

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

Analizar y reducir la energía utilizada en una planta deshidratadora de fruta

Trabajo de graduación presentado por María Elvira Calán
Salvatierra para optar el grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química

Guatemala

2016

**Analizar y reducir la energía utilizada en una
planta deshidratadora de fruta**

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

**Analizar y reducir la energía utilizada en una
planta deshidratadora de fruta**

Trabajo de graduación presentado por María Elvira Calán
Salvatierra para optar el grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química

Guatemala

2016

Vo. Bo.:

(f)

Ing. Gamaliel Zambrano

Tribunal examinador:

(f)

Ing. Gamaliel Zambrano

(f)

Ing. Jaime Rosales

(f)

Ing. Henry Cukier

Fecha de aprobación: Guatemala, 15 de enero de 2016

PREFACIO

La elaboración de la presente tesis surgió de la necesidad detectada en la empresa *Alimentos Campestres, S.A.* Durante más de 20 años esta empresa se ha dedicado a la deshidratación de frutas y verduras, la mejora continua y la búsqueda de procesos productivos, para mejorar el estándar de calidad de sus productos y competir en mercado local e internacional. Debido a los tipos de proceso que se desarrollan, los costos de producción son los más significativos. Durante el año 2015 se realizaron mayores esfuerzos para mejorar los procesos y así mantener controlados los costos evaluando las oportunidades de reducirlos.

Se planteó a gerencia la necesidad de evaluar el funcionamiento de los equipos que son utilizados en el proceso de deshidratación. Se tomó de muestra uno de los deshidratadores de gas propano que está instalado en la planta ubicada en la ciudad de Guatemala y se realizaron los estudios durante el período de procesamiento de caña de azúcar.

Concluir con éxito este proyecto fue de mucha satisfacción personal ya que me permitió poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Química y se logró conocer a profundidad y detalle el proceso. Permitiendo presentar un resumen del comportamiento de los equipos con los que se cuenta. Por lo tanto agradezco al Licenciado Carlos Raúl Montes por permitirme la confianza de estudiar a profundidad sus procesos y también agradezco al Ingeniero Gamaliel Zambrano por el tiempo dedicado a las revisiones del estudio realizado y el conocimiento transmitido para concluir satisfactoriamente el estudio.

ÍNDICE

PREFACIO	V
ÍNDICE	VI
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE ILUSTRACIONES	IX
RESUMEN	X
I. Introducción.....	1
II. Justificación.....	3
III. Objetivos.....	4
A. Objetivo general.....	4
B. Objetivos específicos	4
IV. Marco teórico	5
A. Deshidratación	5
1. Métodos generales de secado.....	6
2. Conceptos de humedad	6
B. Transferencia de masa y energía en el secado.....	7
2. Mecanismos de transferencia de humedad dentro del sólido	8
C. Psicrometría.....	9
D. Curva de velocidad de secado	10
1. Período de velocidad constante:	12
2. Período de velocidad decreciente:.....	12
E. Secado industrial	13
1. Secadores directos o de convección:	14
2. Secadores indirectos o de conducción	16
F. Energía en alimentos	18
G. Gas licuado de petróleo	18
V. Antecedentes	20
VI. Metodología	23
A. Parámetros a medir en el sistema.....	23
B. Equipos utilizados	23
C. Métodos.....	23

1.	Contenidos de humedad en la entrada y salida del producto.....	23
2.	Temperaturas y humedad de aire a la entrada y salida.	24
3.	Consumo de combustible.	24
4.	Caudal de aire.	24
5.	Pruebas adicionales.	25
6.	Análisis de datos.	25
VII.	Resultados.....	26
VIII.	Discusión	30
A.	Humedades en la entrada y salida del producto.....	30
B.	Temperaturas del aire a la entrada y salida del proceso	31
C.	Consumo energético.....	31
D.	Flujo volumétrico de aire que ingresa.....	32
E.	Eficiencia energética.....	32
F.	Costos de deshidratación.....	33
IX.	Conclusiones y recomendaciones.....	34
X.	Bibliografía	35
XI.	Apéndice.....	36
A.	Datos de placa de equipos utilizados	36
B.	Datos recopilados	36
C.	Curvas de secado	40
D.	Pruebas de velocidad de aire.....	50
E.	Balance energético	51
F.	Carta psicrométrica de simulador utilizado.....	56
G.	Glosario	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características de GLP comercializado por <i>Tropigas</i> Guatemala	18
Tabla 2 Descripción del balance de masa global	26
Tabla 3 Balance de energía global promedio.....	27
Tabla 4 Humedad promedio en caña de azúcar fresca.....	27
Tabla 5 Humedad promedio en producto deshidratado	27
Tabla 6 Velocidad promedio de secado por tipo de bandeja.....	28
Tabla 7 Tiempo teórico de secado bajo las actuales condiciones de operación	28
Tabla 8 Condiciones promedio de aire de entrada.....	28
Tabla 9 Consumo de gas propano por lote	29
Tabla 10 Productos de la reacción de combustión.....	29
Tabla 11 Consumo de energía en base al consumo de GLP	29
Tabla 12 Flujo promedio aire ingresado y renovaciones por hora.....	29
Tabla 13 Eficiencia global.....	29
Tabla 14 Costos de producción de caña de azúcar deshidratada.....	29
Tabla 15 Datos de placa higrómetro	36
Tabla 16 Datos de placa anemómetro	36
Tabla 17 Datos de placa medidor de gas propano.....	36
Tabla 18 Pesos de bandejas a diferentes tiempos durante el proceso de deshidratación	36
Tabla 19 Condiciones del aire de ingreso, ubicación 3 según Ilustración 6.....	38
Tabla 20 Condiciones de aire de salida en la ubicación 2 según Ilustración 6	39
Tabla 21 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.1	40
Tabla 22 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.2.....	41
Tabla 23 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.3.....	42
Tabla 24 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.4.....	43
Tabla 25 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.5.....	44
Tabla 26 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 1	46
Tabla 27 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 2.....	47
Tabla 28 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 3.....	48
Tabla 29 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 4.....	49
Tabla 30 Velocidades de aire de salida	50
Tabla 31 Tabla de aire de salida con sus propiedades	52
Tabla 32 Condiciones del aire de ingreso.....	53
Tabla 33 Consumo de GLP por lote deshidratado	54

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Representación gráfica del mecanismo de secado.....	8
Ilustración 2 Carta psicrométrica a temperaturas normales y presión barométrica de 101.35 kPa	10
Ilustración 4 Curva idealizada de secado (a) tasa de secado vs tiempo (b) Tasa de secado vs humedad	11
Ilustración 5 Clasificación de secadores basados en el método de transferencia de calor	14
Ilustración 6 Diagrama de flujo del proceso de caña de azúcar	21
Ilustración 7 Dimensiones de bandejas para deshidratación	21
Ilustración 8 Vista frontal del deshidratador	22
Ilustración 9 Balance global de secado en un deshidratador de gabinete por convección	26
Ilustración 10 Temperaturas de bulbo seco y húmedo a lo largo del proceso de deshidratación	28
Ilustración 11 Vista de planta de distribución de bandejas.....	40
Ilustración 12 Curva de rapidez de secado para bandeja cuadrada 1.....	41
Ilustración 13 Curva de rapidez de secado para bandeja cuadrada 3.....	42
Ilustración 14 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.4	43
Ilustración 15 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.5	44
Ilustración 16 Comportamiento del secado de bandejas cuadradas a lo largo del tiempo	45
Ilustración 17 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 1	46
Ilustración 18 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 2	47
Ilustración 19 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 3	48
Ilustración 20 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 4	49
Ilustración 21 Comportamiento del secado de bandejas triangulares a lo largo del tiempo	50
Ilustración 22 Comportamiento de humedad en el aire a lo largo del tiempo	51
Ilustración 23 Carta psicrométrica corregida a la presión atmosférica de Guatemala	56

RESUMEN

Alimentos Campestres, S.A es una empresa dedicada a la deshidratación de frutas, con más de 20 años de experiencia. Hasta el momento la planta no contaba con un análisis de cada variable involucrada en el proceso de deshidratación, por lo que el siguiente proyecto tuvo como propósito conocer el estado del sistema, los costos del proceso de deshidratación, proponer mejoras y proyectar los ahorros que esto genera en consumo de combustible.

Con el fin de cumplir los objetivos se realizó un balance de masa y energía con el procedimiento actual del sistema y además se evaluó el rendimiento de deshidratación, usando como base la deshidratación de caña de azúcar. Con los datos obtenidos se construyeron curvas de secado de tasa de secado vs tiempo y de tasa de secado vs humedad en base seca. Las curvas permitieron conocer el punto crítico en la deshidratación de caña de azúcar y también el tiempo teórico para alcanzar el punto crítico.

Las variables que se tomaron en cuenta en el estudio fueron: temperatura, humedad de aire, velocidad del aire dentro del deshidratador, tiempo de deshidratación, humedades iniciales y finales de la materia prima y consumo de combustible por lote deshidratado.

Con el presente estudio la empresa obtuvo información para mejorar el aprovechamiento de recursos de producción y, por lo tanto, será más competitiva en el mercado local e internacional

I. Introducción

La deshidratación de frutas con aire caliente es un método que permite la conservación de productos por eliminación de agua de la fruta a valores menores del 20% con actividad de agua menores al 0.6. Existen diferentes métodos para los procesos de deshidratación, pero la deshidratación por medio de aire caliente es el más utilizado debido a su sencillez y bajo costo de operación.

Los beneficios de la deshidratación de un alimento es que la actividad microbiana y química se reduce debido a la baja actividad de agua. Además provoca la reducción de peso y volumen, que genera la ventaja de disminuir los costos de transporte y almacenamiento de un alimento. Un proceso de este tipo requiere de una alta demanda de energía y el tiempo de exposición dependerá de la humedad inicial del producto, la humedad que se quiere alcanzar, la temperatura que se maneje, la humedad del aire y la velocidad del mismo.

Los procesos de deshidratación utilizando equipos por circulación perpendicular a base de gas propano duran más de 15 horas en la planta de *Alimentos Campestres S.A* y hasta el momento no se conocía si las condiciones eran las adecuadas para llevar a cabo el proceso, por lo que surgió la necesidad de evaluar las condiciones utilizadas hasta el momento, evaluando si se necesitan cambios tecnológicos que generen un proceso más económico y eficiente. Es por esto que es necesario disponer de las curvas de secado para describir y optimizar el proceso.

El proyecto se encuentra dividido en dos fases, la primera fase consistió en conocer el diseño actual del sistema, la transferencia de masa y calor a las condiciones de trabajo y el comportamiento de la caña de azúcar a estas condiciones. La segunda fase fue brindar las recomendaciones necesarias para mejorar el sistema de deshidratación.

Las principales variables evaluadas fueron humedades en el producto, humedades en el aire, consumo de gas propano, tiempos de deshidratación y rendimientos de deshidratación. El presente trabajo está integrado de la siguiente forma:

- Marco teórico: es una recopilación de toda la información que permite entender el proceso de deshidratación.
- Antecedentes: en esta sección se encontrarán detalles de la operación de la empresa *Alimentos Campestres, S.A* los cuales fueron la base de la evaluación.
- Metodología: detalla las variables analizadas y la forma de medición, además describe los procedimientos que se realizaron para obtener detalles del proceso.

- Resultados: se presenta un balance de masa y energía global, humedades manejadas en la caña de azúcar, temperaturas de aire de proceso, consumo de combustible, cantidad de aire utilizada, eficiencia energética y costos de la deshidratación de caña de azúcar.
- Discusión: en esta sección se analiza cada uno de los resultados, el análisis incluye una comparación con la teoría y los cambios ingenieriles que son necesarias para mejorar el proceso.
- Conclusiones: aquí se resumen los resultados obtenidos y se brindan las mejoras que son necesarias en el proceso.
- Apéndice: en esta sección se incluyeron todas las gráficas de apoyo y los datos recolectados.
- Glosario: posee todas las palabras claves con su significado para entender el proceso de deshidratación.

II. Justificación

Dentro de los planes a futuro de la planta de *Alimentos Campestres S.A* se encuentra la automatización de los procesos de deshidratación y para poder dar este paso es necesario realizar un reconocimiento de todas las variables involucradas en el proceso y su incidencia en la calidad y costos de producción. Las principales variables a evaluar experimentalmente son: humedad relativa del aire de ingreso y de salida, temperaturas, humedades en el producto, consumo de gas propano, y velocidad de aire, para de esta manera conocer y establecer los lineamientos básicos para que se lleve a cabo de forma más eficiente y competitiva el proceso de deshidratación. Es de suma importancia realizar un balance de masa y energía del proceso global.

La planta de la ciudad capital durante el año 2014 procesó alrededor de 4,100, 000 kilogramos de fruta en fresco, donde las principales fueron: caña de azúcar, manzana y piña. Para esta cantidad de fruta se obtuvo un consumo de aproximadamente 20,000 galones líquidos de gas licuado de petróleo (GLP). Donde a pesar de contar con estos datos no se ha podido determinar si el gasto de combustible es razonable o pudiera existir alguna mejora tecnológica que permita disminuir este consumo y por ende genere ahorros económicos significativos en la empresa.

Con base en los datos recopilados en el año 2014 se planificó procesar 158,903 kg de caña de azúcar para el año 2015, procesando diariamente 2 lotes de deshidratación de 1,056 kg de producto cada uno. De los datos obtenidos históricamente se sabía que por lote podría consumirse hasta 50 galones líquidos de GLP, en procesos de deshidratación de 22 horas. Sin conocer si el tiempo era el más adecuado y sin tener claridad de la humedad obtenida en cada punto del deshidratador.

III. Objetivos

A. Objetivo general

Estudiar y evaluar un deshidratador de la empresa *Alimentos Campestres S.A*, ubicada en la Ciudad Capital, usando el análisis de: humedades del aire de entrada y salida, humedades en el producto a lo largo del proceso de deshidratación, flujo volumétrico de aire, cantidad de combustible utilizada y cantidad de producto procesado. Esto con el fin de mejorar las condiciones de operación.

B. Objetivos específicos

1. Evaluar la velocidad y humedad del aire, temperatura del proceso y consumo de gas propano, modelando con un balance global de masa y energía el proceso de deshidratación bajo las condiciones de operación. Con el fin de reconocer el funcionamiento del proceso actual.
2. Construir las curvas de secado de velocidad de deshidratación vs tiempo y velocidad de deshidratación vs humedad de la caña de azúcar determinando la humedad a cada hora del proceso con el fin de determinar los puntos críticos del proceso.
3. Determinar la cantidad teórica de combustible necesaria para deshidratar un kilogramo de agua libre contenido en la caña de azúcar, en base a la energía necesaria para lograr una humedad del 10% en caña deshidratada.
4. Determinar el costo de deshidratación de una unidad de medida de caña fresca en base al consumo de combustible y costo de materia prima.
5. Establecer las condiciones de operación para el sistema de deshidratación de la planta de *Alimentos Campestres S.A* que permitirán reducir costos de producción.

IV. Marco teórico

A. Deshidratación

La deshidratación es también llamado secado y ha sido uno de los métodos más antiguo para la conservación de alimentos; el proceso de secado generalmente se refiere a la remoción de agua de un sólido por evaporación bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad, controlados por medio de corrientes de aire o por otros métodos. El aire caliente es el método más utilizado y económico para efectuar deshidratación de alimentos. (Cruz, 2002) La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando las dos presiones se igualan se frena el proceso de secado debido a que el sólido y el gas están en equilibrio. (Schmalko, 2209)

Los productos deshidratados logran conservarse debido a que los microorganismos requieren agua para crecer y reproducirse, por lo que si el contenido de agua se reduce por debajo de un determinado valor crítico (el cual varía por producto) se hace casi imposible el crecimiento de los microorganismos. (Paetau, 2006)

No es necesario remover toda el agua del alimento a fin de impedir la multiplicación de los microorganismos. Las bacterias no se multiplicarán en los alimentos con una actividad acuosa (a_w) inferior a 0.91. El mínimo nivel de a_w aceptable por la mayor parte de las levaduras y los mohos es de 0.88 y 0.80, respectivamente. La mayor parte de los alimentos deshidratados contienen menos del 25 % de agua y tienen una actividad acuosa inferior a 0.6. (Paetau, 2006)

La multiplicación de microorganismos no debe ocurrir en los alimentos deshidratados elaborados de manera adecuada, pero no son inmunes a otros tipos de descomposición. La vida de almacenamiento de los alimentos deshidratados aumenta bastante y la pérdida de vitamina A y ácido ascórbico disminuye considerablemente en ausencia de oxígeno. Si se llena por completo el recipiente con alimentos deshidratados comprimidos se reduce al mínimo la cantidad de oxígeno. Aunque es preferible la sustitución del aire en el interior del recipiente con nitrógeno; la mayor parte de deshidratados pueden almacenarse durante dos años o más sellados de manera que el oxígeno ha sido sustituido por nitrógeno. (Paetau, 2006)

Antes de deshidratar frutas u hortalizas, estas son escaldadas o blanqueadas por inmersión en agua hirviendo o por tratamiento con vapor. Esto inactiva las enzimas oxidativas como la catalasa, la fenolasa y la oxidasa del ácido ascórbico y mejora la

estabilidad del producto deshidratado. Algo de las vitaminas hidrosolubles se pierde durante el blanqueado en agua pero esto se reduce al mínimo dejando que aumente la concentración de las sustancias hidrosolubles en el agua del blanqueado. Por lo general se añade sulfito de sodio al agua utilizada para blanquear las hortalizas debido a que así se mejora tanto el color como la retención del ácido ascórbico. (Paetau, 2006)

Sin importar cuál sea el método de secado el proceso de deshidratación de un alimento consta de dos etapas: (Cruz, 2002)

- Introducción del calor al producto, brindar el calor para evaporar el líquido.
- Extracción de humedad del producto.

