben dejar limpias y

secas, por otra parte si el equipo no se va a usar en un tiempo prolongado es recomendable vaciar el depósito de agua del sistema de control de humedad.

### **Resultados.**

Una vez finalizado el proceso de producción se reunirá el equipo de trabajo el cual a partir de los resultados obtenidos generaran la curva de secado para los 2 casos realizados. Por otra parte, se realizara el cálculo de la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante, a partir de este se realizara un análisis sobre cuál es la mejor forma de llevar a cabo el proceso de secado.

Finalmente se realizara un análisis de la humedad relativa del aire a lo largo del proceso de secado teniendo en cuenta la información adquirida a partir de los sensores del equipo argumentando como esta varía en los diferentes puntos de medición y porque.

### **Sugerencias.**

Se sugiere emplear el aire de secado a una temperatura mayor a 45°C con una velocidad que se encuentre entre 0.61 – 7.6 m/s. Una vez terminada la práctica se recomienda el uso del programa de simulación de la planta para la generación de la curva de secado, y facilitar el análisis de resultados.

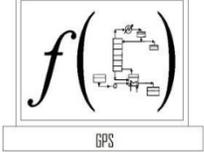
Se recomienda revisar las fuentes bibliográficas encontradas al final del documento ya que estas pueden brindar información importante sobre el proceso de secado el modelo matemático a desarrollar y las ventajas y desventajas de los juegos de roles en el proceso de aprendizaje.

### **Bibliografía.**

- Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.
- OCON; TOJO. (1974). "Problemas de Ingeniería Química". Capítulo 9. Aguilar. Madrid.
- TREYBAL Robert. (1988). Operaciones de transferencia de masa. McGraw-Hill. Estados Unidos. Segunda edición.
- Carl E. Berg. Volviendo a lo basico: psicometría y la carta psicométrica.
- Carolina Gil. (2010). El juego del rol aplicado a la educación ambiental.

- Nohora Arias (2012). Uso de un juego de rol como herramienta de motivación en la enseñanza de la química.
- Gomez Rico, Molto Berenguer, Font Escamilla, Aliaga Vicente, Martin Berenguer. (2014). Role-playing games para la adquisición de competencias en el Grado en Ingeniería Química

ANEXO E.  
GUÍA PRÁCTICA 2.

	<p><b>Fundación universidad de américa</b></p> <p><b>Efecto de la velocidad y la temperatura del aire de secado.</b></p> <p><b>Bogotá D.C.</b></p> <p><b>2018</b></p>	
---	---	---

**Normas generales.**

- Implementos básicos que debe traer cada estudiante para realizar la práctica.
  - ✓ Overol.
  - ✓ Gafas de seguridad.
  - ✓ Zapatos cerrados o botas.
  - ✓ Bitácora de laboratorio.
  - ✓ Para desocupar el tanque utilizar guantes de carnaza.
- Es necesario que cada estudiante prepare previamente la práctica, teniendo en cuenta el manejo del equipo, los materiales y los procedimientos que se realizaran.
- Previamente se deben consultar las hojas de seguridad de los reactivos a utilizar reconociendo principalmente las medidas de seguridad, las acciones de primeros auxilios en casos de accidente y la disposición del reactivo final de su uso.
- Es necesario que cada estudiante conozca las normas básicas de seguridad y el significado de las señales dentro de la planta

**Objetivos**

- Identificar el efecto que generan los cambios de temperatura del aire en los procesos de secado.
- Determinar la mejor combinación de velocidad y temperatura para los procesos de secado

- Conocer las tareas típicas de un rol de trabajo dentro de una fábrica en la cual se lleven a cabo procesos de secado.

### Fundamentos teóricos.

Durante los procesos de secado uno de los factores más importantes a conocer indudablemente es el tiempo de secado, es decir el tiempo que tarda un material en llegar de un contenido de humedad inicial a un contenido de humedad final siendo la humedad final menor que la inicial.

