



FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

ESCALAMIENTO DE UN SECADOR DE BAGAZO DE CAÑA
DE PLANTA PILOTO A NIVEL INDUSTRIAL

TESIS PROFESIONAL

PRESENTADA POR

CALDERON ROJAS ISAAC

PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO QUIMICO

Morelia Michoacán agosto 2008

A LA FAMILIA CALDERON ROJAS.

DEDICADO A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE EN SU MOMENTO ME APOYARON FISICA Y MORALMENTE, AL TENDERME LA MANO, FAMILIARES, PROFESORES, AMIGOS, PERO ESPECIALMENTE A MI MADRE ALICIA ROJAS PAZ Y A MI PADRE ISAAC CALDERÓN NAÑES, POR SU APOYO, SU CONFIANZA Y SU AMOR "GRACIAS"

Al igual que en otros procesos de transferencia, como la transferencia de masa, el proceso de secado se debe considerar desde el punto de vista de las relaciones de equilibrio entre aire y vapor de agua y de la rapidez del aire. Una de las variables importantes en el secado de materiales es la humedad del aire. Para reducir el contenido de humedad en los procesos de secado, por lo general se estima el tamaño del secador necesario, las diferentes condiciones de operación de humedad, la temperatura del aire empleado y el tiempo necesario para lograr el grado de secado.

En general, el secado significa la eliminación de cantidades de agua relativamente pequeñas por medio de procesos térmicos, esta agua casi siempre se elimina en forma de vapor a través de aire caliente (por convección). Los productores de azúcar deben buscar nuevas oportunidades de crear fuentes adicionales de ingreso. Una de estas alternativas es aumentar la eficiencia de las calderas para elevar al máximo el excedente de bagazo, el cual pudiera usarse para generar ingresos adicionales.

Aun cuando el uso de biomasa agrícola residual como combustible es una alternativa real, existen algunos problemas que deben solucionarse para lograr el aprovechamiento óptimo del poder calorífico de este material. En primer lugar, es necesario disminuir su contenido de humedad, ya que en la mayoría de los casos es alto. Lo anterior implica la realización de un proceso de secado previo a la combustión de la biomasa.

Se han realizado diferentes trabajos en el campo del proceso de secado de materiales a granel con el objeto de desarrollar sistemas a escala industrial o planta piloto. Sin embargo, la mayoría de estos estudios han sido desarrollados de tal manera, que las condiciones finales del proceso han sido caracterizadas por las condiciones iniciales y ambientales, sin tener pleno conocimiento de los fenómenos de transferencia que se verifican en el interior de los materiales.

El secador piloto de charolas tipo túnel que se utilizó para realizar los experimentos es alimentado con aire a través de un ventilador, el flujo de aire pasa a través de un par de resistencias en forma de “U”, conectadas a 220 v y con una potencia de 4.5 kW cada una. El secador está conectado a un software que va guardando toda la información del secador, como es la disminución del peso del bagazo y las condiciones del aire como la temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, entre otras.

Para determinar las curvas de velocidad de secado, se realizaron seis experimentos, tres a una temperatura de 60° C y tres a 80° C, utilizando velocidades de aire de: 1.00, 1.40 y 1.60 m/s respectivamente, las muestras de bagazo de caña libres de agua fueron de: 80, 70, 80, 80, 100 y 80 gramos, y las muestras de bagazo con humedad fueron de: 220, 310, 340, 440, 420 y 420 gramos respectivamente.

II. Tabla de contenido

CONTENIDO

I.	Resumen	iii
II.	Tabla de contenido	iv
III.	Lista de figuras	v
IV.	Lista de tablas	vii
V.	Nomenclatura	ix
Capitulo 1	Introducción	1
Capitulo 2	Fundamentos teóricos	4
Capitulo 3	Metodología	14
Capitulo 4	Resultados y Discusiones	19
Capitulo 5	Conclusiones y Recomendaciones	39
	Referencias Bibliográficas	40

III. Lista de Figuras

CONTENIDO

Figura 1.	Esquema de una partícula de bagazo de caña mostrando el movimiento de la humedad durante el secado.	1
Figura 2.	Elementos principales de un secador de lecho fijo.	6
Figura 3.	Secador de charolas.	6
Figura 4.	Secador por lotes con agitación.	7
Figura 5.	Secador continuo tipo túnel.	7
Figura 6.	Secador continuo rotatorio.	8
Figura 7.	Secador continuo fluidizado.	9
Figura 8.	Curva de velocidad de secado, de humedad libre X en función del tiempo t .	13
Figura 9.	Curva de secado mostrando las tres etapas de secado.	13
Figura 10.	Muestra de bagazo de caña libre de humedad en una báscula digital.	14
Figura 11.	Charolas que contienen el bagazo, dentro del secador.	15
Figura 12.	Secador piloto de charolas tipo túnel.	17
Figura 13.	Secador piloto de charolas tipo túnel conectado a un software.	18
Figura 14.	Descendencia del peso del bagazo en función del tiempo.	18
Figura 15.	Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo, para el primer experimento.	30
Figura 16.	Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X para el primer experimento.	31
Figura 17.	Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo, para el segundo experimento.	31
Figura 18.	Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X para el segundo experimento.	32

Figura 19.	Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo, para el tercer experimento.	32
Figura 20.	Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X para el tercer experimento.	33
Figura 21.	Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo, para el cuarto experimento.	33
Figura 22.	Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X para el cuarto experimento.	34
Figura 23.	Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo, para el quinto experimento.	34
Figura 24.	Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X para el quinto experimento.	35
Figura 25.	Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo, para el sexto experimento.	35
Figura 26.	Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X para el sexto experimento.	36

IV. Lista de Tablas

CONTENIDO

Tabla 1.	Condiciones con las cuales se realizaron los seis experimentos.	17
Tabla 2.	Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el primer experimento.	19
Tabla 3.	Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el segundo experimento.	20
Tabla 4.	Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el tercer experimento.	20
Tabla 5.	Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el cuarto experimento.	21
Tabla 6.	Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el quinto experimento.	21
Tabla 7.	Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el sexto experimento.	22
Tabla 8.	Condiciones de humedad de equilibrio X^*	23
Tabla 9.	Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X , a una temperatura de 60° C y una velocidad de aire de 1.00 m/s.	24
Tabla 10.	Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X , a una temperatura de 60° C y una velocidad de aire de 1.40 m/s.	24
Tabla 11.	Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X , a una temperatura de 60° C y una velocidad de aire de 1.60 m/s.	25
Tabla 12.	Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X , a una temperatura de 80° C y una velocidad de aire de 1.00 m/s.	25
Tabla 13.	Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X , a una temperatura de 80° C y una velocidad de aire de 1.40 m/s.	26
Tabla 14.	Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X , a una temperatura de 80° C y una velocidad de aire de 1.60 m/s.	26
Tabla 15.	Condiciones de velocidad de secado R en función del tiempo y humedad libre X para el primer experimento.	27