1. **Métodos generales de secado.** Los procesos generales se dividen en procesos por lotes cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo de tiempo. Y los procesos continuos donde el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene producto seco de forma continua. (Solano, 2010)

Además se clasifican los procesos por las condiciones físicas usada para adicionar calor y extraer vapor de agua:

a. **Por convección:** el calor ingresa por aire caliente a presión atmosférica y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado, o gases de combustión directa pueden ser utilizados en sistemas de secado convectivos. (Ellwanger, 2009)

b. **Por conducción:** el producto a secar se encuentra en recipientes calentados, el calor se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido. (Paz, 2205)

c. **Por radiación:** el calor se transmite por las superficies radiantes próximas. (Paz, 2205)

d. **Dieléctrico:** la energía es generada en el interior del propio material mediante un campo electromagnético de alta frecuencia en la zona de microondas. (Paz, 2205)

e. **Por sublimación:** el agua se sublima directamente de un material congelado al vacío. (Paz, 2205)

2. Conceptos de humedad

a. **El agua en los alimentos:** es una parte importante las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua, en los alimentos ricos en ella, o la ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y su

aceptabilidad. Por otra parte, la presencia de agua, a ciertas concentraciones, en los alimentos facilita su deterioro por acción de los microorganismos y las enzimas, o a través de reacciones químicas o enzimáticas. Por lo tanto reduciendo la cantidad de agua se puede extender la vida útil de las mismas. (Paetau, 2006)

b. **Contenido en agua:** el contenido en agua de un producto se puede expresar en términos de peso húmedo, es decir masa de agua por masa de producto húmedo, o en términos de peso seco, que es el peso del agua por unidad de masa de producto seco. El más utilizado es el de peso seco. (Paetau, 2006)

c. **Actividad de agua:** al considerar la influencia del contenido en agua en la estabilidad de los alimentos, no es el contenido total en agua lo importante, sino la cantidad de agua disponible para el crecimiento microbiano y la actividad química. Se sabe que una parte del contenido de agua de los alimentos se halla fuertemente ligada a puntos específicos de los compuestos sólidos y otra cantidad se encuentra más disponible, pero tampoco es fácilmente disponible como disolvente para diversos solutos. La actividad de agua se define como: (Cruz, 2002)

$$a_w = \frac{p_v}{p_w}$$

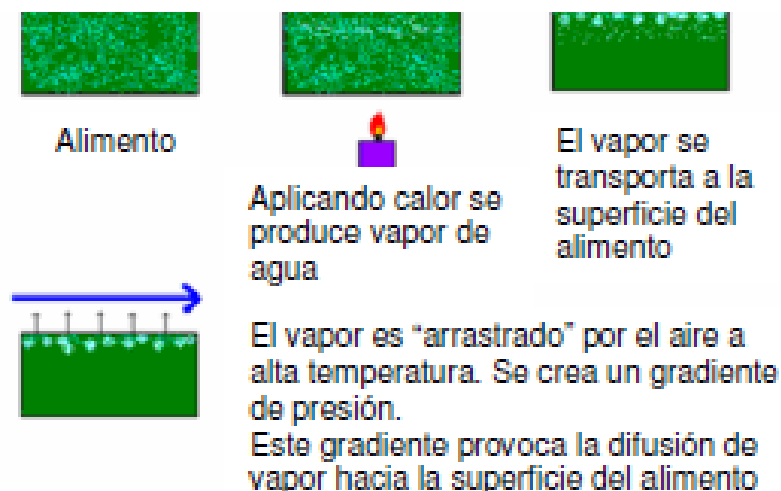
Ecuación 1 Actividad de agua

Donde p_v es la presión de vapor de agua ejercida por la disolución, o el sólido húmedo, y p_w es la presión de vapor del agua pura, a la misma temperatura.

B. Transferencia de masa y energía en el secado

Durante el proceso de secado térmico de frutas o verduras existe una transferencia simultánea de calor y de masa, en donde el agua es evaporada y removida del producto. El mecanismo más importante de transferencia de masa es la difusión que sucede del centro de la fruta a la superficie de la misma por medio de una convección forzada. La remoción de humedad puede realizarse más eficientemente en un ambiente con temperaturas en un rango de 90 °C a 120 °C, el problema de estas temperaturas radica en que los productos con altos contenidos de azúcar al llegar a estas temperaturas forman una costra en la superficie del alimentos que impide la remoción de humedad. (Ellwanger, 2009)

Ilustración 1 Representación gráfica del mecanismo de secado



(Ellwanger, 2009)

1. Fenómenos de transferencia de energía. Existen condiciones internas y externas que afectan la transferencia de masa y energía. Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas y las condiciones del mismo. Las condiciones internas están definidas por la transferencia de calor y de masa a través del sólido, es decir la resistencia que tenga el material para la difusión del vapor de agua en el sólido. (Solano, 2010)

2. Mecanismos de transferencia de humedad dentro del sólido

a. **Difusión líquida:** se produce la difusión de la humedad líquida debido a gradientes de concentración entre las profundidades del sólido, donde la concentración es alta y la superficie donde ésta es baja. (Treybal, 2007)

b. **Movimiento capilar:** la humedad libre en sólidos granulares y porosos se traslada a través de capilares de los sólidos mediante un mecanismo que utiliza las fuerzas de tensión superficial. A medida que se lleva a cabo el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado. (Treybal, 2007)

c. **Difusión de vapor:** si se suministra calor a una superficie de un sólido mientras en otra el secado continúa, se puede evaporar la humedad debajo de la superficie, difundiéndola hacia afuera como vapor. (Treybal, 2007)

d. **Presión:** durante el secado debido a la concentración de las capas externas de un sólido, se puede transferir la humedad hacia la superficie. (Treybal, 2007)

Para los análisis de los fenómenos de secado, se debe estudiar por separado el mecanismo dentro y fuera del alimento.

3. Transferencia de humedad en el interior del sólido. En alimentos es muy común la transferencia de humedad por difusión del centro del sólido a la superficie y se rodea el medio con un gas caliente para su eliminación. Al realizar un balance de masa para el agua en una superficie, se llega a la conclusión que la tasa a la cual llega el agua desde el interior debe ser igual a la tasa con la cual se remueve desde la superficie, pues no se puede acumular. La ecuación que rige la difusión unidimensional para una sustancia con propiedades constantes dentro del sólido se define como: (Paetau, 2006)

$$\frac{w_A}{A} = -D_{AB} \frac{dC}{dx}$$

Ecuación 2 Movimiento de agua dentro de un sólido

Como se observa en la ecuación 2 mientras mayor es el área superficial, mayor será la transferencia de masa. Generalmente el alimentos es cortado y acondicionado en piezas pequeñas o capas delgadas con el propósito de acelerar la velocidad de secado, debido a la exposición de una mayor área superficial que facilita la transferencia de masa y calor. (Cruz, 2002)

C. Psicrometría

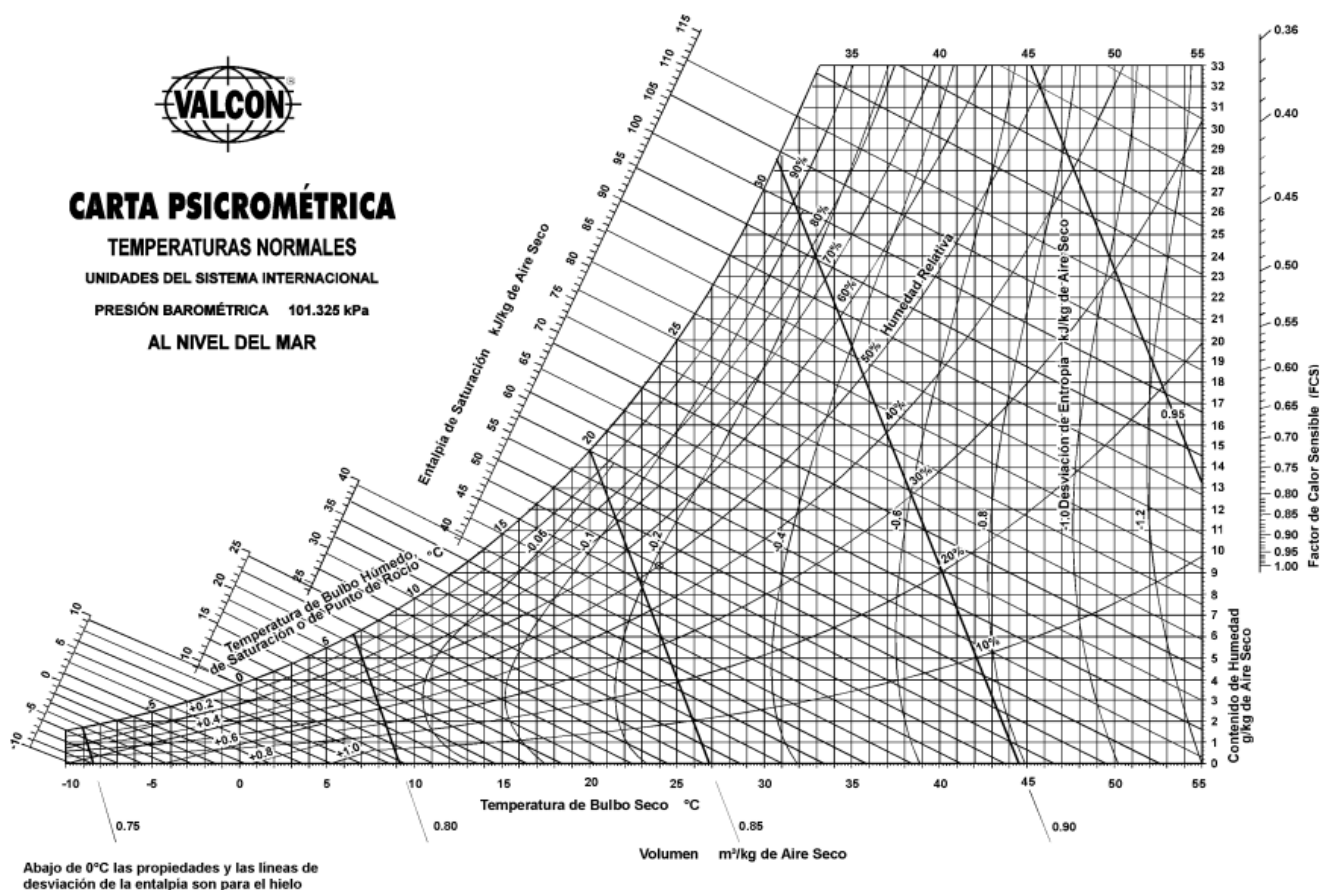
Es el estudio de las relaciones termodinámicas entre el vapor de agua y aire. Estas relaciones son básicas e importantes en la deshidratación de alimentos debido al papel que desempeñan las fuerzas involucradas en la remoción de humedad del producto. (Cruz, 2002)

Algunas definiciones importantes para realizar cálculos con la psicrometría son:

1. **Presión parcial (p):** la presión parcial de un componente se define como la presión que el componente ejercería si estuviera completamente aislado. El aire de secado y vapor de agua ejercen una presión parcial en la mezcla de aire-vapor. (Cruz, 2002)
2. **Humedad relativa (H_R):** se refiere a la proporción de la cantidad de vapor en mezclas gaseosas del máximo de vapor que puede estar contenido en la mezcla. En suma, la humedad relativa es la relación de la presión parcial de vapor (p_v) a la presión de saturación de vapor (p_s) para una mezcla de agua-vapor. (Cruz, 2002)
3. **Humedad absoluta (H_A):** es la proporción de masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco. (Cruz, 2002)

Las definiciones anteriores son necesarias para realizar cálculos mediante el uso de la carta psicrométrica, que es una gráfica de humedad absoluta en el eje vertical versus la temperatura de bulbo seco en el eje horizontal. (Ver Ilustración 2) La curva en el eje superior representa el punto de saturación y conociendo las temperaturas de bulbo húmedo se pueden calcular la humedad relativa. (Cruz, 2002)

Ilustración 2 Carta psicrométrica a temperaturas normales y presión barométrica de 101.35 kPa



(Ramírez, 2013)

En la Ilustración 23 se puede encontrar una carta psicrométrica obtenida con un simulador de la Universidad Politécnica de Valencia. El simulador permite corregir la presión atmosférica según el lugar donde se desee realizar el análisis, en este caso la Ilustración 23 se encuentra a la presión promedio de la ciudad de Guatemala que es de 102.300 kPa.

D. Curva de velocidad de secado

Cuando se secan alimentos, éstos no pierden agua a velocidad constante hasta estar completamente secado, sino que por el contrario, a medida que avanza el proceso de secado, la velocidad de eliminación de agua va disminuyendo. (Cruz, 2002)

La curva de velocidad de secado se obtiene sobre el contenido de humedad por exposición de una muestra húmeda a una corriente de aire. El peso de la muestra es reducido continuamente como función del tiempo. Este dato permite calcular el contenido de humedad en base seca, H . Por lo tanto el contenido de humedad libre se calcula de la siguiente manera: (Cruz, 2002)

$$H_L = H - H_e$$

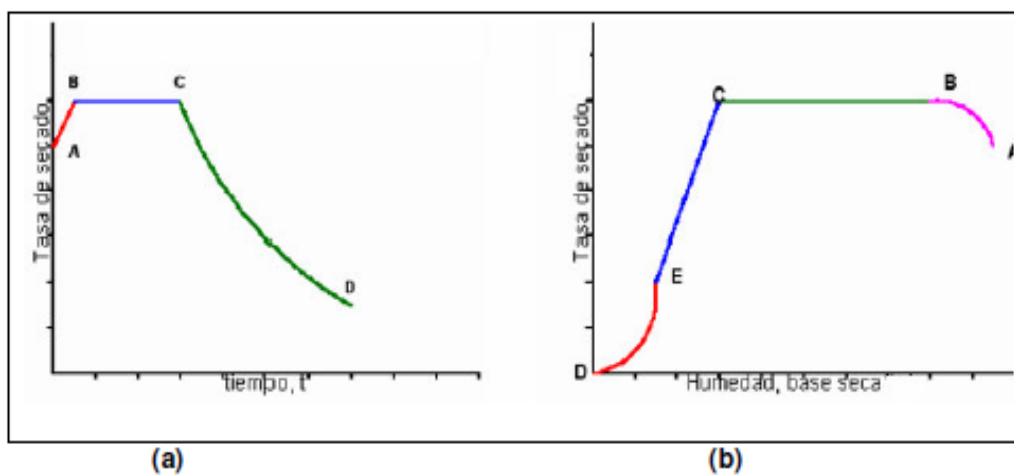
Ecuación 3- Humedad libre

Donde H_e es el contenido de humedad en el equilibrio.

La humedad libre de una sustancia es el exceso de humedad sobre el contenido de humedad de equilibrio a cualquier temperatura y humedad dadas. (Cruz, 2002)

La Ilustración 4 demuestra un comportamiento idealizado de un proceso de secado.

Ilustración 3 Curva idealizada de secado (a) tasa de secado vs tiempo (b) Tasa de secado vs humedad



Según la Ilustración 4, el pequeño periodo de tiempo que corresponde a la línea AB, indica el calentamiento del producto a la temperatura en la cual el agua evapora más fácilmente. El período de secado constante se observa en el rango BC, en este período la rapidez de secado es esencialmente la rapidez de evaporación. La temperatura de la superficie del producto y la del agua durante este periodo es muy cercana a la temperatura de bulbo húmedo del aire. (Treybal, 2007)

Las variables importantes que determinan el flujo de evaporación son la rapidez de transferencia de masa y de calor, el área de superficie expuesta al flujo de aire y las diferencias entre la temperatura y la humedad del aire y en la superficie del producto

húmedo. La rapidez de transferencia de masa y calor está regida por los coeficientes asociados, que están relacionados a la velocidad y temperatura del aire sobre el producto; al aumentar cualquiera de las dos variables aumenta la rapidez de secado. La fuerza impulsora para la evaporación es la diferencia de presión de vapor del agua en el producto y la presión parcial de vapor en el flujo de aire. Cualquier diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo del aire, también acelerará el secado. (Treybal, 2007) Existen limitaciones del proceso de secado como la temperatura a manejar ya que una fruta por su alto contenido en azúcar puede sufrir caramelización o puede quemarse a temperaturas altas, y eso ocasiona que la rapidez de secado ya no sea constante. (Paz, 2205)

En un secador de aire bajo condiciones ambientales constantes, el proceso de secado puede ser dividido de la siguiente manera:

1. **Período de velocidad constante:** la velocidad de remoción de humedad del producto es limitada solo por la velocidad de evaporación del agua superficial sobre o dentro del producto. Este período continuará mientras la migración de humedad hacia la superficie en la que ocurre la evaporación sea más rápida que la evaporación que se lleva a cabo en la misma superficie. La velocidad a la cual ocurre la evaporación del agua de la superficie depende de dos factores, definidos a continuación: (Cruz, 2002)

$$\frac{dH}{dt} = \frac{hA(T_a - T_w)}{L} = k_a A(H_w - H_A)$$

Ecuación 4 – Velocidad de evaporación de agua de la superficie a deshidratar

Donde:

H = es el coeficiente de transferencia de calor que describe las condiciones existentes en la superficie.

K_m = es el coeficiente de transferencia de masa que describe la transferencia de humedad hacia el aire.

T_a = temperatura de bulbo seco.

T_w = temperatura de bulbo húmedo.

H_w = humedad absoluta en condiciones de bulbo húmedo,

2. **Período de velocidad decreciente:** al avanzar en el proceso de secado se alcanza un punto en el que la velocidad de movimiento de la humedad desde el interior de producto hasta la superficie se reduce a tal punto que la superficie comienza a secarse y la

velocidad disminuye. El contenido en humedad en este punto se denomina contenido crítico de humedad donde la temperatura de la superficie comienza a elevarse. La humedad crítica no es una propiedad específica del producto sino que está relacionada con las características físicas del vegetal o fruta y las propiedades del aire. El período de velocidad decreciente consta de dos partes: (Ellwanger, 2009)

a. En la primera parte la superficie se seca y disminuye la velocidad de deshidratación. Esto se debe a que la evaporación se desplaza penetrando hacia el interior del sólido y la velocidad de deshidratación decae aún más. Para alimentos no higroscópicos este punto corresponde al fin de la deshidratación

b. La segunda parte sucede para los materiales higroscópicos donde el centro del bloque del producto alcanza un contenido de humedad y el secado ocurre por desorción a través del alimento. En este período se asume que la transferencia de masa ocurre solamente en la fase de vapor, que no existe encogimiento y que el calor total de vaporización es constante.