El proceso de secado normalmente se lleva a cabo bajo unas condiciones de operación establecidas. Este factor es de gran importancia debido a que a nivel industrial establece cuanto tardara un equipo bajo ciertas condiciones de operación en completar el proceso y obtener la humedad deseada en el producto, con él además es posible identificar qué efecto y de qué manera afecta el cambio de las condiciones en el tiempo de secado además de permitir calcular cuánto material es posible secar en una unidad determinada de tiempo, si el equipo se encuentra en la fase de diseño con este factor es posible estimar el tamaño que el equipo requerirá para cumplir con las características de producción.

Es por esto que cobran importancia las curvas de secado ya que con la ayuda de estas es posible determinar este factor asimismo permite identificar de manera visual y clara como afecta el cambio de las condiciones de operación al proceso.

Las curvas de secado generalmente se pueden representar con la siguiente expresión:

Ecuación 23 Curva de velocidad de secado.

$$R = -\frac{Ls}{A} * \frac{dX}{dt}$$

Fuente. Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.

En donde Ls es el peso del sólido seco (kg) que se emplea en la operación, A es el área superficial del sólido (m<sup>2</sup>), o el área expuesta al proceso de secado. En la ecuación anterior es necesario reordenar despejando dt para permitir calculo el tiempo de secado desde una humedad X<sub>1</sub> hasta una humedad X<sub>2</sub>, por lo que al reordenar e integrar se obtiene la siguiente expresión:

$$t = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

A partir de esta expresión se evaluara las mejores condiciones de operación en donde se buscara minimizar el tiempo de operación.

## Metodología.

Cada estudiante tendrá determinado rol de trabajo durante el proceso sus tareas dependen de este rol, el cual se encuentra representado por los cargos típicos dentro de una fábrica, cada cargo posee diferentes tareas y/o actividades que debe llevar a cabo para el correcto funcionamiento del proceso de producción, a continuación se indican los diferentes puestos en los cuales se debe indicar el nombre del estudiante que se hará cargo.

<b>Datos generales</b>	
<b>Nombre del puesto</b>	Gerente
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Toma de decisiones, supervisar y liderar a los trabajadores.
<b>Tareas</b>	Representar al equipo de trabajo ante terceros (presentación de resultados).
	Analizar junto al equipo de trabajo los resultados obtenidos.
	Determinar las condiciones de operación.
	Supervisar el correcto y oportuno funcionamiento y cumplimiento de las actividades a desarrollar.
<b>Datos generales</b>	
<b>Nombre del puesto</b>	Jefe de producción
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Velar por el correcto funcionamiento de máquinas y equipos, además de planear y proponer las actividades.
<b>Tareas</b>	Realizar estudios previos al taller a trabajar.
	Orientar al equipo de trabajo con respecto al programa de actividades.
	Supervisar el correcto funcionamiento de la planta.
	Adecuación de la materia prima.

<b>Datos generales</b>	
<b>Nombre del puesto</b>	Encargado de compras
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Supervisar el estado de los insumos y materias primas.
<b>Tareas</b>	Conocimiento previo de los materiales e insumos.
	Orientar al equipo de trabajo con respecto al programa de actividades.
	Realizar un informe sobre el costo de los insumos y la materia prima usada durante el proceso.
	Controlar el peso y calidad de los materiales.

Datos generales	
<b>Nombre del puesto</b>	Operario.
<b>Nombre del encargado:</b>	
<b>propósito</b>	Controlar el equipo dentro de los rangos indicados.
<b>Tareas</b>	Tomar datos obtenidos del proceso de secado en cada una de sus etapas.
	Supervisar el peso y calidad de los productos.
	A visar en caso de emergencia cuando se active alguna advertencia en el equipo o al notar cualquier anomalía.
	Otras funciones que se le asignen.