Tabla 16.	Condiciones de velocidad de secado R en función del tiempo y humedad libre X para el segundo experimento.	28
Tabla 17.	Condiciones de velocidad de secado R en función del tiempo y humedad libre X para el tercer experimento.	28
Tabla 18.	Condiciones de velocidad de secado R en función del tiempo y humedad libre X para el cuarto experimento.	29
Tabla 19.	Condiciones de velocidad de secado R en función del tiempo y humedad libre X para el quinto experimento.	29
Tabla 20.	Condiciones de velocidad de secado R en función del tiempo y humedad libre X para el sexto experimento.	30
Tabla 21.	Áreas calculadas a las diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire, en los seis experimento efectuados.	38

A	área
cm	centímetros
° C	grados centígrados
g	gramos
h	horas
kW	kilowatts
Ls	kilogramos de sólido seco
m	metro
mg	miligramo
m²	metro cuadrado
m³	metro cúbico
m/s	metro por segundo
R	velocidad de secado
t	tiempo
T	Temperatura
V	voltios
v	Velocidad
vs	versus (contra)
W	kilogramos de sólido húmedo
Ws	kilogramos de sólido seco
Xt	contenido de humedad
X	humedad libre
X*	humedad al equilibrio
dt	intervalo de tiempo
dX	intervalo de humedad libre

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El exceso de humedad contenida por los materiales puede eliminarse por métodos mecánicos (sedimentación, filtración, centrifugación). Sin embargo, la eliminación más completa de la humedad se obtiene por evaporación y eliminación de los vapores formados, es decir, mediante el secado térmico, ya sea empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor.

Esta operación se utiliza ampliamente en la tecnología química y es muy común que sea la última operación en la producción precedente a la salida del producto resultante (Treybal, 1965). Es evidente que la eliminación de agua o en general de líquidos existentes en sólidos es más económica por acción mecánica que por acción térmica. La dificultad de los medios mecánicos surge cuando los productos finales y gran número de productos intermedios deben cumplir especificaciones rigurosas en cuanto a la humedad final. Habitualmente una centrífuga trabajando con grandes cargas de sólido húmedo dejará humedades en torno al 10-20 %, aunque en casos excepcionales como la sal común o cloruro sódico se puede alcanzar el 1 %.

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 estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

Al igual que en otros procesos de transferencia, como la transferencia de masa, el proceso de secado se debe considerar desde el punto de vista de las relaciones de equilibrio entre aire y vapor de agua y de la rapidez del aire. Una de las variables importantes en el secado de materiales es la humedad del aire. Para reducir el contenido de humedad en los procesos de secado, por lo general se estima el tamaño del secador necesario, las diferentes condiciones de operación de humedad, la temperatura del aire empleado y el tiempo necesario para lograr el grado de secado.

La búsqueda de medios alternos de solución a las necesidades energéticas actuales se ha convertido en un requerimiento primordial de nuestro tiempo. Con esta finalidad, en los últimos años se han desarrollado innumerables trabajos de investigación, que sientan las bases para un desarrollo formal en este campo. Dentro de este contexto se encuentra la investigación y desarrollo de sistemas de combustión de biomasa agrícola residual, que resulta ser una perspectiva interesante, si se considera la posibilidad de un ahorro considerable de combustibles fósiles, principal fuente de energía en la actualidad. Además, la biomasa constituye un combustible menos contaminante para el ambiente, siendo éste uno de los intereses primordiales dentro de la industria contemporánea, pero lo más trascendente es el hecho de contar con una fuente energética renovable y constante, si se establece un consumo debidamente regulado.

Sin embargo, aun cuando el uso de biomasa agrícola residual como combustible es una alternativa real, existen algunos problemas para lograr el aprovechamiento óptimo del poder calorífico de este material. En primer lugar, es necesario disminuir su contenido de humedad, ya que en la mayoría de los casos es alto.

La mayor parte de los sólidos orgánicos son amorfos, fibrosos o en forma de gel. Estos materiales retienen humedad como parte integral de la estructura sólida o atrapada dentro de las fibras o bien, en el interior de poros finos, tal como se muestra en la figura 1. En estas sustancias, el movimiento de la humedad es lento y se presenta por difusión del líquido a través de la estructura sólida.

Los contenidos de humedad suelen ser altos, lo que indica que una cantidad significativa de agua se mantiene íntimamente en la estructura sólida o en los poros finos. Debido a que el agua presente se mantiene en una parte tan íntima de la estructura sólida, la eliminación de la humedad afecta a los sólidos. Debido a esto el diseño de equipos de secado no es tan sencillo.

Además de las dificultades que se encuentran al predecir la curva de velocidad de secado, aparecen preguntas relativas a la variación de las condiciones de secado a través del secador, las diferencias de áreas para la transferencia de calor y de masa, el patrón de flujo de gas y el efecto de las variables de operación y selección del equipo sobre la condición del producto seco.

También debe considerarse el factor económico usual del costo de proceso en relación con la condición más deseable del producto, desde un punto de vista comercial. Por estas razones, casi siempre la selección de un secador se basa en pruebas preliminares, secando el material en condiciones simuladas de producción. La mayor parte de los fabricantes mantiene laboratorios de servicio en los que se encuentran disponibles secadores a escala piloto.

En general, el secado significa la eliminación de cantidades de agua relativamente pequeñas por medio de procesos térmicos, esta agua casi siempre se elimina en forma de vapor a través de aire caliente (por convección). El secado es un proceso importante ya que suele ser la etapa final de los procesos antes de ser empacados y permite que algunos materiales, sean más adecuados para su manejo.