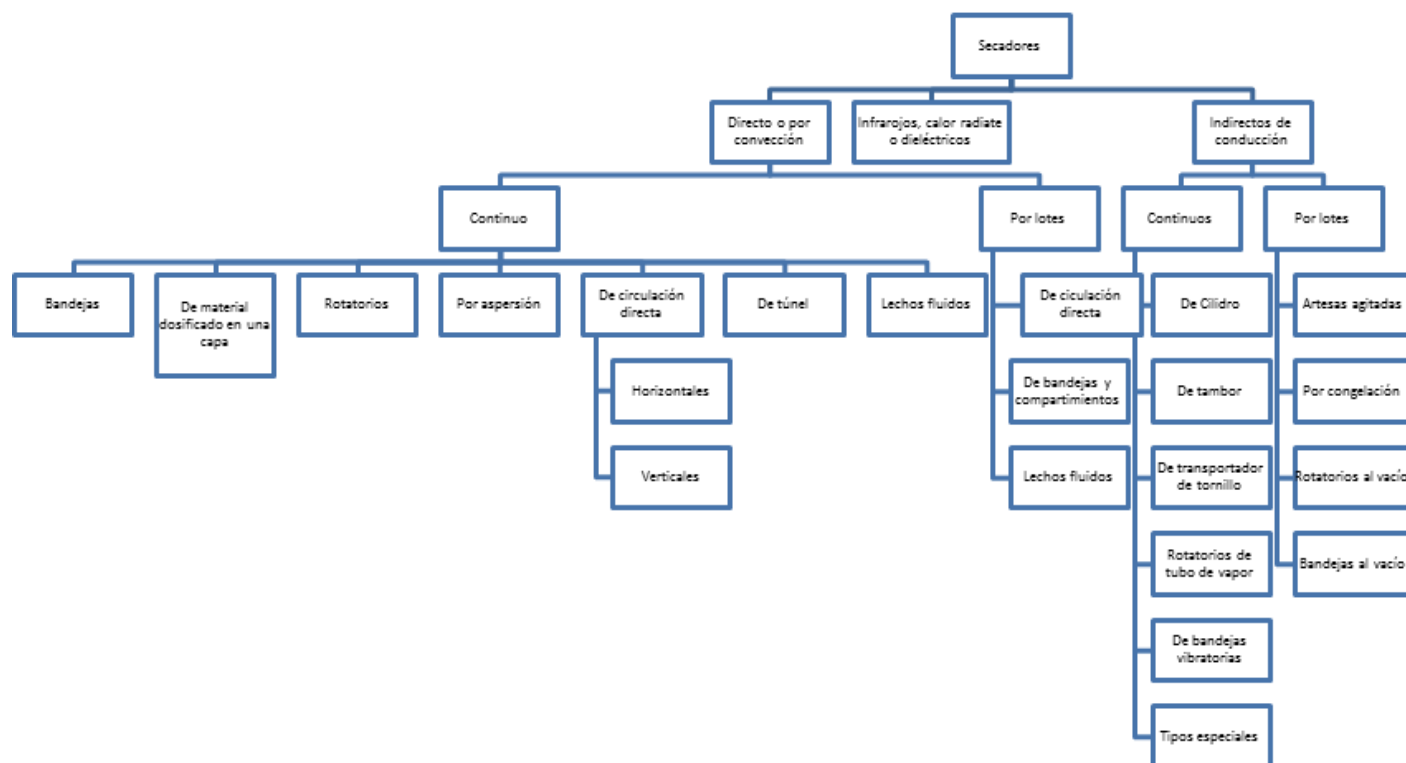
Durante el período de velocidad decreciente la velocidad de secado está influenciada principalmente por la velocidad de movimiento de la humedad del centro del sólido, reduciéndose los efectos de los factores externos, en especial la velocidad del aire sobre todo en la última etapa. Normalmente los períodos de velocidad decreciente constituyen la mayor proporción del tiempo total de la deshidratación. (Cruz, 2002)

El efecto más notable en la rapidez de secado se consigue cuando se incrementa la temperatura de bulbo seco del aire, el cual decrece la cantidad de energía necesaria para la vaporización y por lo tanto incrementa la difusividad del agua dentro de la partícula. Se han realizado estudios donde se demuestra que al disminuir la humedad relativa del aire también se incrementa la rapidez de secado, lo que facilita la operación pero esto influye en pérdidas de energía y aumento de consumo de combustible. En alimentos una humedad relativa alta también afecta el endurecimiento del producto, ya que se aumenta la temperatura de secado ocasionando una capa dura alrededor del producto a secar volviendo la superficie menos permeable a la salida del vapor de agua. (Paz, 2205)

E. Secado industrial

Existen diferentes equipos para el proceso de secado que pueden clasificarse de la siguiente forma:

Ilustración 4 Clasificación de secadores basados en el método de transferencia de calor



(Solano, 2010)

1. **Secadores directos o de convección:** Las características principales son: (Hernández, 2009)
 - El líquido vaporizado se arrastra con el medio de secado (gases de calentamiento).
 - Las temperaturas pueden llegar hasta los 720 °C dependiendo del producto a secar. A mayores temperaturas, la radiación se convierte en un mecanismo de transmisión de calor muy importante.
 - Cuando se manejan temperaturas de secado menores al punto de ebullición del agua, el contenido de humedad del aire influye en la velocidad de secado y el contenido final de humedad en el sólido. Con temperaturas de aire superiores al punto de ebullición, el contenido de humedad del aire tiene sólo un pequeño retraso en la rapidez de secado y el contenido final de humedad del producto a secar.

- Si no se usaran temperaturas arriba de 100 °C y la humedad en el aire atmosférico es elevado es necesario un proceso de deshumificación del aire.
- Un secador consume más combustible por kilogramo de agua evaporada mientras más bajo es el contenido de humedad en el aire.
- La eficiencia mejora al aumentase la temperatura del aire de secado de entrada para una temperatura de salida constante.
- Las pérdidas de calor representan entre un 3-10% del calor suministrado por el combustible.

a. **Secadores directos continuos.** Las partes principales son: un sistema para hacer fluir el aire como abanicos o sopladores, ductos por donde ocurre el contacto con el material a secar, una fuente de energía y un sistema para dispersar y transportar la fase sólida a través del aire del secador. Tal como su nombre lo indica funcionan de forma continua sin interrupciones. (Hernández, 2009)

- **Secadores de bandejas:** el material a secar se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal con profundidades de 0.01-0.1 m. Un ventilador recircula el aire recalentado con vapor sobre la superficie en las bandejas, paralelamente a las mismas. Más o menos el 10-20% del aire que pasa sobre las bandejas es aire fresco o nuevo. Después de un período de tiempo se abre el gabinete y se ingresan nuevas bandejas con más material para secar. (Hernández, 2009)

- **De material dosificado en una sola capa:** se hace pasar el material por una capa o lámina continua de material. (Hernández, 2009)

- **Transportador neumático:** realiza a menudo en combinación con la trituración. El material se transporta dentro de gases a alta temperatura y velocidades elevadas hasta un colector. (Hernández, 2009)

- **Rotatorios:** se trata de un cilindro hueco que gira sobre su eje. Los sólidos húmedos se alimentan por la parte superior y se mueven por el cilindro a medida que éste gira. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes con flujo a contracorriente. (Hernández, 2009)

- **Por aspersion:** en este caso un líquido o una suspensión se pulveriza o se rocía con una corriente de gas o aire caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se vaporiza con rapidez, obteniendo partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas o aire. El flujo de gas o aire y de líquido de la cámara de pulverización puede ser a contracorriente o concurrente. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo. (Hernández, 2009)

- **De circulación directa:** el material se mantiene en un tamiz de transporte continuo, mientras se sopla aire caliente a través de él. Se subdividen en secadores de un paso y secadores de múltiples pasos. (Hernández, 2009)

- **Secadores continuos de túnel:** suelen ser compartimentos de bandejas o carretillas operando en serie. Los sólidos se colocan sobre las bandejas que se mueven continuamente por el túnel con aire caliente. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente o cruzado, o una combinación de ambas. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera. En algunos casos, los materiales en forma de pasta pueden preformarse en cilindros y colocarse sobre el transportador para secarse. (Hernández, 2009)

- **Lecho fluidizado:** posee varias ventajas importantes, que son altas tasas de transferencia de calor y masa, los tiempos de secado son menores, pueden ser diseñados para secar materiales con contenido de humedad desde menos del 10% hasta más del 80%, puede trabajarse desde una temperatura ambiente hasta 200 °C y pueden procesar tanto materiales orgánicos como inorgánicos. (Mazariegos, 2007)

b. **Secadores directos por lotes.** Se diseñan para operar un tamaño específico de alimentación húmeda, con ciclos determinados. En este tipo de secadores las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo.

- **De circulación directo:** se coloca en bandejas con tamiz a través de las cuales se sopla aire caliente.

- **De bandejas o de gabinete:** este tipo de secadores utiliza un proceso adiabático, que a su vez es clasificado como secador de convección de aire por lotes. Consiste en una cabina aislada que posee en un interior un ventilador para circular el aire a través de un calentador, el aire caliente sale por una rejilla y es dirigido horizontalmente entre las bandejas con el alimento. Los calentadores de aire pueden ser quemadores directos de gas, serpentines calentados con vapor, o en los modelos más pequeños, calentadores de resistencia eléctrica. En los sistemas de flujo transversal se utilizan velocidades de 2-5 m³/s y los sistemas de flujo ascendente velocidades de 0.5-1.25 m³/s (m² de área por bandeja). Los secadores de gabinetes resultan relativamente baratos en su construcción, mantenimiento y son muy flexibles. (Cruz, 2002)

2. **Secadores indirectos o de conducción.** El calor se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La rapidez de secado depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. (Mazariegos, 2007)

a. Indirectos continuos

- **De cilindro:** son equipos de elevada capacidad de evaporación y de fácil mantenimiento. Tienen una estructura lateral de vigas en perfiles especiales. Son fabricados de acero inoxidable y tapas planas en acero. Estos cilindros se calientan con vapor y son rotatorios. La alimentación húmeda se introduce por un extremo del cilindro y el producto seco descarga por el otro lado. (Mazariegos, 2007)

- **De tambor:** es un tambor de metal calentado, donde en la parte exterior se evapora la capa delgada de un líquido hasta lograr secarla. El sólido seco final se raspa del tambor, que gira lentamente. (Hernández, 2009)

- **Secador de transportador de tornillo:** está formado por un transportador de tornillo sin fin horizontal encerrado dentro de una carcasa cilíndrica encamisada. La alimentación que entra por un extremo se transporta lentamente a través de la zona caliente y se descarga por el otro extremo. (Mazariegos, 2007)

- **Rotatorios de tubo de vapor:** se transporta el sólido húmedo pulverizado durante unos pocos segundos dentro de una corriente de vapor a agua caliente. El secado tiene lugar durante el transporte. No se requieren más de 3 a 4 segundos para evaporar prácticamente toda la humedad del sólido. La temperatura del vapor es elevada, normalmente de hasta 600 °C a la entrada pero debido a que el tiempo de contacto es tan corto que el sólido alcanza temperaturas de solo 40 °C. (Mazariegos, 2007)

- **De bandejas vibratorias:** es un secador de bandejas que opera al vacío. Las bandejas que contienen los sólidos húmedos se colocan sobre los anaqueles huecos. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Se utilizan para procesar materiales costosos que se afectan por la temperatura. (Hernández, 2009)

b. Indirectos por lotes

- **Artesas agitadas:** pueden operar a presión atmosférica o al vacío, manejan una producción pequeña de cualquier forma de sólido húmedo. (Mazariegos, 2007)

- **Por congelación:** se extrae el agua por medio de un producto congelado por sublimación. El proceso inicia con un pre-congelamiento donde se prepara el sólido, después se somete el sólido a presión negativa para alcanzar el punto triple del agua y finalmente sublimar el agua sin derretir el producto. (Mazariegos, 2007)

- **Rotatorios al vacío:** es un cascarón cilíndrico donde fluye un gas caliente y el sólido a secar. (Mazariegos, 2007)

- **De bandejas al vacío:** se utilizan con polvos húmedos, pastas o líquidos densos, destinados a la industria química y farmacéutica. Se usa vacío para prevenir fenómenos de condensación. (Mazariegos, 2007)

F. Energía en alimentos

En materiales con altos contenidos de carbohidratos (azúcares), la entalpía del producto se calcula con la siguiente ecuación: (Garcés, 2011)

$$C_p = (0.2 + 0.8x_s) * 4.1868$$

G. Gas licuado de petróleo

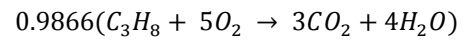
El gas licuado de petróleo (GLP) es un producto compuesto por propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}). Se obtiene del proceso de refinación del petróleo y de plantas recuperadoras de Gas Natural. El GLP es utilizado en cilindros para usos domésticos como calefacción y cocina, además para procesos de combustión en la industria de alimentos. En Guatemala existen dos industrias grandes de venta de GLP, una de ellas es *Tropigas*. *Tropigas* trabaja un combustible con las siguientes características: (Guatemala, 2015)

Tabla 1 Características de GLP comercializado por Tropigas Guatemala

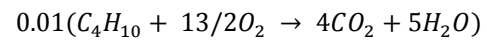
Composición	Propano = 98.66% Butano = 1% Otros = 0.34%
Punto de ebullición	Propano = -42 °C Butano = (0 °C)
Presión normal a temperatura ambiente	Propano = 9 kg/cm ² Butano = 2 kg/cm ²
Solubilidad en agua	No soluble
Gravedad específica del gas (Aire =1)	Propano = 1.53Kg Butano = 2kg
Gravedad específica del líquido (Agua =1)	Propano = 0.508kg Butano = 0.584kg
BTU por galón de gas a 60°F	Propano 91,287 Butano 102,986
Libras por galón de líquido a 60°F	Propano = 4.24 Butano = 4.88

Las reacciones de combustión serán:

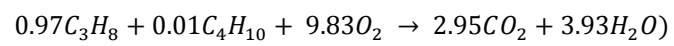
- Propano:



- Butano:



- Total



V. Antecedentes

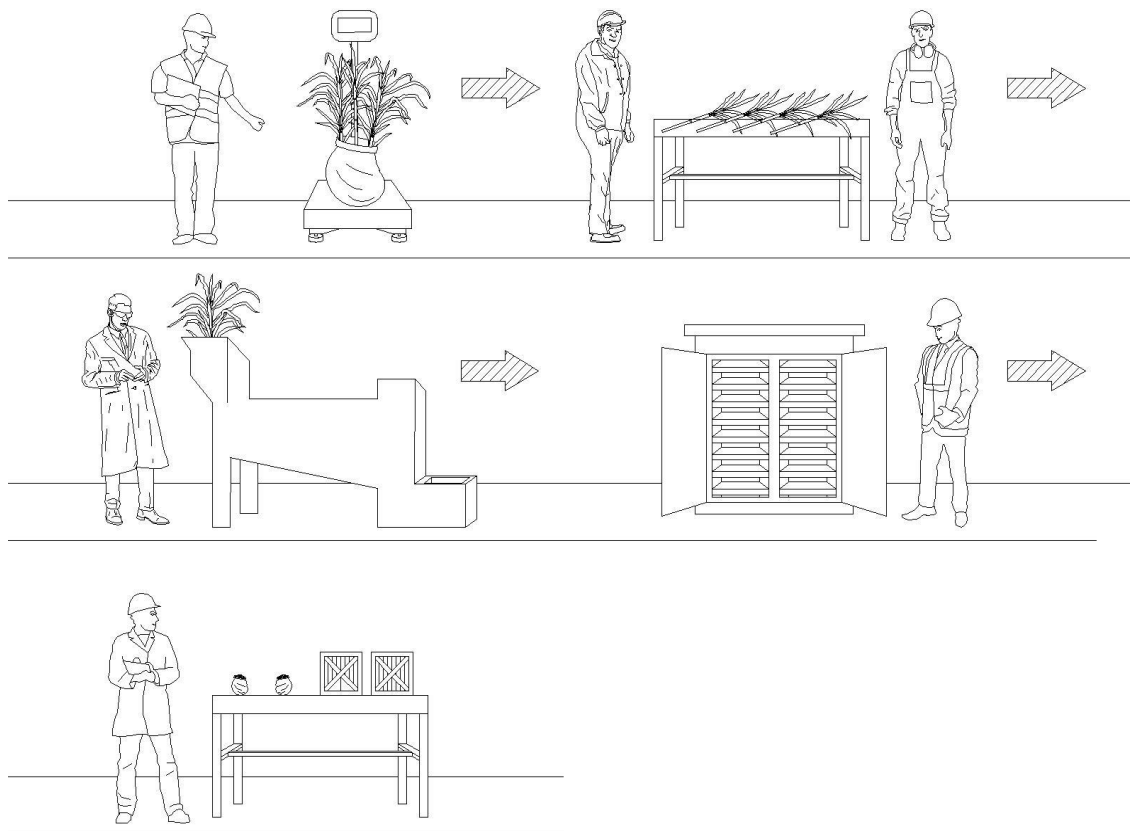
Alimentos Campestres S.A. es una empresa guatemalteca especializada en la deshidratación de frutas, actualmente es una industria temporal donde su mayor época de producción es de mayo a diciembre. Los productos son dirigidos a una amplia gama de mercados tales como: supermercados, mercados, tiendas y el sector industrial. Las relaciones comerciales son dentro del mercado nacional e internacional. La empresa cuenta con dos plantas de producción, una de ellas ubicada en la aldea Palo Amontonado, El Progreso que se dedica a la deshidratación usando energía solar; y la segunda planta ubicada en la ciudad capital siendo esta planta la que se mantiene en operación mayor cantidad de tiempo en el año.

La planta de la ciudad de Guatemala cuenta con dos deshidratadores y la planta de Palo Amontonado cuenta con cuatro equipos de deshidratación. Se deshidratan una gran variedad de productos, los principales son: guayaba, manzana, caña de azúcar, plátano, tamarindo, pera y piña.

En la planta de la ciudad capital se realizan procesos por lotes, donde en cada lote se procesan aproximadamente 1,056 kg de producto fresco. La cantidad obtenida en seco depende del producto a procesar, por ejemplo en el caso de la caña de azúcar se obtiene un 20% de la cantidad ingresada. Esto quiere decir que se necesitan 5 kg de producto fresco para producir 1 kg de producto seco.

El manejo de la fruta se desarrolla desde la recepción de materia prima, diariamente ingresa fruta fresca para ser procesada durante el día. El producto ingresado es pesado, clasificado y lavado, para luego ser acondicionado en un tamaño adecuado para el deshidratado. En el caso de la caña de azúcar, esta se recibe pelada y en trozos, y luego es cortada en rajas con dimensiones de entre 12 y 18 cm de longitud y un grosor entre 0.2 y 0.5 cm. El diagrama general del proceso se encuentra en la Ilustración no. 6.