La selección de los roles de cada estudiante se realizara por común acuerdo medio de votación entre los participantes teniendo en cuenta que los estudiantes no podrán tener el mismo rol que desempeñaron en la práctica 1 sobre el efecto de la dirección del aire en los procesos de secado.

Cada rol debe realizar un trabajo diferente el cual deberá ser presentado antes de ingresar a la planta, el gerente deberá realizar un estudio en el cual defina las condiciones de operación que van a ser empleadas en la planta argumentando porque se seleccionaron estas

Se debe tener en cuenta que para el caso de estudio se deben seleccionar 2 temperaturas y 2 velocidades de flujo de aire, con el fin de lograr identificar el efecto de la temperatura con una misma velocidad del aire, el efecto de variar la velocidad del aire a una misma temperatura y el efecto que se produce si se varían estas 2 al tiempo, por lo que se realizaran 3 repeticiones con las variables de la siguiente forma:

Tabla 1. Variables del proceso de secado.

Temperatura	Velocidad
T <sub>1</sub> =	V <sub>1</sub> =
T <sub>1</sub> =	V <sub>2</sub> =
T <sub>2</sub> =	V <sub>1</sub> =

El jefe de producción, deberá determinar el grosor con el cual se adecuara la metería prima la cual en este caso serán plátanos, se recomienda que la medida de encuentre entre 2 y 5 mm, se debe argumentar porque se seleccionó esta medida. Por otra parte trabajara junto con el encargado de compras en la estimación del número de plátanos requeridos para realizar el proceso

El encargado de compras deberá estimar el número de plátanos que se requerirán para realizar la practica teniendo en cuenta que el equipo de secado posee 3 bandejas removibles con dimensiones de 30 cm de largo y ancho, teniendo en cuenta que el material debe cubrir la totalidad de estas, por lo tanto el encargado de

ventas debe recolectar información sobre el diámetro y el largo de al menos 5 plátanos.

Una vez obtenida esta información el encargado de compras trabajara junto con el Jefe de producción para estimar el número total de plátanos requerido, para lo cual se deben presentar en las siguientes tablas los resultados de las medidas obtenidas.

Tabla 2. Tabla de recolección de datos.

<i>Numero de datos</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Largo</i>
<b>1</b>		
<b>2</b>		
<b>3</b>		
<b>4</b>		
<b>5</b>		
<b>6</b>		
<b>7</b>		

La estimación se realiza teniendo en cuenta el grosor seleccionado por el jefe de producción y el promedio del largo de los datos tomados con los cual se determina el número aproximado de rodajas producidas por unidad. Posteriormente se realizara el cálculo del área promedio de estas para lo cual se empleara el diámetro promedio y se multiplica por el número de rodajas. Finalmente se divide el área de las bandejas sobre el área obtenida anteriormente.

Por otra parte el operario deberá realizar un formato con el cual se realizara la toma de datos durante el proceso de secado, este formato debe considerar que el equipo cuenta con 4 termo higrómetros, una termocupla, un anemómetro, la balanza de la cámara de secado, además que se deben registrar el tiempo en el cual se realiza la lectura de los sensores.

### **Proceso de producción.**

Una vez en la planta el gerente deberá exponer a sus compañeros de trabajos las condiciones bajo las cuales se va a llevar a cabo el proceso, mientras que el jefe de producción del mismo modo da a conocer las características con las que será procesada la materia prima (el grosor de los discos de plátano). Ambos deben expresar los motivos por los cuales eligen estos parámetros.

Posteriormente el jefe de producción debe verificar el estado del equipo y realizar la preparación del equipo para el arranque en donde se debe comprobar principalmente que:

- Las compuertas de entrada y salida de aire se encuentren abiertas para no generar cambios de presión en el equipo que puedan provocar le fallos.

- El nivel del reservorio de agua el cual debe ser superior a la mitad de su capacidad total.
- Verificar que las compuertas horizontales de la cámara de secado se encuentren abiertas, mientras que las compuertas verticales se deben encontrar cerradas.