Los productores de azúcar deben buscar nuevas oportunidades de crear fuentes adicionales de ingreso. Una de estas alternativas es aumentar la eficiencia de las calderas para elevar al máximo el excedente de bagazo, el cual pudiera usarse para generar ingresos adicionales

de varias formas, por ejemplo, fabricando tabla prensada, obteniendo pulpa ó produciendo furfural. El secamiento de bagazo se puede llevar a cabo utilizando el calor desechado de los gases de combustión de la ó las calderas, esto contribuiría significativamente a los esfuerzos para lograr ganancias adicionales derivadas de los usos finales del excedente de bagazo.

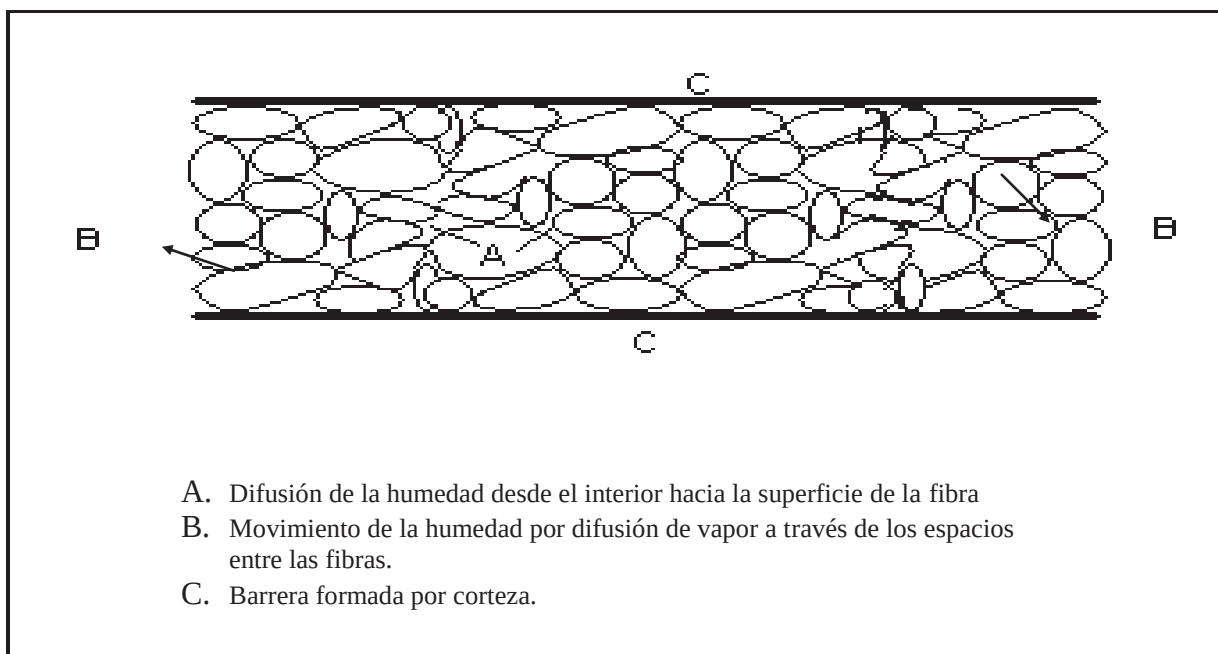


Figura 1. Esquema de una partícula de bagazo de caña mostrando el movimiento de la humedad durante el secamiento.

CAPITULO 2

Fundamentos Teóricos

Métodos generales de secado

Los métodos y procesos de secado se clasifican de diferentes maneras; se dividen en procesos de *lotes*, cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo; o *continuos*, si el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Los procesos de secado se clasifican también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua: (1) en la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire; (2) en el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación (también pueden usarse bajas temperaturas con vacío para ciertos materiales que se decoloran o se descomponen a temperaturas altas); (3) en la liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado.

Grupos de secadores

Secadores directos

La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación; es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

- Secadores continuos: la operación es continua sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Es evidente que cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes, si así se desea.
- Secadores por lotes: se diseñan para operar con un tamaño específico de lote de alimentación húmeda, para ciclos de tiempo dado. En los secadores por lote las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo.

Secadores indirectos

El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de

deseccación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

- Secadores continuos: la deseccación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador, y poniéndolo en contacto con las superficies calientes.
- Secadores por lotes: en general los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

TIPOS DE SECADORES

La operación de secado se aplica para una gran variedad de materiales como son: granos, fibras, pastas, películas delgadas, etcétera, por lo que se ha desarrollado también una gran variedad de tipos de secadores, los cuales pueden ser clasificados por diferentes maneras.: por su régimen de operación en continuos o por lotes; por la manera de suministrar el calor en contacto directo o indirecto; por el régimen de flujo en paralelos, a contracorriente y de flujo cruzado (Geancoplis, Foust, Seader and Henley, 2005).

En la figura 3 se muestra el secador por lotes mas antiguo y mas simple que se conoce como *secador de charolas o platos*, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad.

Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado.

Secadores estacionaros

Los secadores de lecho fijo se componen de cuatro elementos principales que se observan en la figura 2: sistema de calentamiento del aire, ventilador, cámara de distribución del aire o "plenum", y cámara de secado.

El sistema de calentamiento puede ser de cualquier tipo, siempre que esté dimensionado para aumentar la temperatura del aire hasta los limites recomendados para cada producto y que no haya contaminaciones de él por el aire que proviene de la fuente de calor. El ventilador, generalmente, es del tipo centrifugo, por la presión estática que se necesita en este sistema. La cámara de distribución de aire sirve para transformar la presión dinámica del aire en presión estática, uniformando la distribución del aire dentro del secador. La cámara de secado es un recipiente con fondo de plancha de metal perforado, capaz de soportar el peso del producto húmedo. El producto permanece estático en la cámara de secado, mientras que el calentado, impulsado mecánicamente por el ventilador, pasa a través de la capa de producto y reduce su contenido de humedad. Los secadores de capa fija, en la mayoría de los casos se proyectan para secar solamente una partida por día. Después del secado, el producto se enfría dentro del mismo secador, para lo cual se interrumpe el suministro de energía al sistema de calentamiento y se deja conectado el ventilador.

Las principales variables del sistema de secado de partidas en lecho estacionario son: espesor del lecho, contenido de humedad inicial, flujo de aire, temperatura del aire y tiempo de secado.