Ilustración 5 Diagrama de flujo del proceso de caña de azúcar



Al tener la fruta cortada se procede a cargar los deshidratadores, cada deshidratador tiene forma de octágono con un volumen aproximado de 19.7m^3 que cuentan con 5 clavijeros cuadrados y 4 triangulares. Cada clavijero tiene un total de 25 bandejas, tanto los clavijeros como las bandejas están contruidos de acero. El espacio entre bandejas es de 10 cm y con producto la diferencia es de 6 cm. Las bandejas que se utilizan tienen las siguientes dimensiones:

Ilustración 6 Dimensiones de bandejas para deshidratación

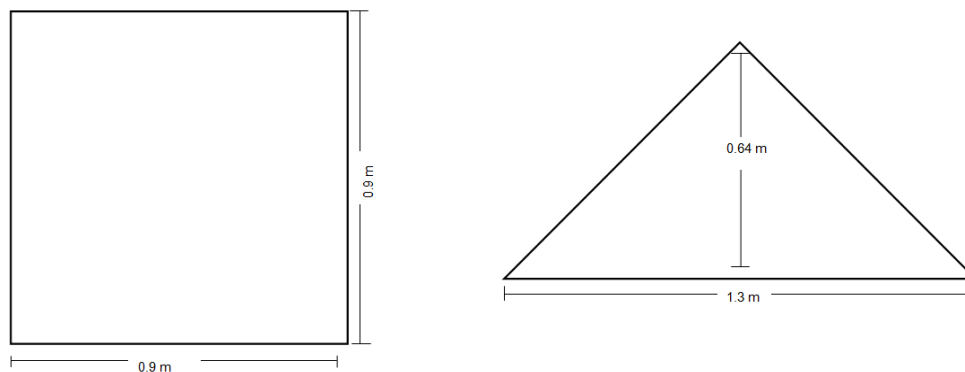
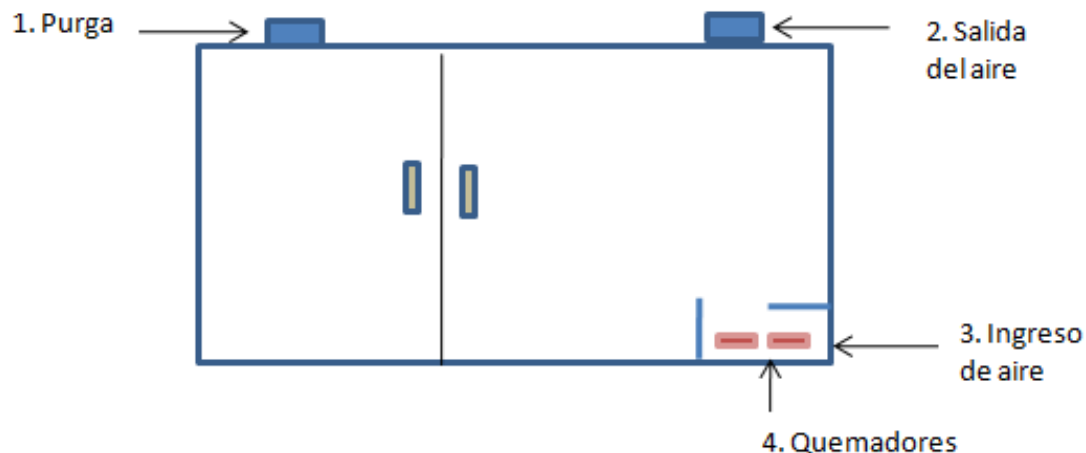


Ilustración 7 Vista frontal del deshidratador



Los deshidratadores están contruidos de cemento con puertas de acero, las cuales tienen un aislamiento de poliestireno. La deshidratación sucede gracias a aire caliente que circula de forma perpendicular a una velocidad promedio de 1.44 m/s, el área de ingreso de aire es de 3.24 m². El aire es calentado por medio de GLP y es alimentado del ambiente. El proceso de combustión de GLP se lleva a cabo en dos quemadores atmosféricos de llama azul, los cuales se encuentran ubicados en la parte inferior del deshidratador.

El aire al ser calentado ingresa al deshidratador donde por medio de convección cede calor sensible al producto para luego iniciar la vaporización de agua. El mismo aire funciona como medio para eliminar el agua evaporada.

El aire ingresa por dos turbinas de 1.19 m de diámetro que funcionan con un motor de 3HP cada una. Además cuenta con una purga con un área de salida de 0.07 m², que extrae el aire gracias a una turbina de 43 cm de diámetro que funciona con un motor de 3HP.

VI. Metodología

A. Parámetros a medir en el sistema

1. Contenidos de humedad del producto a la entrada y a la salida del proceso: porcentaje en base húmeda (kg de agua/ kg de fruta húmeda).
2. Temperatura en la entrada y salida del aire: °C
3. Temperatura del producto antes de ingresar y a la salida del proceso: °C
4. Cantidad de producto a secar: kg
5. Flujo másico del aire de secado: kg/s
6. Porcentaje de humedad relativa en la entrada y salida del aire
7. Tiempo de secado: hora
8. Consumo de combustible: m³ de GLP gaseoso.

B. Equipos utilizados

1. Higrómetro con rango de temperatura de 20 a 100 °C, marca Pyle PTHM 15.
2. Termómetros de vástago de acero inoxidable con rango de temperatura de 20 a 100°C
3. Anemómetro con sonda flexible Pyle PMA 90.
4. Equipo de deshidratación convectivo tipo batch con capacidad de de 1500 kg con un volumen de 19.7m³ (altura: 2m, largo: 3m y ancho: 3.22m).
5. Tanque de gas propano
6. Medidor de diafragma volumétrico
7. Balanza digital con capacidad de 100 kg

C. Métodos

Las variables evaluadas fueron medidas durante la deshidratación de caña de azúcar con procesos que utilizan 1,056 kg de producto en fresco sometido a una temperatura promedio de 65°C durante 22 horas. Con los datos obtenidos se realizaron balances de masa y energía, la curva de secado del producto por su ubicación en el deshidratador y un análisis del consumo teórico de gas propano comparado con el consumo actual. Además se determinarán los costos actuales del proceso.

1. **Contenidos de humedad en la entrada y salida del producto.** Esta es una de las variables claves durante el proceso, ya que lo que se busca es alcanzar elaborar un producto con una humedad menor al 15% (base húmeda). Se realizaron dos tipos de pruebas para la determinación de las humedades:

- Pruebas de laboratorio: se enviaron tres muestras de producto fresco y tres muestras de producto seco a FQB Laboratorios para poder determinar la humedad en el producto por medio de la incineración total de la caña de azúcar y así por la diferencia de pesos conocer la humedad total. Las muestras fueron tomadas utilizando guantes, las muestras de producto fresco se tomaron luego del proceso de lavado y corte de la caña de azúcar, se tomaron 200 g y se colocaron dentro de bolsas estériles proporcionadas por el laboratorio. Las muestras de producto seco se tomaron al momento de finalizar el proceso de deshidratación, igualmente se colocó 200 g de producto dentro de bolsas estériles.
- Pruebas empíricas: con el fin de lograr construir la curva de secado del producto en los diferentes puntos del deshidratador, durante un proceso se pesaron bandejas de cada punto con producto fresco. Cada cierto tiempo se abría el secador se sacaba una de las bandejas pesadas y se pesaba de nuevo. Se repitió el proceso durante las 20 horas de secado y finalmente la diferencia de peso y conociendo la humedad en la caña fresca se logró determinar la humedad final en el producto.

2. **Temperaturas y humedad de aire a la entrada y salida.** Se evaluó aleatoriamente la temperatura, humedad relativa y temperatura de bulbo húmedo del aire del ambiente y del aire de salida. Para esto se utilizó un higrómetro con rango de temperatura de 20 a 100 °C, marca Pyle PTHM 15. Estos valores permitieron obtener la energía en el aire con ayuda de una carta psicrométrica a presión atmosférica. Las mediciones se realizaron cada hora durante las 22 horas del proceso de deshidratación.

Las condiciones de entrada se midieron el punto 3 según la ilustración 6, esto debido a que el aire de ingreso proviene del ambiente. Las condiciones de salida fueron medidas en el punto 2 dentro del ducto que proviene del deshidratador.

3. **Consumo de combustible.** Los días de deshidratación de caña de azúcar fueron 77 donde cada día se midió el consumo de gas en m³ utilizando un medidor de diafragma volumétrico. Cada día se utilizaban los dos hornos de la planta, cada horno posee un medidor individual. Por lo que al momento de iniciar un batch se tomaba la última lectura, al cabo de una hora se tomaba la nueva medición y por diferencia se conocía el consumo por hora. Las mediciones fueron tomadas durante cada hora de proceso y se obtuvo el consumo total en m³ del lote procesado.

4. **Caudal de aire.** Por medio de un anemómetro se tomaron mediciones de velocidad del aire dentro del deshidratado, midiendo en diferentes puntos frente a las turbinas.

5. **Pruebas adicionales.** Con el fin de tener mayor detalles de los procesos se realizaron las siguientes pruebas:

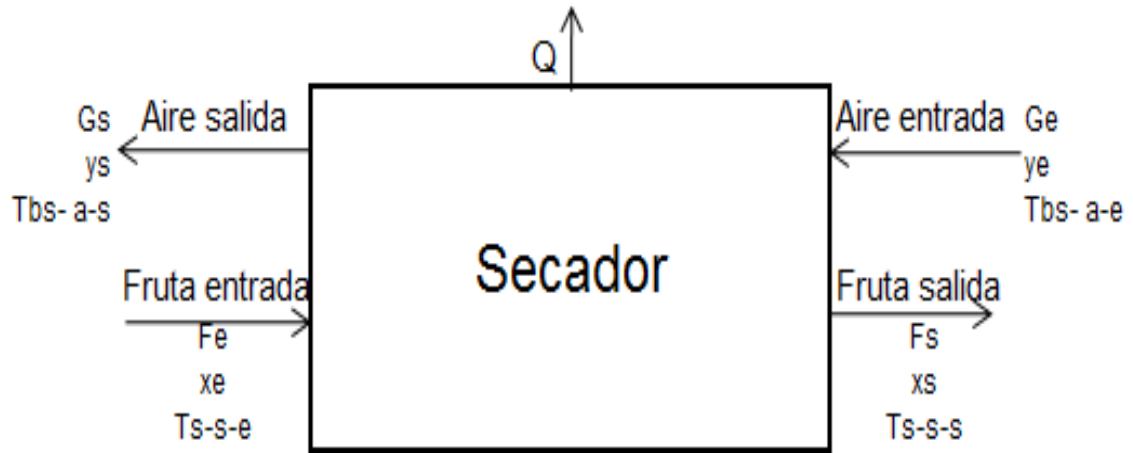
- Reproceso: en cada lote producido se obtiene cierta cantidad de producto que no es apto para su empaque final debido a que presenta humedades superiores al 15% (base húmeda). Por lo que se buscó colocar la caña de azúcar de forma equitativa en cada bandeja, y se realizaron lotes donde la caña fue pesada para colocar en cada bandeja la misma cantidad. Al realizar esta prueba se evaluó la humedad de producto en cada punto del deshidratador para evaluar la uniformidad de secado y además se llevó un control de la cantidad de reproceso obtenida comparada con los lotes anteriores.
- Uso de purga: con ayuda de un variador de frecuencia se evaluó el efecto de la purga durante un proceso de deshidratación. Para conocer su efecto se modificaron la frecuencia de operación de la turbina y ver el cambio en las condiciones del aire del proceso. Las mediciones del aire se realizaron en el punto 1 según la ilustración 6.

6. **Análisis de datos.** Los datos recopilados fueron tratados en un balance de masa y energía para evaluar los rendimientos. Se construyeron curvas de secado de velocidad de secado vs tiempo con el fin de conocer el punto crítico de operación y así determinar el tiempo teórico necesario para realizar el proceso bajo esas condiciones.

Los datos obtenidos fueron comparados con la teoría para determinar los cambios y mejoras necesarias.

VII.Resultados

Ilustración 8 Balance global de secado en un deshidratador de gabinete por convección



En la Ilustración 9 se representa el balance global de masa y energía, los datos y la descripción de los flujos se detallan en las dos tablas siguientes, el tiempo promedio de secado por lote es de 20 horas y los balances fueron realizados en base a un lote de 1056 kg de caña fresca.

Tabla 2 Descripción del balance de masa global

Flujo	Valor	Descripción
F_e	1,056 kg	Alimentación en fresco de caña de azúcar
x_e	87.7%	Porcentaje de humedad promedio en la caña de azúcar.
T_{s-s-e}	28.7 °C	Temperatura de superficie del producto al momento de ser ingresado.
F_s	211 kg	Cantidad de fruta seca obtenida
x_s	3.3%	Porcentaje de humedad final en la caña de azúcar deshidratada
T_{s-s-s}	38.5 °C	Temperatura de superficie del sólido al finalizar el proceso.
G_e	473,760 kg aire + 699.9 kg de GLP	Cantidad de aire ingresado durante todo el proceso a una velocidad de 1,77 m/s, más el combustible utilizado.
y_e	0.014 kg de vapor por kg de aire seco	Humedad absoluta promedio del aire de ingreso, obtenido según carta psicométrica a las condiciones de entrada.
T_{bs-a-e}	28.7 °C	Temperatura de bulbo seco del aire al momento de ingresar.
G_s	473,760 kg + 845 kg de vapor de agua + 102.88 kg de agua de combustión + 597.02 de gases de combustión	Cantidad de aire de salida, junto con el agua eliminada de los productos, el agua de combustión y los gases de combustión.
Y_s	-	La humedad absoluta en el aire de salida depende del momento en que se realice la lectura. Ver Tabla No. 19
T_{bs-a-s}	68.8 °C	Temperatura promedio de bulbo seco del aire a la salida.

Al realizar un balance por la cantidad de agua quedaría de la siguiente forma:

$$G_e y_e + F_e x_e + A_{comb} = G_s y_s + F_s x_s + A_{comb}$$

Ecuación 5 Balance de masa por componente (agua)

Donde A_{comb} es el agua generada durante la combustión asumiendo combustión completa.

El balance de energía global del secador sería:

$$Q_{F-e} + Q_{G-e} + Q_{glp} = \sum Q_{F-s} + \sum Q_{G-s} + Q_{perdidas}$$

Ecuación 6 Balance global de energía

Tabla 3 Balance de energía global promedio

Flujo	Ecuación	Valor	Descripción
Q_{F-e}	$F_e C_{pe}(T_{s-s-s} - T_{s-s-e})$	19,691.87 kJ	Calor necesario para llevar la fruta de temperatura ambiente a la temperatura de bulbo húmedo del aire.
Q_{G-e}	$G_e h_{a-e}$	434.59 kJ	Energía que tiene el aire a las condiciones de ingreso según la carta psicométrica.
Q_{glp}	$m_{comb} h_{comb}$	861,047,276.5 kJ	Energía que ofrece el combustible
Q_{F-s}	$F_s C_{ps}(T_{s-s-s} - T_{s-s-e})$	-4,584.99 kJ	Energía contenida en el producto al finalizar el proceso.
Q_{G-s}	$\Sigma G_i h_i$	-842,944,528.3 kJ	Es la energía total eliminada con los flujos de aire.
$Q_{perdidas}$	Resolviendo la ecuación 6	18,118,289.67 kJ	Es la diferencia entre el calor suministrado y el calor eliminado

Tabla 4 Humedad promedio en caña de azúcar fresca

	Promedio de humedad	Desviación estándar
Caña de azúcar fresca	87.7%	1.464

Nota: Se tomaron tres muestras de caña fresca

Tabla 5 Humedad promedio en producto deshidratado

	Promedio base humedad	Desviación estándar para base humedad	Promedio base seca	Desviación estándar para base seca
Bandejas cuadradas	3.731%	0.658	23.173%	3.121
Bandejas triangulares	3.055%	1.206	19.523%	6.38
Humedad global	3.39%	0.943	21.6%	4.886

Nota: Se tomaron 387 mediciones de peso para determinar la humedad, más tres muestras de laboratorio. Ver Tabla 18.

Tabla 6 Velocidad promedio de secado por tipo de bandeja

Tipos de bandejas	Nc promedio (kg evaporados/ m ² min)
Cuadradas	0.0161
Triangulares	0.0187

Nota: Se tomaron 387 mediciones de peso por bandeja. Ver Tabla 18.

Tabla 7 Tiempo teórico de secado bajo las actuales condiciones de operación

Tiempo promedio por bandejas cuadradas	92.66 min
Tiempo promedio por bandejas triangulares	94.08 min
Tiempo total de deshidratación	12.45 horas

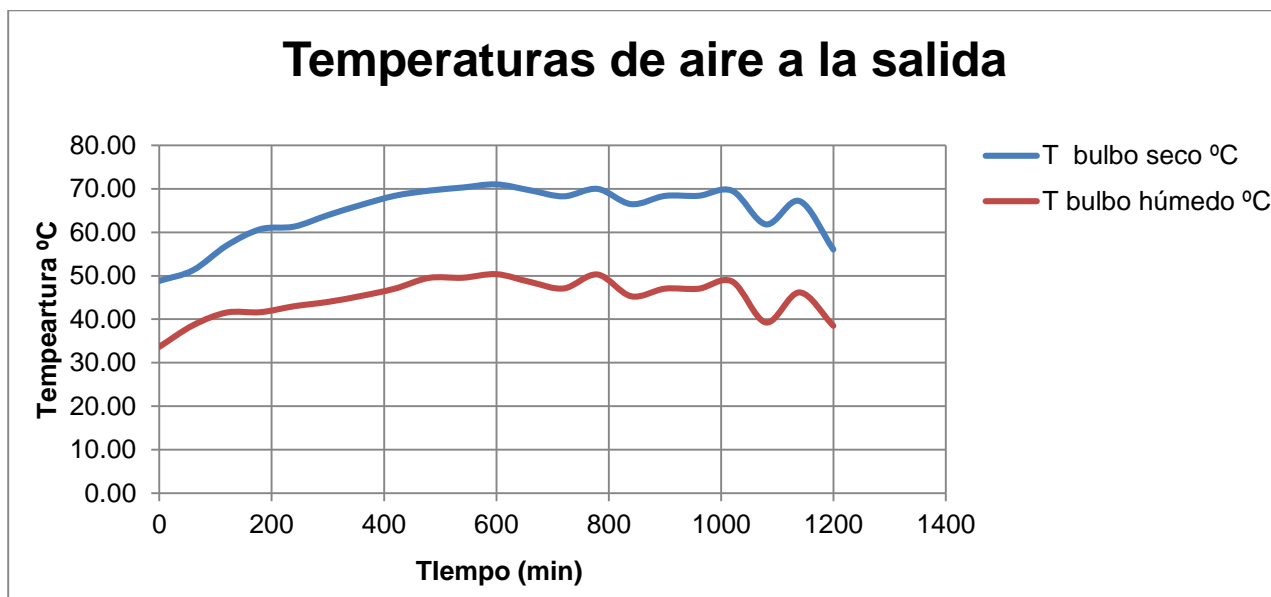
Nota: En base a las 387 mediciones de peso. Ver Tabla 18.