El gerente debe verificar que todos se encuentren empleando los elementos de seguridad correspondientes, en caso de que falte algún elemento de seguridad es necesario dar un informe.

Al mismo tiempo el encargado de compras y el operario realizaran la adecuación de la materia prima la cual consiste principalmente en contar los plátanos según las indicaciones expuestas por el jefe de producción.

Una vez encendido el equipo y cargadas las bandejas con la materia prima adecuada el gerente y el jefe de producción revisaran las lecturas de los sensores a lo largo de la duración de la práctica.

El operario será el encargado de recopilar la información de estas lecturas en el formato que diseñó previamente. Mientras que el encargado de compras se encargará de vigilar el tablero de control y comprobar que las lecturas de los sensores si corresponden a las indicadas en el tablero de control además de indicar si es necesario aumentar o disminuir el flujo de aire y la temperatura según las condiciones de operación establecida por el gerente al inicio de la práctica.

Debido a que el propósito de esta práctica es determinar de qué manera influye los cambios de temperatura y velocidad del aire en los procesos de secado es necesario llevar a cabo el proceso 3 veces tal como se muestra en la tabla 1.

Es por esto que el proceso se va a llevar a cabo 3 veces cambiando la dirección del flujo del aire, cada proceso tendrá un tiempo aproximado de 1 hora y 30 min, por lo que teniendo en cuenta el tiempo para la adecuación de la materia prima y el arranque del equipo la práctica tendrá una duración de 5h.

Una vez obtenidos los valores experimentales tanto para el proceso de secado con flujo de aire horizontal como vertical se debe apagar el equipo desactivando inicialmente primero el sistema de calentamiento, el sistema de control de humedad y finalmente el ventilador, para retirar las bandejas de la cámara de secado es necesario el uso de guantes de carpa, las bandejas se deben dejar limpias y secas, por otra parte si el equipo no se va a usar en un tiempo prolongado es recomendable vaciar el depósito de agua del sistema de control de humedad.

## **Resultados.**

Una vez finalizado el proceso de producción se reunirá el equipo de trabajo el cual a partir de los resultados obtenidos generaran las curvas de secado para los 3 casos de estudio. Por otra parte, se realizara el cálculo del tiempo de secado con la expresión expuesta anteriormente. Con los resultados obtenidos se realizara un análisis en el cual se indique cuáles son las mejores condiciones de operación haciendo énfasis en el efecto del cambio de cada variable individualmente y el efecto de variar las al tiempo.

## **Sugerencias.**

Se sugiere emplear el aire de secado a una temperatura mayor a 45°C con una velocidad que se encuentre entre 0.61 – 7.6 m/s. Una vez terminada la práctica se recomienda el uso del programa de simulación de la planta para la generación de la curva de secado, y facilitar el análisis de resultados.

Se recomienda revisar las fuentes bibliográficas encontradas al final del documento ya que estas pueden brindar información importante sobre el proceso de secado el modelo matemático a desarrollar y las ventajas y desventajas de los juegos de roles en el proceso de aprendizaje.

## **Bibliografía.**

- Geankoplis, C. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. México: CECSA, pp.579-634.
- OCON; TOJO. (1974). "Problemas de Ingeniería Química". Capítulo 9. Aguilar. Madrid.
- TREYBAL Robert. (1988). Operaciones de transferencia de masa. McGraw-Hill. Estados Unidos. Segunda edición.
- Carl E. Berg. Volviendo a lo basico: psicometría y la carta psicométrica.
- Carolina Gil. (2010). El juego del rol aplicado a la educación ambiental.
- Gomez Rico, Molto Berenguer, Font Escamilla, Aliaga Vicente, Martin Berenguer. (2014). Role-playing games para la adquisición de competencias en el Grado en Ingeniería Química