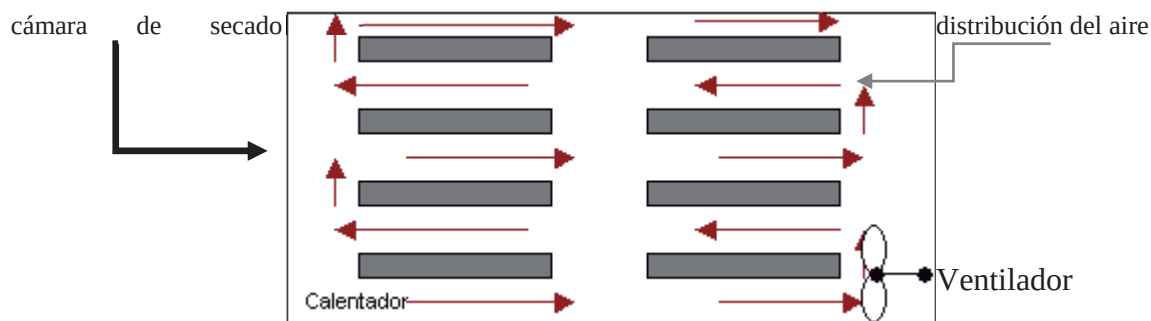


Figura 2. Elementos principales de un secador de lecho fijo.

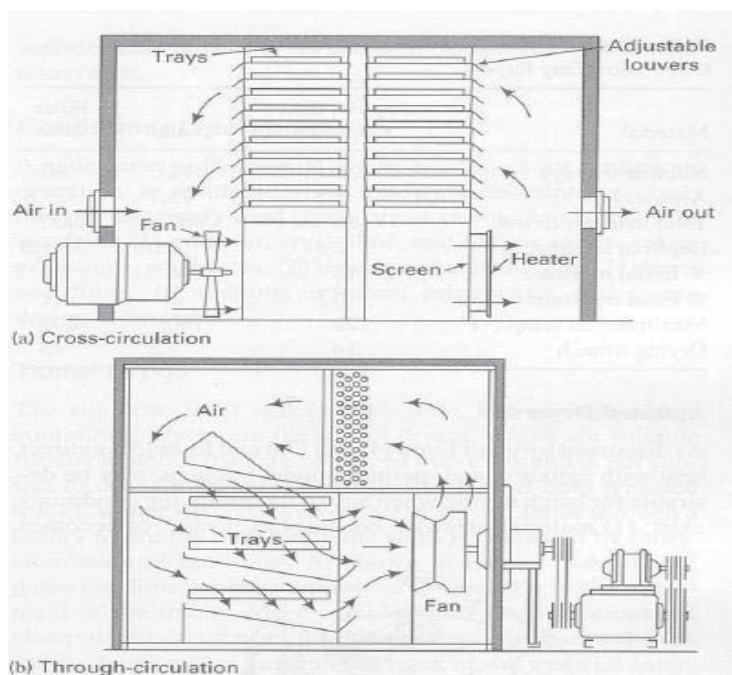


Figura 3. Secador de charolas

La figura 4 muestra un secador por lotes con agitación en los cuales se aprecia que se puede utilizar vacío para lograr un mayor grado de secado.

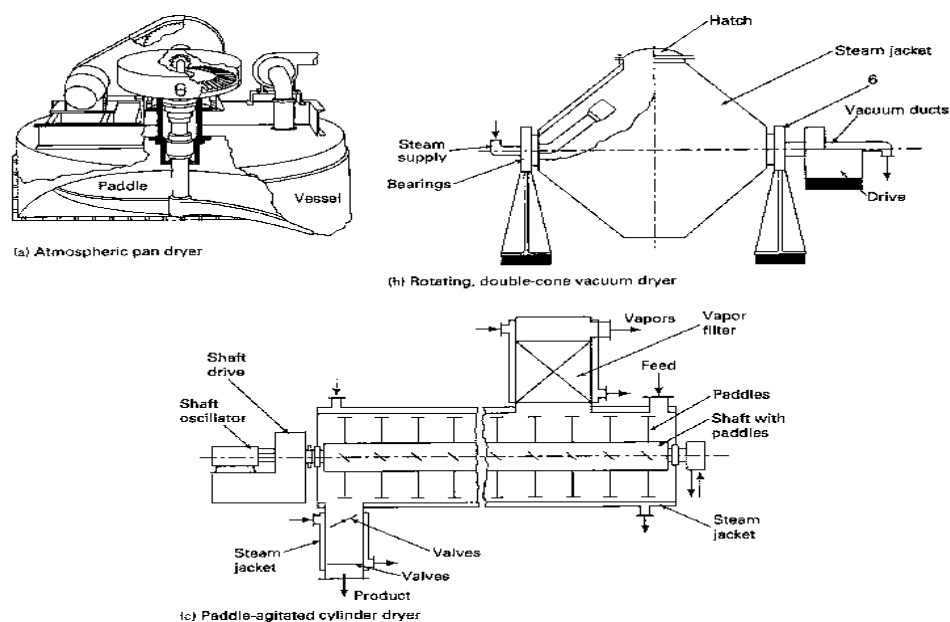


Figura 4. Secador por lotes con agitación.

Para operación continua los secadores que mas se han utilizado son el de tipo túnel, figura 5. Este tipo de secador está formado por un túnel, por el cual pasan bandejas o carretillas con el material a secar, dentro del túnel, se hace fluir, generalmente a contracorriente, aire caliente, el cual sirve para secar los sólidos. Este tipo de secador es típico de la industria alimenticia.