Tabla 8 Condiciones promedio de aire de entrada

	% de humedad	Temperatura de bulbo seco °C
Promedio	56.816	28.7
Desviación estándar	4.08	4.81

Nota: se tomaron 20 mediciones. Ver tabla 32

Ilustración 9 Temperaturas de bulbo seco y húmedo a lo largo del proceso de deshidratación



Nota: se tomaron 20 mediciones durante 20 días de proceso de caña de azúcar, las medidas se tomaron en el punto en el punto 2 según la Ilustración 8.

Tabla 9 Consumo de gas propano por lote

Promedio de gas consumido por lote (m³)	33.91
Tiempo promedio de deshidratación	20
Consumo promedio por hora (m³/h)	1.66

Nota: se tomaron 77 mediciones, ver Tabla 33.

Tabla 10 Productos de la reacción de combustión

H₂O producido	102.88 kg
---------------------------------	-----------

*Nota: según reacciones de combustión
asumiendo combustión completa*

Tabla 11 Consumo de energía en base al consumo de GLP

Q_{GLP} (kJ/h)	42,146,220.1 kJ/h
Consumo por kg de agua evaporada (kJ/kg evaporada)	1,018,990,86 kJ/kg evaporada

Nota: según calor de combustión

Tabla 12 Flujo promedio aire ingresado y renovaciones por hora

Flujo de aire (m³/s)	Renovaciones por hora
5.75	1,053

Nota: se tomaron 20 mediciones. Ver Tabla 32.

Tabla 13 Eficiencia global

Energía teórica para evaporar el agua eliminada del sistema	Cantidad de gas teórico	Eficiencia del proceso
2,112,602.88 kJ	23.24 m ³	0.245%

Tabla 14 Costos de producción de caña de azúcar deshidratada

Precio de caña (Q/kg)	Q 2.02
Costo de mano de obra (Q/día)	Q 733.67
Costo de gas propano (Q/gal)	Q16
Costo final de caña deshidratada (Q/kg)	Q16.4

VIII. Discusión

Se realizaron pruebas de secado durante dos meses y medio, tomando como base el proceso de secado de caña de azúcar. Durante el proceso experimental se analizaron parámetros de temperatura, humedad, consumo de gas propano, tiempos de secado y cantidad de producto procesado.

A. Humedades en la entrada y salida del producto

Para considerar la variación espacial y de tiempo se tomaron muestras en los nueve puntos que se muestran en la Ilustración 10 con el fin de incluir las variaciones del contenido de humedad. El muestreo se realizó aleatoriamente cada 20 minutos durante las 22 horas de proceso. Los datos de la Tabla 5 muestran que las desviaciones en los resultados son mayores para las bandejas triangulares. Esto puede ser debido a la distribución de producto, ya que por presentar menor área las bandejas triangulares no tienen una dispersión de producto estándar ya que debido a su forma no son de fácil manipulación dentro del equipo de secado y el personal aglomera el producto al centro de la bandeja.

En cuanto a la variación de la humedad final en el producto, la teoría indica que una buena uniformidad de secado debe mantenerse con una variación de 0.75, en este caso se tiene una variación de 0.943 para humedad en base húmeda y 4.886 en base seca, esto puede ser debido a la distribución de aire en el interior o también por la distribución del producto en las bandejas.

La variación obtenida se observa diariamente en el producto que necesita un reproceso, actualmente el reproceso se encuentra entre un 5.5%. El reproceso es producto que no cumple con las condiciones de humedad y por lo tanto se ingresa nuevamente por aproximadamente 4 horas más a deshidratar. Con el fin mejorar la distribución de producto dentro del deshidratador durante el proceso de deshidratación se implementó un cambio que ayudó a mejorar la uniformidad de humedad en la caña de azúcar deshidratada. El cambio realizado fue que debido a que un deshidratador posee 125 bandejas cuadradas y 100 bandejas triangulares, y una bandeja cuadrada representa el área de dos bandejas triangulares, se decidió que el producto ingresado debía ser distribuido en 175 canastas plásticas con aproximadamente 6 kg cada canasta para hacer un total de 1056 kg. Entonces al momento de cargar el deshidratador los colaboradores debían colocar una canasta completa por bandeja cuadrada y la mitad de la canasta por bandeja triangular.

Con el cambio en la distribución de producto este cambio se logro realizar una nueva prueba que fue procesar 2270 kg por lote. Logrando aumentar la capacidad del deshidratador y además el consumo de gas no se vio alterado a pesar del aumento de producto.

En la Tabla 6 se muestra la rapidez crítica de secado, esto indica la cantidad de masa que se evapora por unidad de área y tiempo. En congruencia con la Tabla 3 se observa que las bandejas triangulares presentan una mayor pérdida de humedad debido que la cantidad de producto trabajado es menor y el área de transferencia de calor es más pequeña lo que aumenta la velocidad.

Inicialmente los procesos de deshidratación tenían una duración de 22 horas, al realizar algunas pruebas deteniendo el proceso antes se determinó que el proceso puede finalizarse a las 20 horas obteniendo la caña de azúcar a las mismas condiciones que cuando se utilizan 22 horas. Por lo tanto actualmente los procesos de deshidratación tienen una duración de 20 horas, a pesar de la reducción realizada se puede observar en la Tabla 7 que teóricamente se necesitan 12.45 horas para completar el proceso de deshidratación y obtener un producto de una humedad promedio de 3.39% (base húmeda). A pesar de estar utilizando 7.55 horas más de proceso todavía existe producto que no sale a las condiciones deseadas. Numéricamente aproximadamente un 5.5% del producto obtenido debe ser reprocesada, esto quiere decir que la distribución del producto y del aire no es la más adecuada. Más adelante se discutirá el balance energético profundizar en el tema.

B. Temperaturas del aire a la entrada y salida del proceso

La teoría indica que si un sólido se coloca sobre platos que se van a secar unos encima de otros, tal cual se deshidrata en *Alimentos Campestres*, la mayor parte del sólido sólo recibe energía de radiación del fondo de la charola que se encuentra inmediatamente encima y temperaturas menores de 100 °C no es probable que sea importante la radiación. (Treybal, 2007) Por lo tanto en este caso la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura superficial del producto es la misma. Como se observa en la ilustración 9 siempre existe un gradiente de temperatura que permite el intercambio de masa y energía.

C. Consumo energético

La energía evaluada en esta tesis es sobre la brindada por el GLP, proveído por la empresa *Tropigas* de Guatemala. El consumo promedio de gas reportado durante el proceso de deshidratación es fue de 33.91 m³, esto equivale a 37.2 galones líquidos de GLP por lote, mientras que históricamente se tenía de referencia un consumo de 50 galones por lote. Algunas de acciones que ayudaron a esta disminución fue el colocar un control de los tanques de gas y además se solicitó una capacitación al proveedor donde brindaron las recomendaciones necesarias para el llenado de los tanques y así evitar las pérdidas. Otro factor importante en la disminución del gas fue el controlar la presión de ingreso del gas a los quemadores, ya que se observó que cuando se trabajaba a presiones superiores a los 10 psi se aumentaba el consumo, determinando que la mejor presión de trabajo era en 8 psi.

Con base en los 33.91 m³ de GLP consumidos y sabiendo según la Tabla No 1. la entalpía de combustión del gas es de 96,109.23BTU/gal de gas. Con estos datos se pudo calcular la cantidad de energía que brinda el combustible, la cual es de 861,047,276.55 kJ.

Durante el proceso de secado el aire absorbe tanto el agua generada por combustión como el agua evaporada del producto. El agua generada durante la combustión representa el 11% del agua evaporada del producto.

La teoría indica que la mayor parte de secadores de alimentos consumen aproximadamente 2,785 kJ/kg a 3,480 kJ/kg evaporados. (Hernández, 2009) Como se muestra en la Tabla 11, el consumo está muy por arriba sobre lo que indica la teoría, esto puede deberse primeramente por la distribución de aire que se está ingresando y segundo por la cantidad de aire que ingresa. Otro factor importante es el mencionado con anterioridad del secado uniforme, aproximadamente a las 12 horas de proceso existe producto que ya tiene las características necesarias pero debido a la mala distribución no se puede detener el proceso ya que esto implicaría aun mayor gasto el tener que reprocesarlo.

D. Flujo volumétrico de aire que ingresa

Los datos de la Tabla 12 muestran el flujo de aire ingresado y las renovaciones de aire que existen por hora, como se demuestra la permanencia del aire en el sistema es por un período muy corto por lo que no permite saturarse el aire y la energía es desperdiciada. Al realizar las pruebas de aire utilizando purga y sin purga (ver Tabla 25) se pudo observa que la influencia de esta no era significativa ya que el flujo de salida varía entre una prueba y otra en 0.36 donde estadísticamente no es significativo y solamente tiene un impacto en el consumo eléctrico al estar utilizando la turbina de purga sin lograr efecto alguno.

E. Eficiencia energética

Según la teoría se necesita 2,500 kJ de energía para evaporar un kilogramo de agua (Cruz, 2002), la Tabla 12 muestra la eficiencia del proceso según la energía que brinda el gas propano. Se puede observar que la eficiencia es bastante baja, esto se debe a que el aire es renovado constantemente lo que ocasiona pérdidas de energía y además se está ingresando una alta cantidad de aire. Además debido a la mala distribución de los flujos en el interior se está desperdiciando gran parte de la energía. Es importante recordar que existe un calor sensible y un calor latente, para efecto del cálculo de la eficiencia energética se tomo en cuenta únicamente el calor latente, ya que el calor sensible en comparación al latente no es significativo esto es debido a la cantidad de agua que debe ser evaporada.

F. Costos de deshidratación

Al utilizar en el proceso 33.9 m³ de GLP se gastan Q592 de gas por lotes, mientras que si se logra reducir el tiempo de deshidratación y mejorar las condiciones del aire se tendría un gasto de 23 m³ y esto representa un gasto por lote de Q400. Además influye en que el costo de producción de kilogramo de caña sería de Q15. Anualmente se tendría un ahorro en los costos de producción de Q5,760 solamente de gas propano

IX. Conclusiones y recomendaciones

- A. La humedad relativa en el aire tiene un comportamiento decreciente, inicia aproximadamente en 52% y termina en 3%. Esto indica que a medida que el proceso avanza el aire cada vez se encuentra más seco y representa pérdida de energía. Por lo que debería ingresarse menos aire ya que el proceso llega al punto crítico y la cantidad de agua a evaporar disminuye.
- B. Según las curvas de secado de velocidad de secado vs humedad en base seca se encontró que el tiempo de deshidratación para obtener caña de azúcar a 3.39% (Base seca) es de 12.45 horas. Mientras que actualmente se realizan procesos de 20 horas.
- C. Se determinó que la velocidad crítica de secado para las bandejas cuadradas que pueden contener 6.5 kg de producto es de 0.0161 kg evaporados/ m² min y para las bandejas triangulares que pueden contener 3.3 kg es de 0.0187 kg evaporados/ m² min.
- D. Actualmente se utilizan 1,018,990.86 kJ por kilogramo de agua evaporada teniendo una eficiencia energética de 0.245%, esto debido a las pérdidas por mala distribución y exceso de aire.
- E. Si el proceso se trabajara con 12.45 horas se tendría un gasto de 23 m³ teniendo un ahorro mensual de Q5,760 en consumo de gas propano.
- F. Actualmente un kilogramo de caña deshidratada cuesta Q16.13, mientras que en un proceso con una mayor eficiencia el producto tendría un costo de Q15.00. Y si anualmente se procesan alrededor de 155,000 kilogramos, el ahorro económico resulta significativo.
- G. Realizar un estudio de las velocidades, temperaturas y humedades en cada punto del deshidratador a lo largo del proceso. Con esto se busca evaluar la necesidad de colocar placas deflectoras que ayuden a crear un flujo turbulento y además redireccionar el aire a todos los puntos del deshidratador.
- H. Diseñar un nuevo sistema de purga que permita crear una recirculación y renovación de aire adecuada para aprovechar de mejor manera la energía.
- I. Diseñar un sistema para el manejo de las turbinas, para que al momento de que la humedad relativa en el aire disminuya por debajo del 40% se disminuya el flujo de aire y de esta manera evitar pérdidas energéticas.
- J. Mejorar el sistema de rotación de los clavijeros, para asegurar que todos los lugares reciban de igual manera el flujo de aire caliente.
- K. Mejorar el aislamiento de las puertas para evitar pérdidas de aire y de energía.
- L. Evaluar la combustión en los quemadores para brindar la operación adecuada.

X. Bibliografía

- Cruz, E. (abril de 2002). Revisión bibliográfica deshidratación. Recuperado el mayo de 2015, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2540/Capitulo2.pdf>
- Ellwanger, L. C. (2009). *Evaluación técnica de los procesos de deshidratación osmótica y convectiva durante una práctica vinculada en una planta deshidratadora de berries*. Valdivia Chile: Universidad Austral de Chile.
- Garcés, R. V. (2011). *Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera*. Colombia: Universidad tecnológica de Pereira.
- Guatemala, T. (2015). *Ficha técnica de GLP*. Guatemala: Tropigas Guatemala.
- Hernández, Z. P. (2009). *Equipos, máquinas e instalaciones para el proceso de secado*. Venezuela: Universidad Nacional Experimental Francisco Miranda.
- Mazariegos, B. (2007). *Proceso de secado y sus equipos*. Recuperado el 20 de octubre de 2015, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/mazariegos_b_d/capitulo5.pdf
- Paetau, I. V. (2006). *Diseño de un deshidratador de bandejas y un intercambiador de calor que aprovecha el calor de las chimeneas de hornos de gas propano*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Paz, M. (2005). *Guía de secado para frutas, legumbres, hortalizas, plantas y carnes*. Paraguay: Fundación Celestina Pérez de Almada.
- Ramírez, M. E. (2013). *Psicrometría*. Nicaragua: Recinto Universitario Augusto C. Sandino.
- Schmalko, M. (2009). *Estudio de la eficiencia energética de un secador de yerbas*. Argentina: Universidad Nacional de Misiones.
- Solano, E. M. (2010). *Montaje y puesta en marcha de un secador por lotes semiautomático de bandejas por aire caliente*. Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Treybal, R. (2007). *Operaciones de transferencia de masa*. México: Programas educativos S.A.

XI. Apéndice

A. Datos de placa de equipos utilizados

Tabla 15 Datos de placa higrómetro

Marca	Pyle
Modelo	PTHM 15
Rango de operación	20 a 100 °C

Tabla 16 Datos de placa anemómetro

Marca	Pyle
Modelo	PMA 90
Precisión de velocidad	+/- 3%
Precisión temperatura	+/- 4%

Tabla 17 Datos de placa medidor de gas propano

Marca	Elster
Modelo	AL-425
Presión que soporta	170 Kpa
ANSI Class	400

B. Datos recopilados

Tabla 18 Pesos de bandejas a diferentes tiempos durante el proceso de deshidratación

Tiempo (min)	Cuadrada 1 (kg)	Triangular 1 (kg)	Cuadrada 2 (kg)	Cuadrada 3 (kg)	Triangular 2 (kg)	Cuadrada 4 (kg)	Triangular 3 (kg)	Cuadrada 5 (kg)	Triangular 4 (kg)
0	14.05	7.115	14.2875	14.3675	6.5675	14.615	6.2425	13.8525	6.9975
102		6.3		13.255	5.34				
171				11.19			5.64		
197								10.76	5.28
224	9.83	4.13					4.99		4.78
253	9.23	4.13						10.1	3.27
275				8.91	3.91	9.13			
315		3.8				9.06	4.56		

Tiempo (min)	Cuadrada 1 (kg)	Triangular 1 (kg)	Cuadrada 2 (kg)	Cuadrada 3 (kg)	Triangular 2 (kg)	Cuadrada 4 (kg)	Triangular 3 (kg)	Cuadrada 5 (kg)	Triangular 4 (kg)
325								8.26	
344				7.71	3.47			7.17	2.82
373	6.84	2.6							2.49
393		2.6					2.82		
423	6.08	2.06		6.03	2.125				
449						7.005			
475				4.94	1.95				
502								4.45	1.955
528	4.615								1.3
555		1.63							
581				3.36					
605					1.39	4.61			
633							2.38	3.26	
659		1.41		2.71				2.82	
686		1.3				2.82			
713	3.69							2.49	
739	3.15			2.39	1.39				1.09
765		1.19							
791						2.49	1.94		
818							1.08	2.49	0.97
844	2.28								
897				2.28					
923							1.08	2.49	
950								2.39	
976	2.28	1.19						2.39	0.97

Tiempo (min)	Cuadrada 1 (kg)	Triangular 1 (kg)	Cuadrada 2 (kg)	Cuadrada 3 (kg)	Triangular 2 (kg)	Cuadrada 4 (kg)	Triangular 3 (kg)	Cuadrada 5 (kg)	Triangular 4 (kg)
1028							1.08		
1055				2.28	1.28	2.49			
1081						2.49	1.08	2.385	
1116							0.93		0.975
1167	2.17								
1213	2.17	1.19	2.30	2.21	1.04	2.38	0.93	2.35	0.97

Tabla 19 Condiciones del aire de ingreso, ubicación 3 según Ilustración 6

No	Porcentaje de humedad	T °C (bulbo seco)
1	46.91	48.85
2	61.53	26.20
3	60.01	26.51
4	59.49	26.90
5	58.39	27.81
6	57.16	28.02
7	56.33	28.71
8	54.60	28.68
9	53.19	28.61
10	52.47	28.81
11	49.01	27.70
12	60.19	27.30
13	59.87	28.10
14	55.60	26.70
15	58.42	26.88
16	57.34	27.32
17	54.78	26.90
18	63.10	27.80
19	59.01	28.20
20	58.92	28.01
Promedio	56.816	28.7
Desviación estándar	4.08	4.81

Nota: los datos fueron tomados con ayuda de un higrómetro.