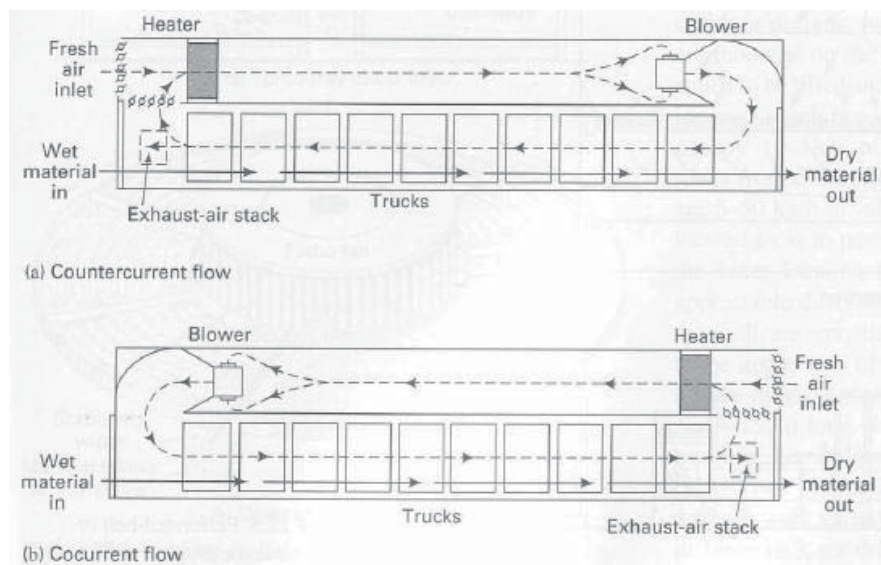


Figura 5. Secador continuo tipo túnel.

En la figura 6 se observa un secador rotatorio. En general, un secador rotatorio consta de un cilindro hueco que gira sobre su eje, con una ligera inclinación, para permitir el desliz de los sólidos a secar hacia la boca de salida. Se alimentan por la boca de entrada y por la boca de salida se alimenta el gas caliente, que habrá de secar a contracorriente el sólido que se desliza despacio hacia la salida, a medida que se va secando.

El método de calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared del cilindro que se calienta por el paso de los gases.

Las partículas atraviesan una sección relativamente corta, a medida que se deslizan, mientras su humedad disminuye de la misma manera en que descienden.

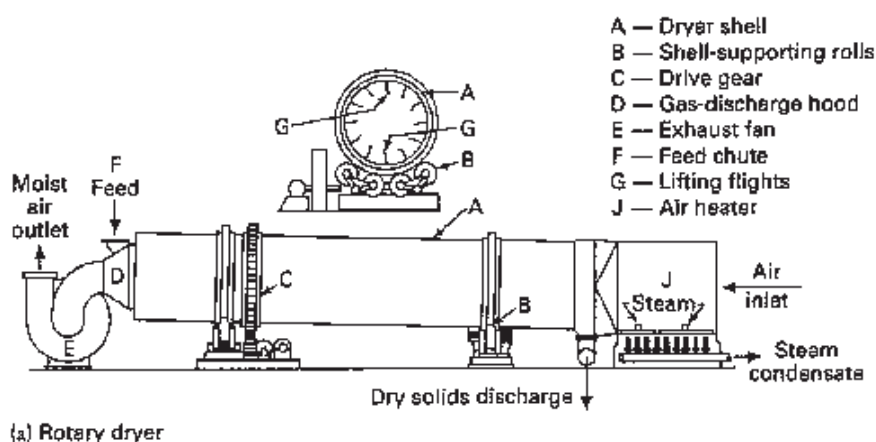


Figura 6. Secador continuo rotatorio.

Por ultimo en la figura 7 se tiene un secador tipo fluidizado que han tomado auge en la ultima década. El procesamiento en lechos fluidizados implica el secado, enfriamiento, aglomeración, granulación y revestimiento de los materiales en gránulos. Es ideal para una amplia gama de productos sensibles y no sensibles al calor. El procesamiento uniforme se logra haciendo pasar un gas (por lo general aire) a una velocidad controlada a través de una capa del producto para crear un estado fluidizado.

El gas de fluidización aporta el calor para el secado en lechos fluidizados, pero el flujo del gas no tiene que provenir de una sola fuente. El calor se puede introducir de manera eficaz calentando las superficies (paneles o tubos) inmersas en la capa fluidizada.

En el enfriamiento en lechos fluidizados se usa gas frío (por lo general aire acondicionado o ambiental). En las plantas de tamaño más económico en ocasiones será necesario acondicionar el gas para lograr que el producto se enfríe adecuadamente y para evitar que capte partículas volátiles (por lo general humedad). El calor también se puede eliminar enfriando las superficies inmersas en la capa fluidizada.

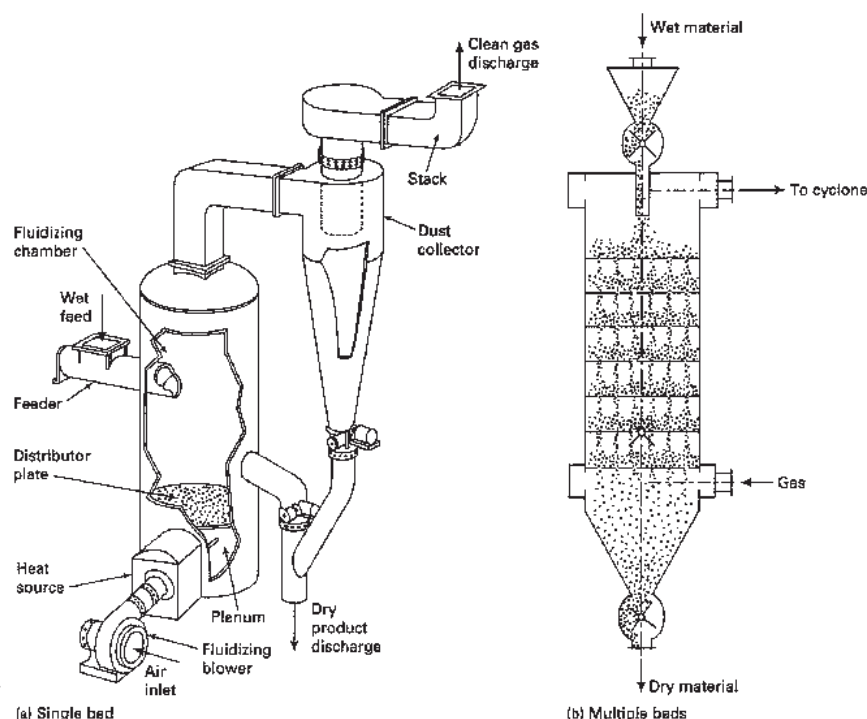


Figura 7. Secador continuo fluidizado.