Tabla 20 Condiciones de aire de salida en la ubicación 2 según Ilustración 6

Hora No	Porcentaje de humedad	T °C	T punto de rocío °C	T bulbo húmedo °C	T lectura °C
0	46.91	48.85	31.05	33.64	43.3
1	52.13	51.31	35.98	38.61	52.8
2	46.07	57.00	38.10	41.54	59.0
3	38.72	60.75	38.44	41.62	62.3
4	36.08	61.35	37.33	42.99	65.2
5	32.18	63.99	35.35	43.99	66.3
6	27.36	66.37	35.98	45.38	69.2
7	23.28	68.47	33.10	47.07	71.2
8	20.55	69.62	30.32	49.52	72.8
9	17.48	70.34	26.07	49.55	74.3
10	14.07	71.07	23.00	50.38	75.0
11	13.08	69.70	21.57	48.59	75.2
12	11.64	68.32	22.73	47.09	75.3
13	8.28	70.02	15.56	50.30	75.8
14	8.33	66.52	15.31	45.29	72.3
15	6.06	68.41	14.46	47.04	74.3
16	4.30	68.44	12.47	47.02	75.0
17	3.44	69.59	9.79	48.69	76.0
18	9.56	61.86	6.22	39.25	73.8
19	1.37	67.22	8.78	46.17	72.8
20	3.08	56.08	6.95	38.49	62.7

Nota: los datos fueron tomados con ayuda de un higrómetro.

C. Curvas de secado

Ilustración 10 Vista de planta de distribución de bandejas

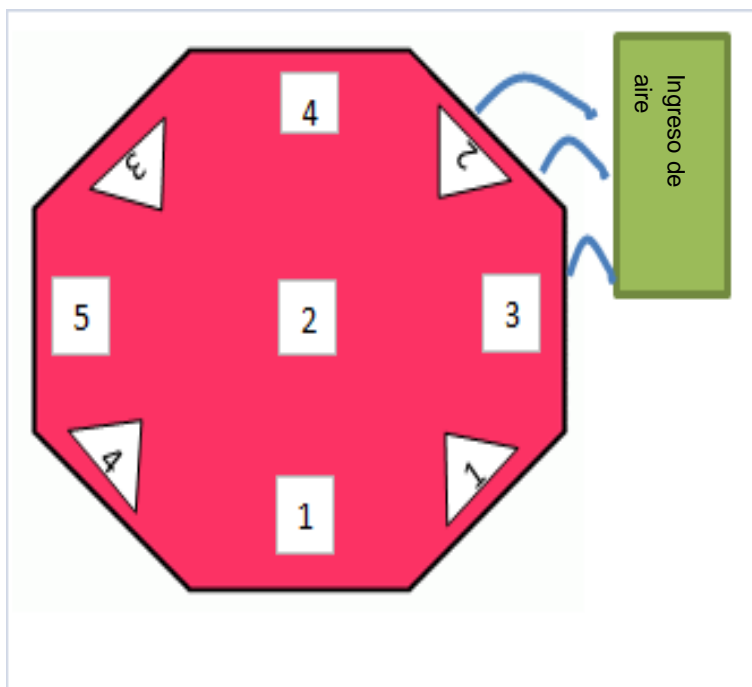


Tabla 21 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.1

Tiempo (min)	Cuadrada 1 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m ² s)
0	14.05	0.877	0.877		
224	9.83	0.824	0.577	-0.019	0.023
253	9.23	0.813	0.534	-0.019	0.024
373	6.84	0.747	0.364	-0.019	0.024
423	6.08	0.716	0.310	-0.019	0.023
528	4.615	0.626	0.205	-0.018	0.022
713	3.69	0.532	0.140	-0.015	0.018
739	3.15	0.451	0.101	-0.015	0.018
844*	2.28	0.242	0.039	-0.014	0.017
976	2.28	0.242	0.039	-0.012	0.015
1167	2.17	0.204	0.031	-0.010	0.013
1213	2.17	0.204	0.031	-0.010	0.012

Nota: Donde Nc es igual a 0.017 kg evaporados por metro cuadrado por minuto.

Ilustración 11 Curva de rapidez de secado para bandeja cuadrada 1

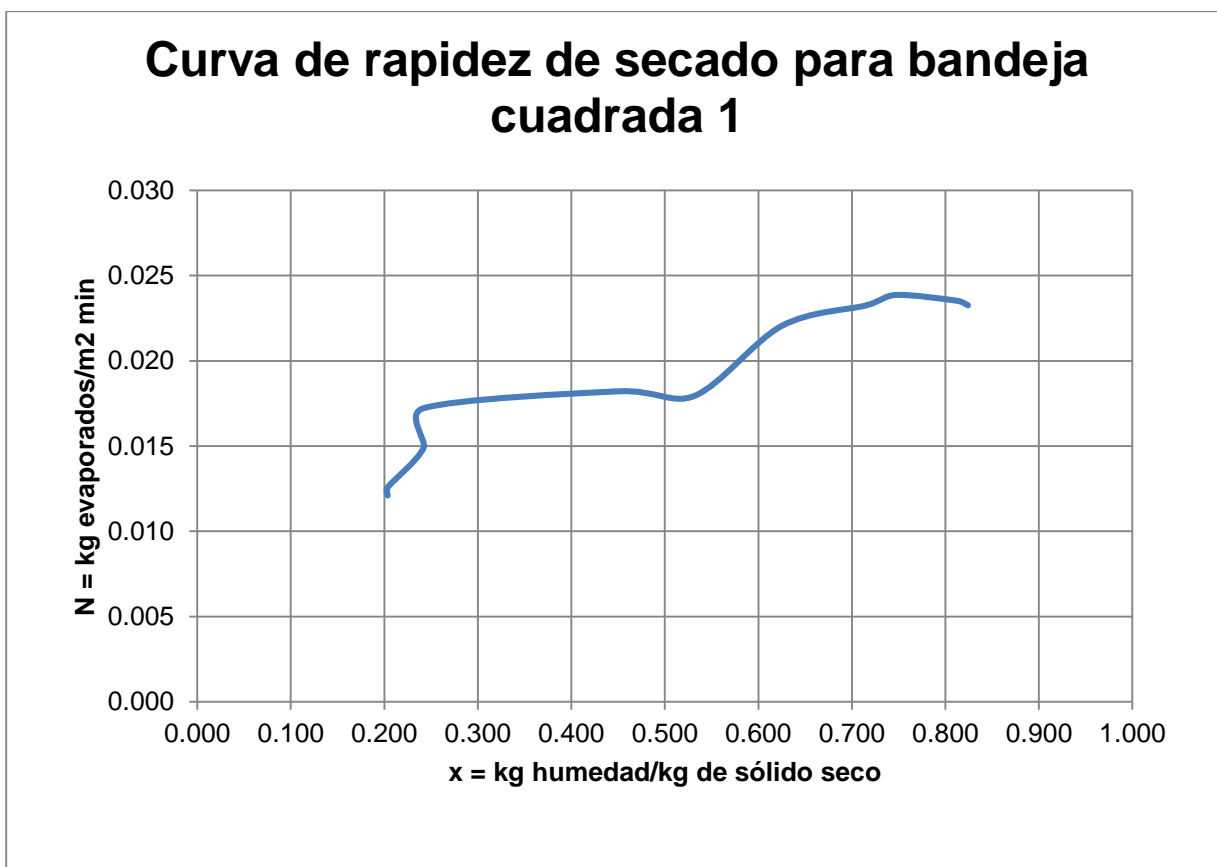


Tabla 22 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.2

Tiempo (min)	Cuadrada 2 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m ² s)
0	14.2875	0.877	0.877		
*1213	2.3033	0.237	0.038	-0.010	0.012

Nota: Debido a que se trata de la bandeja de en medio no se logró tener datos durante el proceso, únicamente inicial y final.

Tabla 23 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.3

Tiempo (min)	Cuadrada 3 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m2 s)
0	14.3675	0.877	0.877		
102	13.255	0.867	0.800	-0.011	0.013
171	11.19	0.842	0.656	-0.019	0.023
275	8.91	0.802	0.497	-0.020	0.025
344	7.71	0.771	0.414	-0.019	0.024
423	6.03	0.707	0.297	-0.020	0.024
475	4.94	0.642	0.221	-0.020	0.025
581	3.36	0.474	0.111	-0.019	0.023
659	2.71	0.348	0.066	-0.018	0.022
739*	2.39	0.261	0.043	-0.016	0.020
897	2.28	0.225	0.036	-0.013	0.017
1055	2.28	0.225	0.036	-0.011	0.014
1213	2.2067	0.199	0.031	-0.010	0.012

Nota: Donde Nc es igual a 0.020 kg evaporados por metro cuadrado por minuto.

Ilustración 12 Curva de rapidez de secado para bandeja cuadrada 3

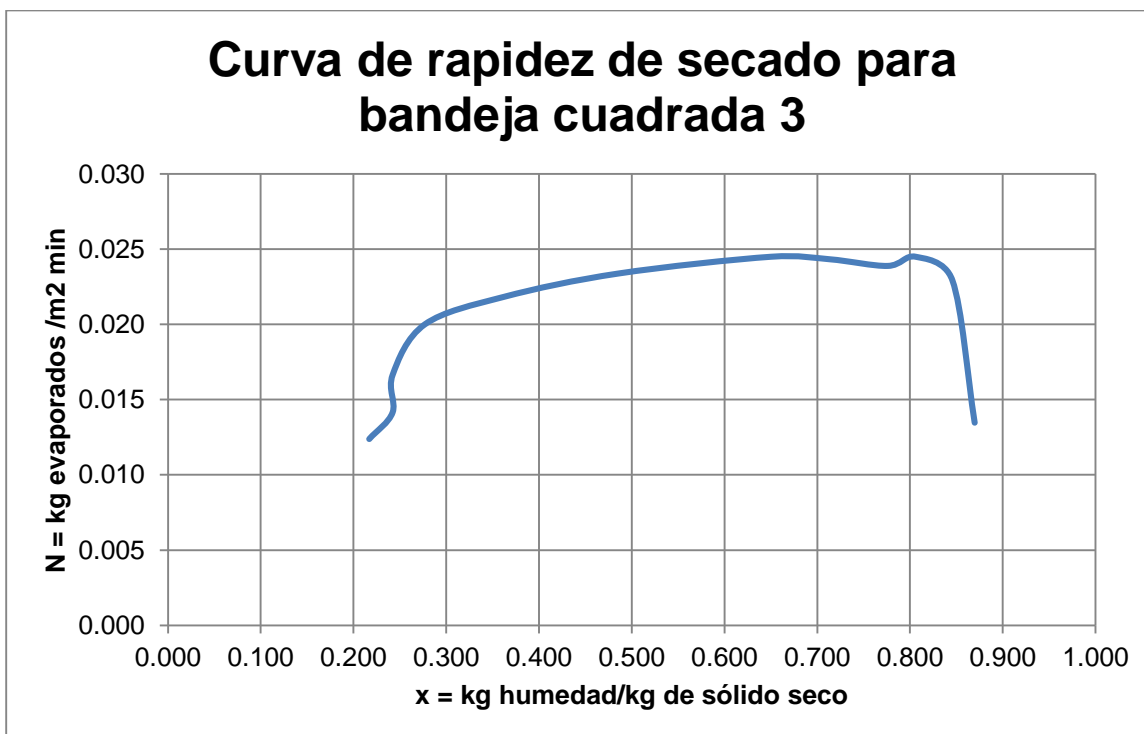


Tabla 24 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.4

Tiempo (min)	Cuadrada 4 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m2 s)
0	14.615	0.877	0.877		
275	9.13	0.811	0.527	-0.020	0.025
315	9.06	0.809	0.522	-0.018	0.022
449	7.005	0.753	0.376	-0.017	0.021
605	4.61	0.625	0.205	-0.017	0.020
686	2.82	0.387	0.078	-0.017	0.021
791*	2.49	0.306	0.054	-0.015	0.019
1055	2.49	0.306	0.054	-0.011	0.014
1081	2.49	0.306	0.054	-0.011	0.014
1213	2.3775	0.273	0.046	-0.010	0.012

Nota: Donde Nc es igual a 0.019 kg evaporados por metro cuadrado por minuto.

Ilustración 13 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.4

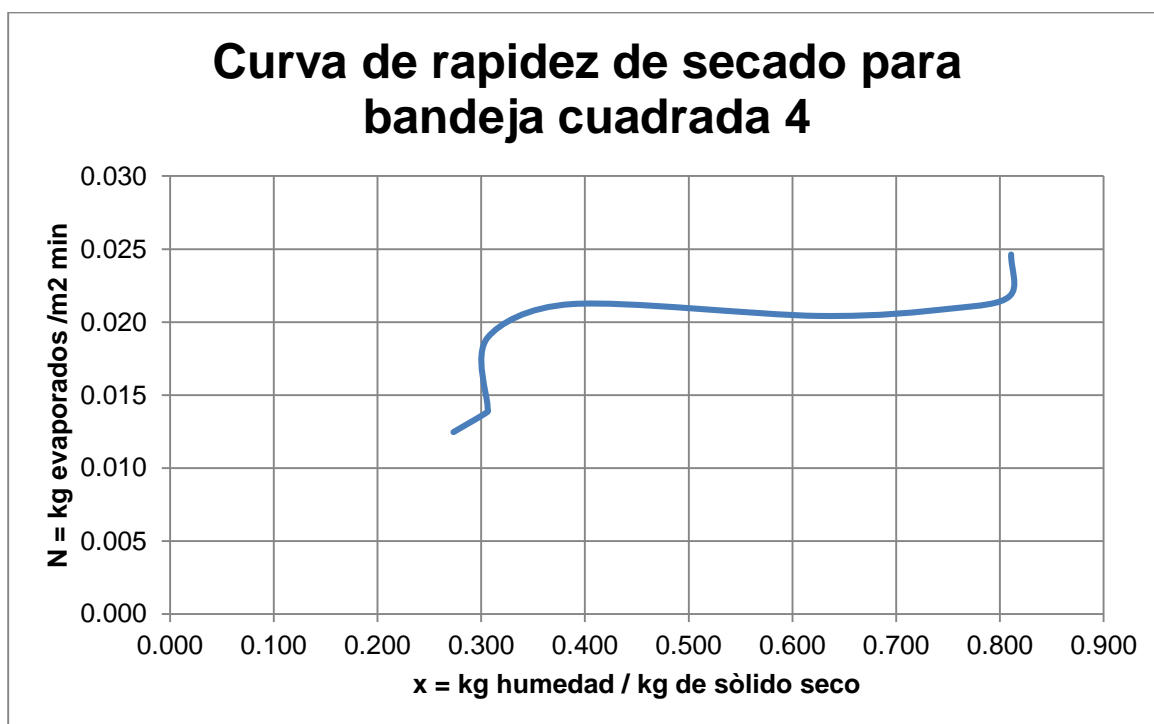


Tabla 25 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.5

Tiempo (min)	Cuadrada 5 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m2 s)
0	13.8525	0.877	0.877		
197	10.76	0.839	0.643	-0.017	0.021
253	10.1	0.829	0.596	-0.016	0.019
325	8.26	0.791	0.465	-0.018	0.022
344	7.17	0.759	0.387	-0.020	0.025
502	4.45	0.612	0.194	-0.019	0.024
633	3.26	0.470	0.109	-0.017	0.021
659	2.82	0.387	0.078	-0.017	0.021
713*	2.49	0.306	0.054	-0.016	0.020
818	2.49	0.306	0.054	-0.014	0.017
923	2.49	0.306	0.054	-0.013	0.015
950	2.39	0.277	0.047	-0.012	0.015
976	2.39	0.277	0.047	-0.012	0.015
1081	2.385	0.275	0.047	-0.011	0.013
1213	2.35	0.265	0.044	-0.010	0.012

Nota: Donde Nc es igual a 0.020 kg evaporados por metro cuadrado por minuto.