Secador de charolas

Se describe mas a detalle este tipo de secador debido a que fue utilizado uno para realizar el presente trabajo. Es el más sencillo de los secadores es el secador de charolas, consiste esencialmente en un gabinete en el que se coloca el material en el que va a secarse sobre charolas y es una unidad intermitente que se utiliza para operaciones a baja capacidad. El secador puede tener espacio para 10, 20 o más charolas. Pueden ser entre paños de fondo sólido con el aire circulando a través de la parte superior e inferior del entrepaño o puede tener una base de malla con la circulación del aire controlada, de tal manera que pasa a través de la charola y de los sólidos que contiene. El material que va a secarse puede colocarse sobre bastidores o ganchos si está en forma de lámina. Las condiciones de secado se controlan de forma simple y se cambian con facilidad, de manera que este secador es particularmente adecuado para operaciones de laboratorio o para secar materiales que requieren modificar las condiciones de secado a medida que este avanza. Si las condiciones controlables externas permanecen constantes, las condiciones de secado serán constantes para cualquier charola de sólidos húmeda. En consecuencia, la trayectoria del secado en cualquier punto dado será exactamente como se analizó. Sin embargo, las charolas cercanas a la entrada de aire estarán sujetas a condiciones bastante distintas de las que se encuentran ubicadas cerca del final de la trayectoria del flujo de aire. Como resultado, el material se seca con rapidez en algunos entrepaños, mientras que en otros se seca con menor velocidad que el promedio. Esto tiene poca importancia para materiales, insensibles al calor, pero si el sobre secado puede dar lugar a carbonizaciones, las charolas deben retirarse a tiempos diferentes, o bien, debe reducirse la temperatura del aire al acercarse al final del proceso de

secado. En algunos secadores los fabricantes han superado esta dificultad, al menos en forma parcial, mediante un sistema para invertir la trayectoria del flujo del aire.

En los secadores de charola se utiliza casi siempre como medios desecantes vapor, gas o electricidad.

El funcionamiento satisfactorio de los secadores de charolas depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire sobre todo del material que se esté secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidades de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transferencia de calor en la superficie y con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado. La corriente de aire adecuada para este género de secadores depende de que el ventilador tenga una capacidad suficiente, del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados. La corriente de aire no uniforme es uno de los problemas más graves que se presentan en el funcionamiento de los secadores de charolas.

Los secadores de charolas pueden ser del tipo de carretillas de charolas o de charolas estacionarias. En el primer caso, las charolas se cargan sobre carretillas que se empujan hasta el interior del secador y, en el segundo, las charolas se cargan directamente en bastidores fijos dentro del secador. Las carretillas están provistas de ruedas con pestaña que corren sobre carriles, o bien, de ruedas planas giratorias. También se pueden suspender de mono rieles sobre los cuales se desplazan. Las carretillas cuentan por lo común con dos hileras de charolas, cada una de las cuales tiene de 18 a 48 charolas, según sean las dimensiones de éstas.

Las charolas pueden ser cuadradas o rectangulares, con una superficie de 0.37 a 0.75 $m^2/charola$ y se fabrican de cualquier material que sea compatible con las condiciones de corrosión y temperatura prevalecientes. Cuando se amontonan en una carretilla, debe dejarse un espacio libre de no menos de 3.80 cm entre el material que contiene y la base de la que esta inmediatamente encima. Cuando las características del material y el manejo lo permitan, las charolas deben tener bases perforadas para proveer una mayor superficie de secado.

En general, se prefieren las charolas metálicas, ya que conducen el calor con mayor facilidad. Las cargas de las charolas varían comúnmente de 1.25 a 10.0 cm de profundidad.

El aire se hace circular por medio de ventiladores de hélice o centrifugado; por lo común, el ventilador se monta dentro o directamente arriba del secador. La caída total de presión por las charolas, los calentadores y los ductos es, casi siempre, del orden de 2.5 a 5 cm de agua.

La circulación del aire es usualmente del orden del 80 al 95%, excepto durante la etapa inicial de desecamiento de evaporación rápida.

CURVAS FUNDAMENTALES DE SECADO

La cinética de secado de un material no es más que la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el *tiempo* o *variables* relacionadas con éste, como la propia humedad o las dimensiones del equipo.

La intensidad de evaporación se determina a través de la *velocidad* de secado, que es el *cambio* de humedad (base seca) en el *tiempo*.

A partir de las curvas de cinética de secado (X vs t , dX/dt vs X), que deben ser obtenidas a nivel de *laboratorio*, puede tenerse una idea del tiempo de secado, del *consumo* de energía, del mecanismo de *migración* de humedad, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa y de la influencia que tienen en la *velocidad* de secado las *variables* del proceso tales como: temperatura, humedad de entrada, velocidad del *aire*, etcétera.

Por todo esto es que determinar las curvas de secado constituye uno de los *objetivos* fundamentales de este trabajo.

CURVAS DE SECADO.

Con los *datos* obtenidos durante la prueba de secado, o sea, de la variación de la humedad con el tiempo, puede hacerse un gráfico de contenido de humedad en *función* del tiempo tal como la que se muestra en la figura 8. Este será útil para la determinación directa del tiempo necesario en el secado discontinuo de grandes partidas bajo las mismas condiciones de secado.

Generalmente se pueden apreciar dos partes notorias de la curva de régimen de secado: un periodo de régimen constante y un periodo de régimen decreciente, aun que teóricamente existen o se pueden apreciar tres etapas del proceso o periodos de secado.

Etapas A–B: Es una etapa de calentamiento (o enfriamiento) inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad que se reporta en la Figura 9. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura *ambiente* hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los *gases*. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas.

Etapas B–C: En la figura 9 también se muestra esta etapa que comúnmente se le llama primer periodo de secado o periodo de velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este periodo el sólido tiene un *comportamiento* no higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante si el gas tiene un *estado* estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido. Durante este periodo la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento.

Etapas C–D: Es el segundo periodo de secado o periodo de velocidad de secado decreciente; donde se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas o las *características* internas y externas simultáneamente tal como se ve en la figura 9. En estas condiciones el sólido tiene un *comportamiento* higroscópico. Durante el periodo, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del

calor se emplea en un calentamiento del sólido. Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación.

Este periodo de velocidad decreciente puede dividirse en dos partes, con diferentes comportamientos de la velocidad de secado, la cual decrece cada vez más al disminuir la humedad del sólido. Esto implica dos *modelos* de secado diferente en dicha zona.

Un parámetro muy importante a determinar en los materiales a secar es la humedad a la cual se cambia del primero al segundo periodo, llamada humedad crítica Figura 3. Esta depende del tipo del material y de la relación de secado en el primer periodo.

La forma de la curva de secado en el segundo periodo varia en dependencia de las características del material a secar. Existen curvas típicas de cuerpos capilar-porosos con grandes superficies específicas y de pequeñas superficies específicas así como de cuerpos coloidales.

CONSIDERACIONES SOBRE EL APROVECHAMIENTO DEL BAGAZO DE CAÑA COMO UNA ALTERNATIVA

El bagazo de caña es una fibra de buena calidad para la producción de una gran cantidad de surtidos de pulpa, papel, derivados químicos de celulosa y tableros aglomerados. Por su carácter renovable y las características de las tecnologías disponibles, el uso del bagazo representa un aporte ecológico de importancia como alternativa a la explotación forestal.

En las fábricas de azúcar y alcohol, se emplea actualmente el bagazo de la caña como combustible en las calderas que generan el vapor que necesitan las turbinas para el accionamiento de generadores eléctricos, molinos de trapiches, bombas centrifugas, ventiladores, etcétera y el vapor de escape se destina a los procesos de fabricación. Las presiones y temperaturas del vapor generado en estas calderas son relativamente bajas pero suficientes para lograr un equilibrio energético entre fuerza motriz y vapor para procesos. Con calderas de presión y temperatura de vapor más altas y mejor rendimiento se puede accionar una turbina con un generador eléctrico de mayor potencia, que cubre las necesidades propias de la fábrica y queda un importante excedente que se podría vender a la red de distribución pública sin que haya incremento de costos en combustible. Esta energía eléctrica generada por un combustible renovable, que se entregaría a la red de distribución pública, reemplazaría a la generada en centrales térmicas que consumen combustibles fósiles, con un impacto ambiental favorable.

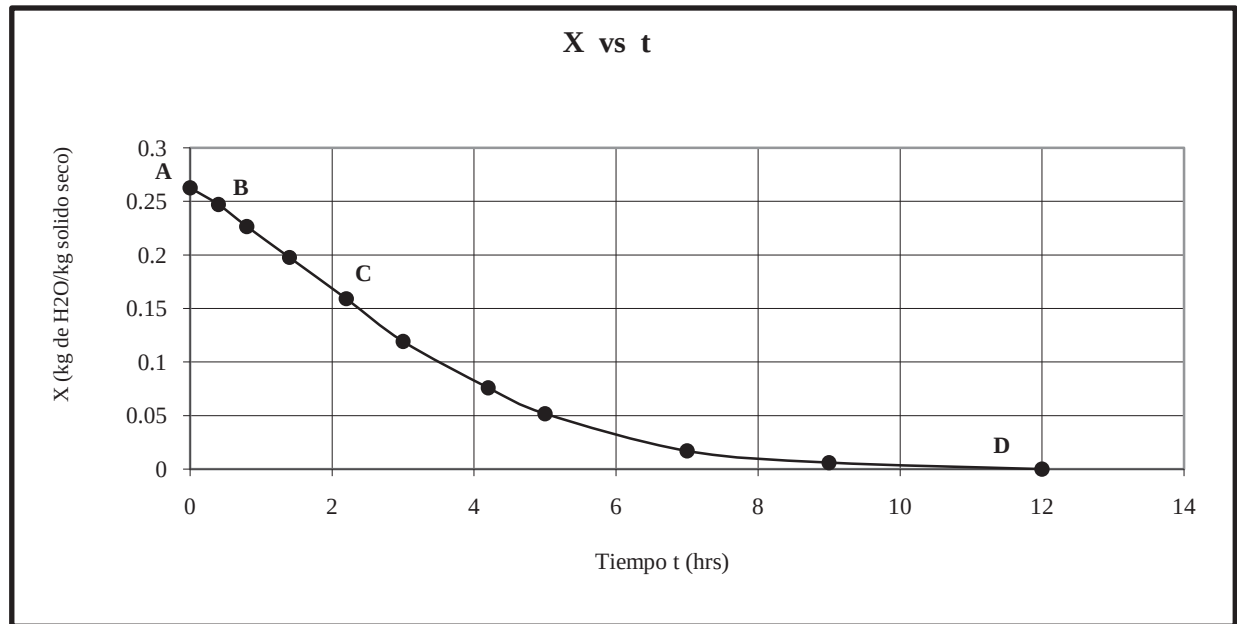


Figura 8. Curva de velocidad de secado; Humedad libre X en función del tiempo.