Ilustración 14 Datos para curva de secado de bandeja cuadrada No.5

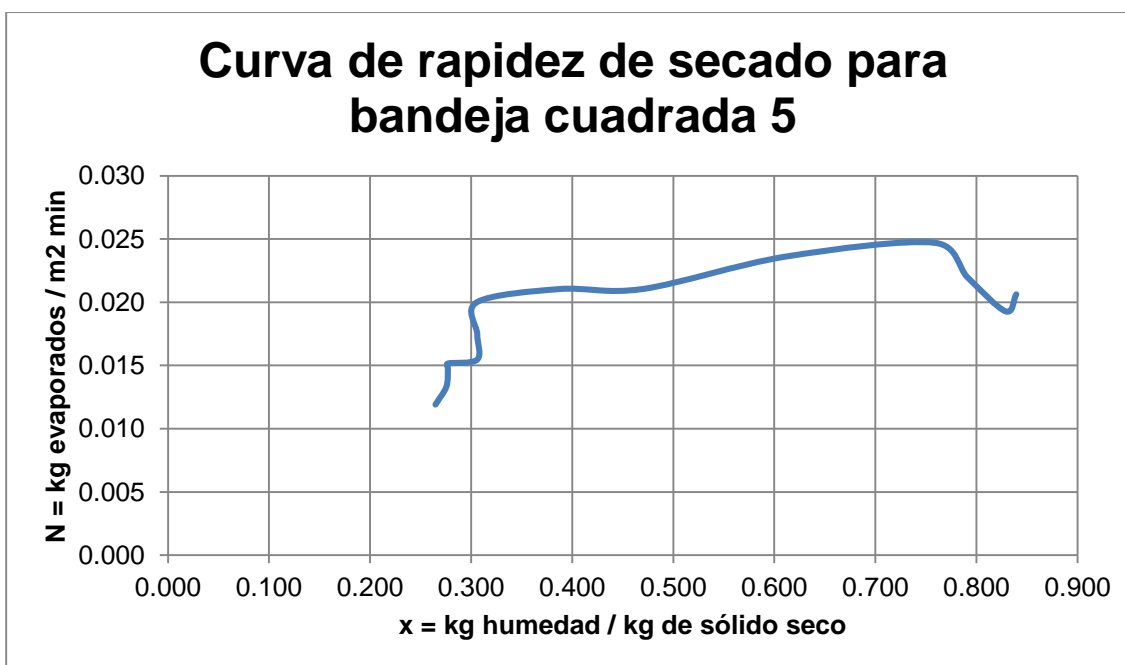


Ilustración 15 Comportamiento del secado de bandejas cuadradas a lo largo del tiempo

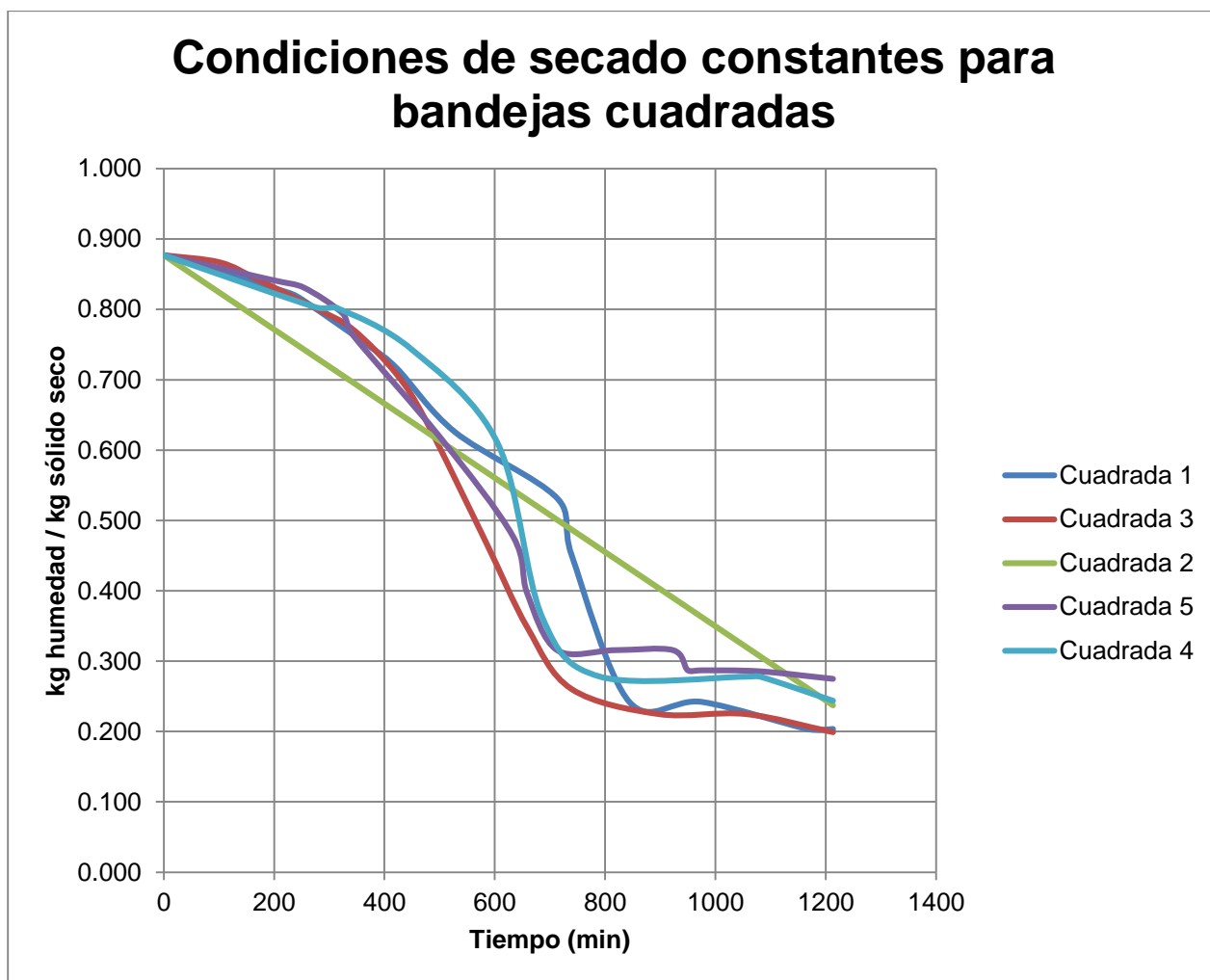


Tabla 26 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 1

Tiempo (min)	Triangular 1 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m ² s)
0	7.115	0.877	0.877		
102	6.3	0.861	0.762	-0.008	0.020
224	4.13	0.788	0.457	-0.013	0.033
253	4.13	0.788	0.457	-0.012	0.029
315	3.8	0.770	0.411	-0.011	0.026
373	2.6	0.663	0.242	-0.012	0.030
393	2.6	0.663	0.242	-0.011	0.029
423	2.06	0.575	0.167	-0.012	0.030
555	1.63	0.463	0.106	-0.010	0.025
659*	1.41	0.379	0.075	-0.009	0.021
686	1.3	0.327	0.060	-0.008	0.021
765	1.19	0.265	0.044	-0.008	0.019
976	1.19	0.265	0.044	-0.006	0.015
1213	1.19	0.265	0.044	-0.005	0.012

Nota: Donde Nc es igual a 0.021 kg evaporados por metro cuadrado por minuto

Ilustración 16 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 1

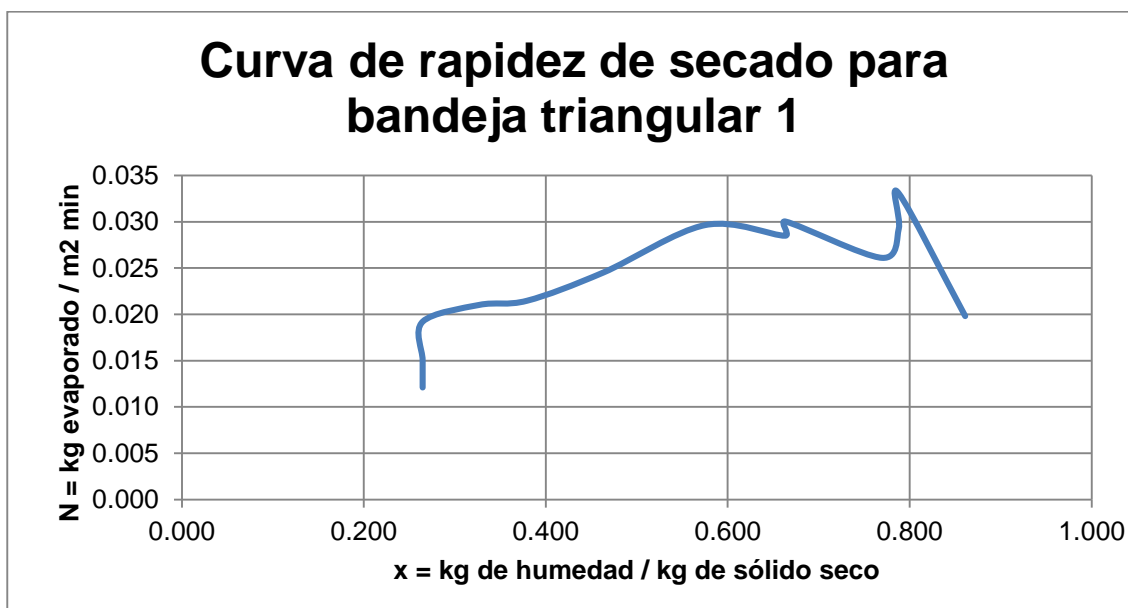


Tabla 27 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 2

Tiempo (min)	Triangular 2 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m2 s)
0	6.5675	0.877	0.877		
102	5.34	0.836	0.704	-0.012	0.030
275	3.91	0.776	0.427	-0.010	0.024
344	3.47	0.748	0.365	-0.009	0.022
423	2.125	0.588	0.176	-0.011	0.026
475	1.95	0.551	0.151	-0.010	0.024
605*	1.39	0.370	0.072	-0.009	0.021
739	1.39	0.370	0.072	-0.007	0.017
1055	1.28	0.316	0.057	-0.005	0.012
1213	1.04	0.159	0.023	-0.005	0.011

Nota: Donde Nc es igual a 0.021 kg evaporados por metro cuadrado por minuto

Ilustración 17 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 2

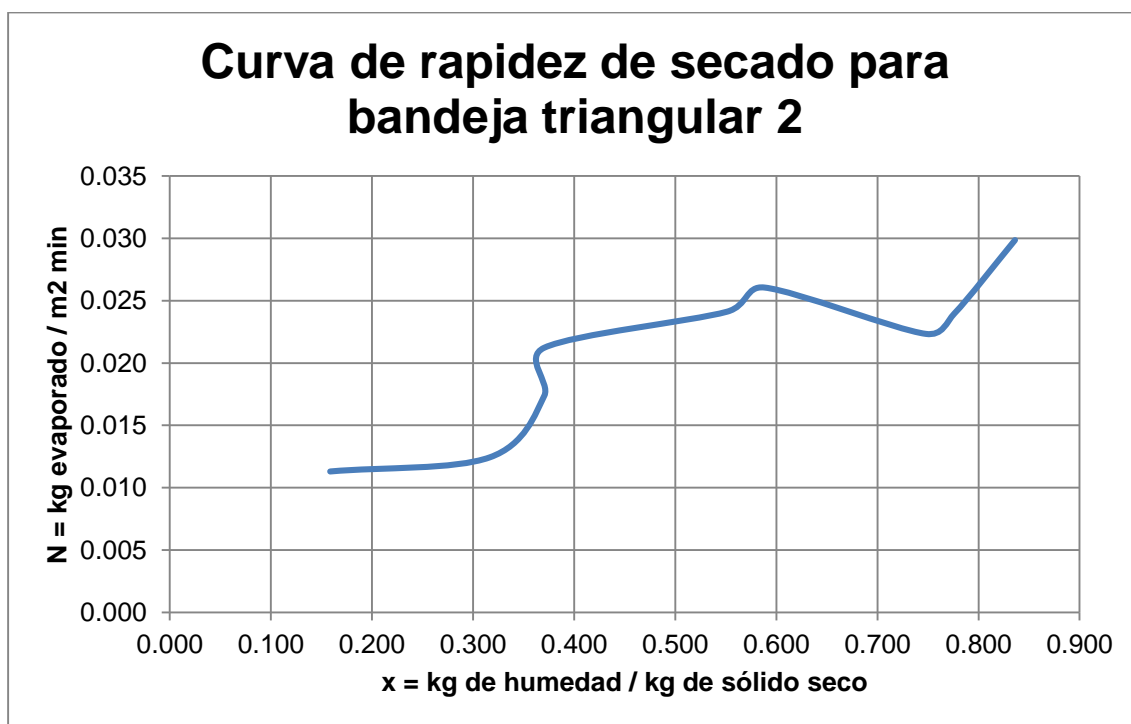


Tabla 28 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 3

Tiempo (min)	Triangular 3 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m2 s)
0	6.2425	0.877	0.877		
171	5.635	0.845	0.669	-0.004	0.009
224	4.99	0.825	0.578	-0.006	0.014
315	4.56	0.808	0.518	-0.005	0.013
393	2.82	0.690	0.273	-0.009	0.022
633	2.38	0.632	0.212	-0.006	0.015
791	1.94	0.549	0.150	-0.005	0.013
818*	1.08	0.190	0.029	-0.006	0.016
923	1.08	0.190	0.029	-0.006	0.014
1028	1.08	0.190	0.029	-0.005	0.012
1081	1.08	0.190	0.029	-0.005	0.012
1116	0.933	0.062	0.008	-0.005	0.012
1213	0.933	0.062	0.008	-0.004	0.011

Nota: Donde N_c es igual a 0.016 kg evaporados por metro cuadrado por minuto

Ilustración 18 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 3

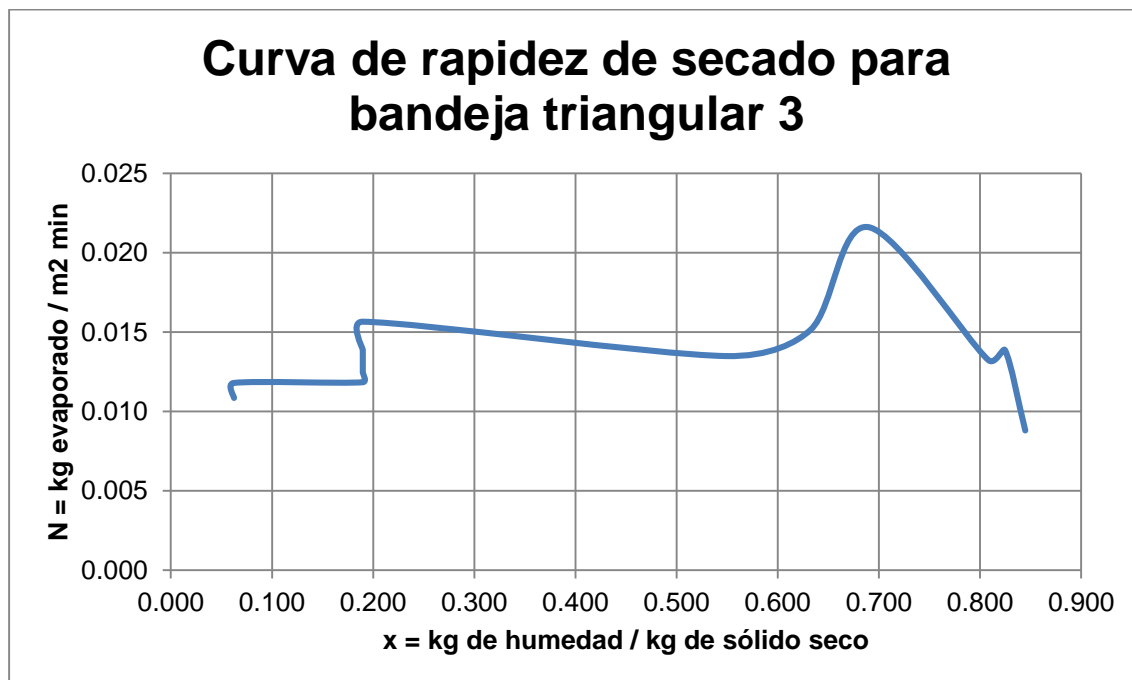


Tabla 29 Datos para curva de secado de bandeja triangular No. 4

Tiempo (min)	Triangular 4 (kg)	x1	y1	dx/dt	N (kg ev /m2 s)
0	6.9975	0.877	0.877		
197	5.28	0.834	0.619	-0.009	0.022
224	4.78	0.817	0.549	-0.010	0.025
253	3.27	0.732	0.337	-0.015	0.037
344	2.82	0.690	0.273	-0.012	0.030
373	2.49	0.649	0.227	-0.012	0.030
502	1.955	0.552	0.152	-0.010	0.025
528	1.3	0.327	0.060	-0.011	0.027
739	1.09	0.197	0.030	-0.008	0.020
818*	0.97	0.098	0.013	-0.007	0.018
976	0.97	0.098	0.013	-0.006	0.015
1116	0.975	0.102	0.014	-0.005	0.013
1213	0.973	0.101	0.014	-0.005	0.012

Nota: Donde N_c es igual a 0.018 kg evaporados por metro cuadrado por minuto

Ilustración 19 Datos para curva de secado de bandeja Triangular No. 4

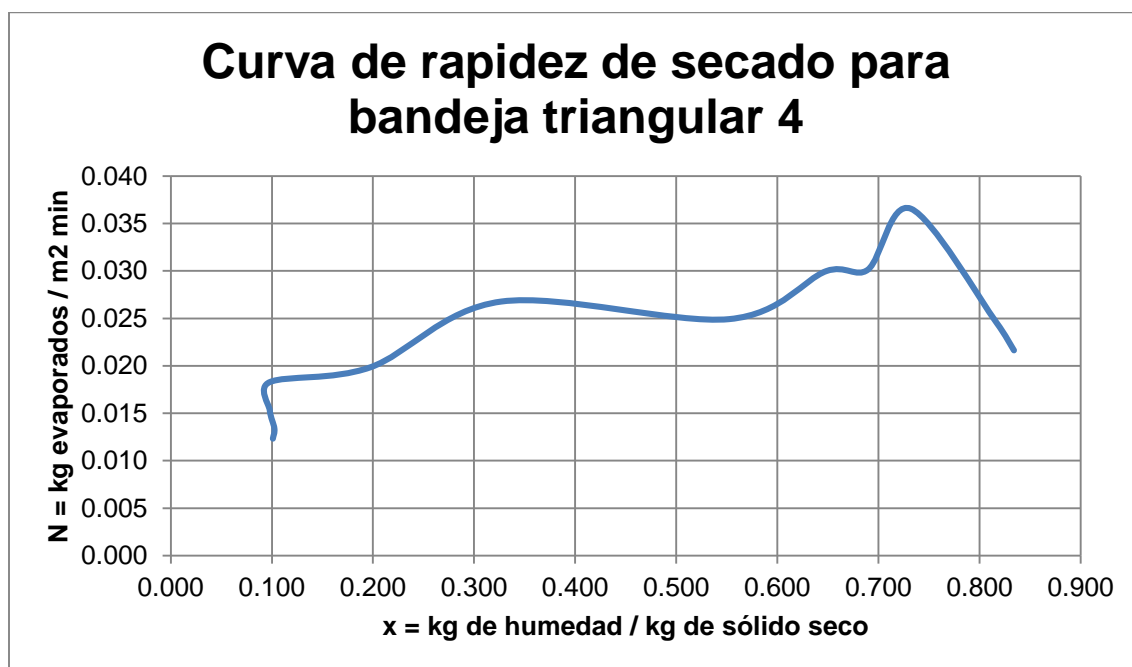
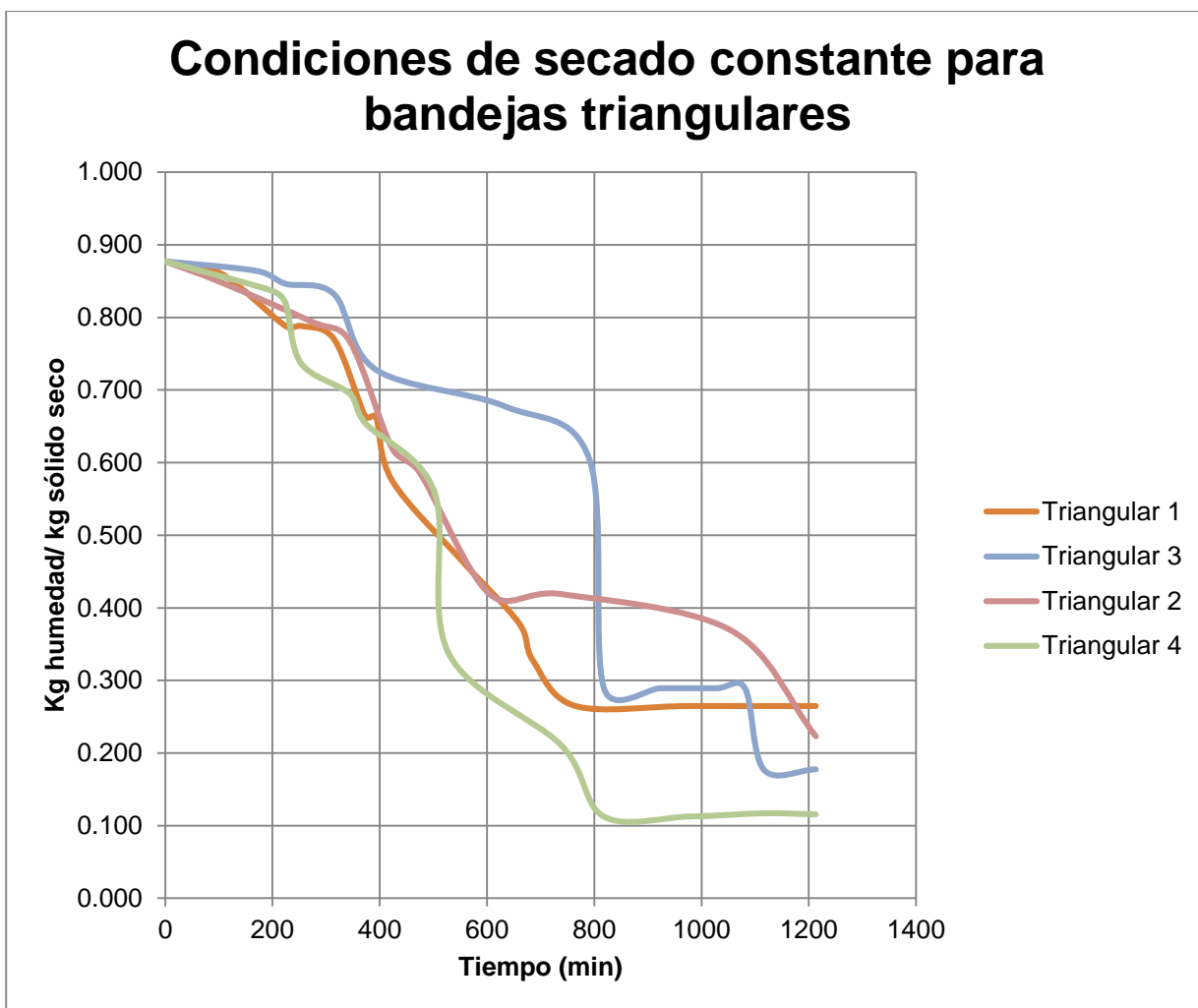


Ilustración 20 Comportamiento del secado de bandejas triangulares a lo largo del tiempo



D. Pruebas de velocidad de aire

Tabla 30 Velocidades de aire de salida

						Promedio
Velocidad de aire con purga	0.78	0.88	0.94	0.56	0.89	0.81
Velocidad de aire sin purga	1.22	2	1.32	1.56	1.44	1.508
Desviación estándar						0.3576

E. Balance energético

Ilustración 21 Comportamiento de humedad en el aire a lo largo del tiempo

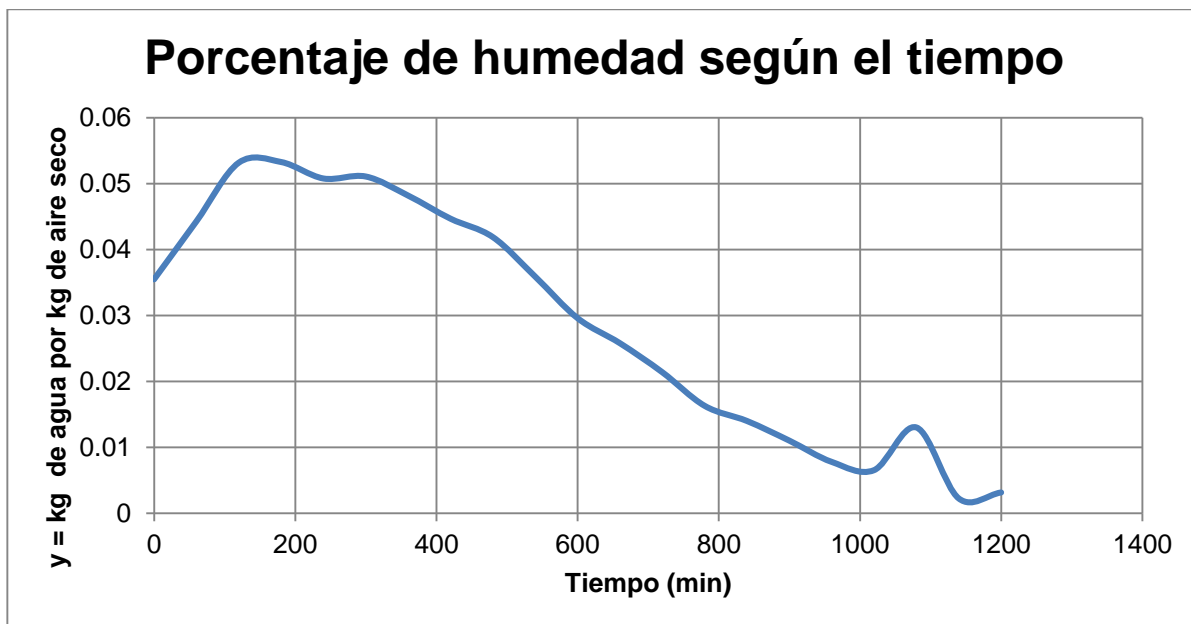


Tabla 31 Tabla de aire de salida con sus propiedades

Minutos	% de humedad	T bulbo seco °C	Humedad absoluta	Volumen humedo (m ³ /kg)	Entalpia (kJ/kg)	Flujo masico (kg)	Calor ingresado (kJ)	Calor de salida (kJ)
0	46.91	48.85	0.0355	0.922788	141.0338	-		
60	52.13	51.31	0.0443	0.98448	168.909	17,060.95	42,166,346.55	2,882,085.92
120	46.07	57.00	0.0532	1.01355	195.90198	16,571.61	42,146,220.10	3,246,192.70
180	38.72	60.75	0.0533	1.02499	200.206	16,386.66	42,146,220.10	3,280,690.80
240	36.08	61.35	0.0508	1.0231	194.5227	16,416.93	42,146,220.10	3,192,971.05
300	32.18	63.99	0.0511	1.0315	198.22992	16,283.24	42,146,220.10	3,227,322.01
360	27.36	66.37	0.0482	1.034066 6	192.9831	16,242.82	42,146,220.10	3,133,706.32
420	23.28	68.47	0.0447	1.035008 99	186.23	16,228.03	42,146,220.10	3,021,076.85
480	20.55	69.62	0.0419	1.03309	178.4626	16,258.18	42,146,220.10	2,899,923.15
540	17.48	70.34	0.0359	1.026876	165.17458 5	16,356.56	42,146,220.10	2,701,668.12
600	14.07	71.07	0.0296	1.019057	149.1795	16,482.06	42,146,220.10	2,458,262.95
660	13.08	69.70	0.0258	1.009127	137.71787	16,644.25	42,146,220.10	2,293,343.46
720	11.64	68.32	0.0214	0.998429	124.93439 8	16,822.59	42,146,220.10	2,102,669.28
780	8.28	70.02	0.0163	0.995332	113.1713	16,874.93	42,146,220.10	1,907,723.10
840	8.33	66.52	0.014	0.981792	103.57495	17,107.66	42,146,220.10	1,775,103.20
900	6.06	68.41	0.0110 2	0.982579	97.68038	17,093.95	42,146,220.10	1,668,634.04
960	4.30	68.44	0.0077 92	0.977677 92	89.225513	17,179.65	42,146,220.10	1,532,871.12
1020	3.44	69.59	0.0065 4	0.978998	87.10792	17,156.48	42,146,220.10	1,493,408.27
1080	9.56	61.86	0.0130 2	0.96696	96.1813	17,370.07	42,146,220.10	1,676,658.92
1140	1.37	67.22	0.0022 47	0.965846	73.6582	17,390.10	42,146,220.10	1,276,538.01
1200	3.08	56.08	0.0031 53	0.935748	64.5603	17,949.45	42,146,220.10	1,163,685.68
Totales							842,944,528.4	46,934,535

Tabla 32 Condiciones del aire de ingreso

No	Porcentaje de humedad	T °C
1	46.91	48.85
2	61.53	26.20
3	60.01	26.51
4	59.49	26.90
5	58.39	27.81
6	57.16	28.02
7	56.33	28.71
8	54.60	28.68
9	53.19	28.61
10	52.47	28.81
11	49.01	27.70
12	60.19	27.30
13	59.87	28.10
14	55.60	26.70
15	58.42	26.88
16	57.34	27.32
17	54.78	26.90
18	63.10	27.80
19	59.01	28.20
20	58.92	28.01

Tabla 33 Consumo de GLP por lote deshidratado

No	Fecha	Consumo de gas A (m3)	Total de horas A	Consumo promedio por hora A
1	04/05/2015	34.70	22.50	1.54
2	05/05/2015	35.00	23	1.52
3	06/05/2015	26.9	19.85	1.36
4	07/05/2015	26.8	18.3	1.46
5	08/05/2015	34.7	18.8	1.85
6	09/05/2015	33.65	21.25	1.58
7	10/05/2015	33.65	23.07	1.46
8	11/05/2015	35.5	22.5	1.58
9	12/05/2015	37.7	24	1.57
10	13/05/2015	35.65	22.17	1.61
11	14/05/2015	34.4	21.08	1.63
12	15/05/2015	36.2	22	1.65
13	16/05/2015	36	19	1.89
14	17/05/2015	36.9	23.5	1.57
15	18/05/2015	37.7	23.75	1.59
16	19/05/2015	27.9	19	1.47
17	20/05/2015	29.7	21.45	1.38
18	21/05/2015	29.4	22	1.34
19	22/05/2015	26.2	19	1.38
20	23/05/2015	32.4	20.33	1.59
21	24/05/2015	31.1	20.33	1.53
22	25/05/2015	28	19	1.47
23	26/05/2015	31	19.25	1.61
24	27/05/2015	31.3	19	1.65
25	28/05/2015	30.8	18.78	1.64
26	29/05/2015	32.1	19	1.69
27	30/05/2015	31.4	20.17	1.56
28	31/05/2015	31.5	21	1.50
29	01/06/2015	28.00	17.58	1.59
30	02/06/2015	34.10	21	1.62
31	03/06/2015	38.1	21.08	1.81
32	04/06/2015	34.7	21	1.65
33	05/06/2015	34.2	21	1.63
34	06/06/2015	33.2	21	1.58
35	07/06/2015	30.8	21	1.47
36	08/06/2015	33	21	1.57
37	09/06/2015	37.4	21	1.78
38	10/06/2015	37.1	21	1.77

Continuación tabla 33. Consumo de GLP por lote deshidratado

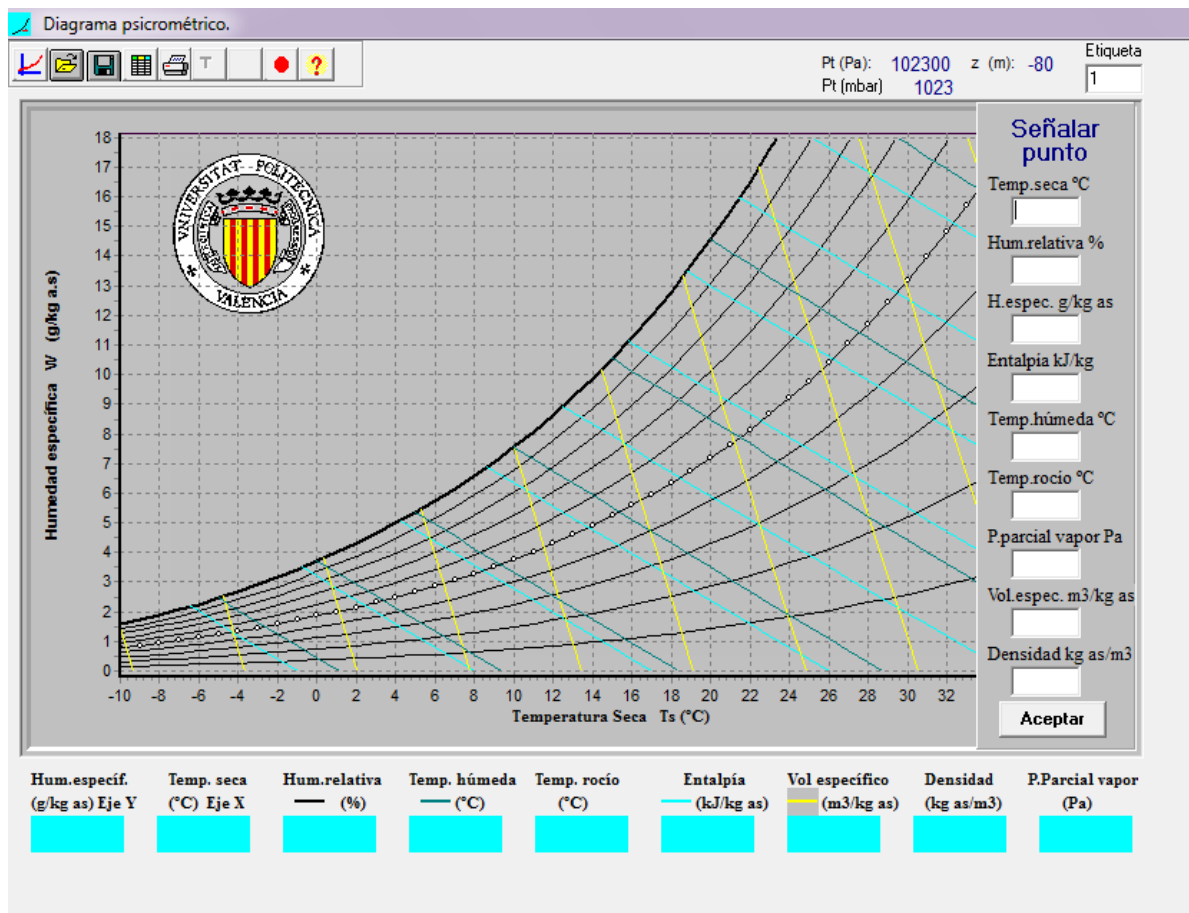
No	Fecha	Consumo de gas A (m3)	Total de horas A	Consumo promedio por hora A
39	11/06/2015	36.1	21	1.72
40	12/06/2015	37	21	1.76
41	13/06/2015	35.9	20	1.80
42	14/06/2015	35.1	21	1.67
43	15/06/2015	35.8	21	1.70
44	16/06/2015	38.5	21	1.83
45	17/06/2015	33.6	18.42	1.82
46	18/06/2015	33.6	19	1.77
47	19/06/2015	34.8	19	1.83
48	20/06/2015	33.8	21	1.61
49	21/06/2015	33.8	20	1.69
50	22/06/2015	34.1	20	1.71
51	23/06/2015	32.1	19.33	1.66
52	24/06/2015	32.4	20	1.62
53	25/06/2015	32.9	20	1.65
54	26/06/2015	31.9	20	1.60
55	27/06/2015	35.4	21	1.69
56	28/06/2015	35.5	20	1.78
57	29/06/2015	34.6	20	1.73
58	30/06/2015	35.7	20	1.79
59	02/07/2015	32.80	20	1.64
60	03/07/2015	35.6	20	1.78
61	04/07/2015	36.3	20	1.82
62	05/07/2015	36.1	20	1.81
63	06/07/2015	37.3	20	1.87
64	07/07/2015	38.4	21	1.83
65	08/07/2015	35.6	20	1.78
66	09/07/2015	38	20	1.90
67	10/07/2015	38.3	20	1.92
68	11/07/2015	36.4	20	1.82
69	12/07/2015	35.4	20	1.77
70	13/07/2015	32.3	20	1.62
71	14/07/2015	32.8	20	1.64
72	15/07/2015	36.2	20	1.81
73	16/07/2015	34.3	20	1.72
74	17/07/2015	33.2	20	1.66
75	18/07/2015	34.1	20	1.71
76	19/07/2015	33.9	20	1.70

Continuación tabla 33. Consumo de GLP por lote deshidratado

No	Fecha	Consumo de gas A (m3)	Total de horas A	Consumo promedio por hora A
77	20/07/2015	32.8	20	1.64
Promedio		33.91	20.43	1.66

F. Carta psicrométrica de simulador utilizado

Ilustración 22 Carta psicrométrica corregida a la presión atmosférica de Guatemala



(102,300 Pa)

G. Glosario

1. Deshidratación: extracción del agua que contiene una sustancia, un organismo o un tejido orgánico.
2. GLP: Gas Licuado de Petróleo mezcla de gases licuado presentes en el gas natural, sus principales componentes son propano y butano.
3. Contenido de humedad en base húmeda: es la relación de humedad en peso respecto a al peso húmedo del sólido.
4. Contenido de humedad en base seca: porcentaje de humedad respecto al solido seco.
5. Humedad ligada: es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.
6. Humedad no ligada: se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.
7. Humedad libre: es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio.
8. Actividad de agua: relación que existe entre la presión de vapor de un alimento dado en relación con la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura.
9. Presión de vapor: presión de la fase gaseosa o vapor de un sólido o un líquido sobre la fase líquida para una temperatura determinada.
10. Humedad relativa: también conocida como saturación relativa, e indica la relación entre la presión de vapor del componente como si estuviera puro, respecto a la presión de vapor de la mezcla a la temperatura de bulbo seco.
11. Humedad absoluta: relación de masa de vapor / masa de gas.
12. Temperatura de bulbo seco: temperatura de una mezcla de vapor – gas determinada en la forma ordinaria por inmersión de un termómetro en la mezcla.
13. Punto de rocío: temperatura a la cual una mezcla vapor- gas se satura cuando se enfría a presión total constante sin contacto con el líquido.
14. Sistema aire-agua: es una mezcla de vapor de agua en un gas que normalmente es aire caliente a determinadas condiciones de humedad y temperatura.