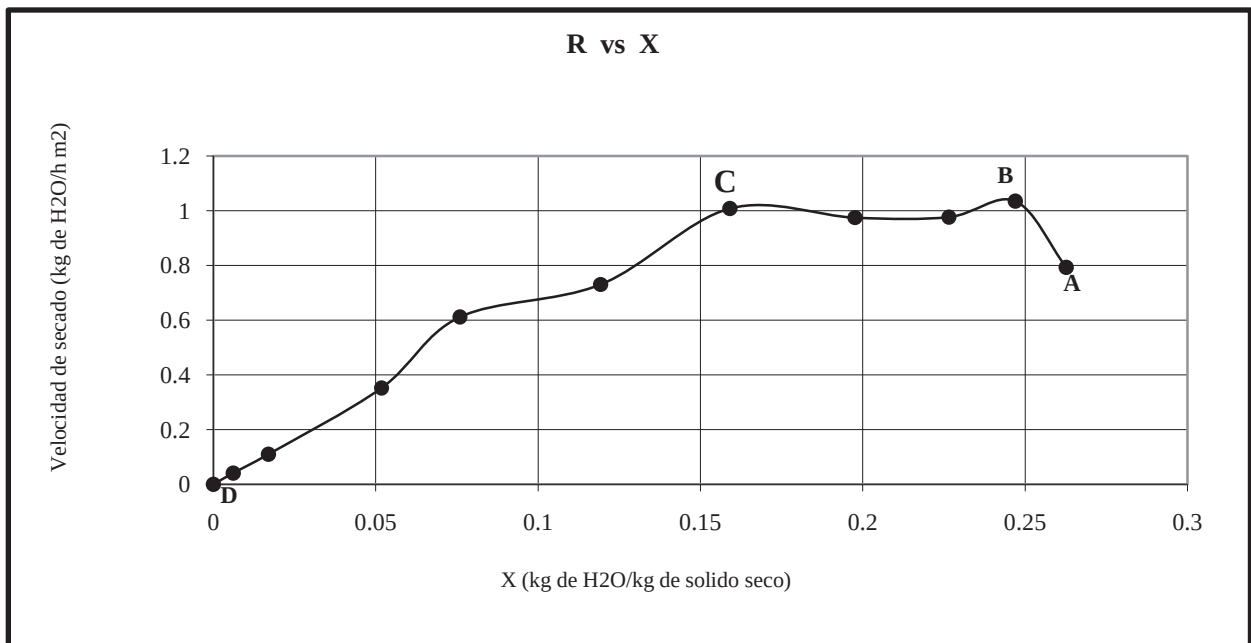


Figura 9. Curva de secado mostrando las tres etapas de secado; velocidad de secado R en función del contenido de humedad X ; **B-C** constante, **C-D** decreciente; el punto **C** muestra la humedad crítica X_c .

CAPITULO 3

Metodología

El procedimiento que se hizo para obtener los datos necesarios a cerca del comportamiento del secado del bagazo de caña de azúcar y poder realizar las graficas de velocidad de secado así como las de humedad libre para finalmente realizar un escalamiento del secador piloto a un secador industrial que cumpla las necesidades de la cantidad de material (bagazo de caña de azúcar) que se desee secar fue el siguiente.

Los experimentos que se realizaron fueron seis, en los cuales se tomaron muestras de bagazo totalmente libres de humedad. El bagazo fue colocado en dos charolas para pesarlo en una báscula digital como se muestra en la figura 10 y posteriormente se coloco en un recipiente con agua en el cual permaneció más de 24 horas con la finalidad de que las fibras del bagazo absorbiera la mayor cantidad de agua posible, al siguiente día se saco el bagazo del recipiente y se repartió entre las dos charolas las cuales se colocaron en el secador piloto tipo túnel (figura 11) para iniciar el primer experimento.



Figura 10. Muestra de bagazo de caña de azúcar libre de humedad colocada en una de las charolas, la cual contiene las siguientes dimensiones: 18.5 cm de ancho, 27.5 cm de largo, 2.5 cm de alto y 430 g de peso.



Figura 11. Charolas que contienen el bagazo de caña de azúcar dentro del secador piloto tipo túnel. (Los cables que se pueden observar dentro del secador están en contacto directo con el bagazo, a través de ellos se mide la temperatura del bagazo)

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE SECADO

El secador piloto de charolas tipo túnel (figura 12), (con dimensiones de 2.75 m de largo, 28 cm de ancho y 28 cm de alto) que se utilizó para realizar los seis experimentos se alimentó con aire a través de un ventilador, el flujo de aire pasa a través de un par de resistencias en forma de “U”, las cuales están conectadas a 220 volts y contienen una potencia de 4.5 kW cada una. El secador está conectado a un software (figura 13) el cual se programa para que guarde de manera continua la información del proceso de secado, según las necesidades de cada uno de los experimentos realizados, como fueron el peso del bagazo, temperatura, velocidad del aire de alimentación y los intervalos de tiempo, entre otras.

En el primer experimento se utilizaron 80 g de bagazo totalmente seco el cual se introdujo en el recipiente con agua, ya con humedad pesó 220 g, dicho bagazo fue repartido en dos charolas las cuales pesaron 430 g cada una dando un total de 1080 g, entre la muestra húmeda y las charolas, posteriormente las charolas junto con el bagazo se colocaron dentro del

secador en unas rejillas que sirvieron como bascula. Después se introdujeron los datos al software como fue el peso inicial del bagazo con humedad (220 g), la temperatura a la cual tenia que estar el aire de alimentación (60° C), la velocidad del aire (1 m/s), los intervalos de tiempo (cada 150 s) en los cuales conforme se iba secando la muestra se trazaba una grafica en forma descendente como se muestra en la (figura 14), ya estando establecidas las variables indicadas anteriormente se inicio el secado, cuando la grafica marco el peso de 80 g el secador se detuvo, se sacaron las muestras de bagazo de las dos charolas para pesarlas y comparar el peso que marcaba la grafica de la computadora con el peso que marco la bascula digital que fue de 80 g. Los datos obtenidos por el primer experimento fueron convertidos a unidades más apropiadas para facilitar los cálculos dichos datos se muestran en la tabla 2.

En el segundo experimento la muestra de bagazo totalmente seco fue de 70 g y con humedad fue de 310 g, los datos que se introdujeron a la computadora fueron: (peso inicial del bagazo con humedad 310g, temperatura del aire alimentado 60° C, velocidad del aire 1.40 m/s, intervalos de tiempo 300 s). Los datos que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.

Para el tercer experimento se utilizaron 80 g de bagazo seco y con humedad pesó 340 g los datos que se introdujeron a la computadora fue: (peso inicial del bagazo con humedad 340g temperatura del aire alimentado 60° C, velocidad del aire 1.60 m/s, intervalos de tiempo 600 segundos). Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.

El cuarto experimento fue realizado con 80 g de bagazo seco y con humedad pesó 440 g las variables con las que se trabajó el equipo fueron: (peso inicial del bagazo con humedad 440 g temperatura del aire alimentado 80° C, velocidad del aire 1.00 m/s, intervalos de tiempo 600 segundos). En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos.

La muestra de bagazo seco que se utilizo en el quinto experimento fueron 100 g y con humedad el peso fue de 420 g, los datos de operación fueron: (peso inicial del bagazo con humedad 420 g, temperatura del aire alimentado 80° C, velocidad del aire 1.40 m/s, intervalos de tiempo 600 segundos). La tabla 6 muestra los resultados obtenidos.

80 g de bagazo seco fueron utilizados en el sexto experimento, con humedad pesó 420 g los datos con los que se trabajo son: (peso inicial del bagazo con humedad 420 g, temperatura del aire alimentado 80° C, velocidad del aire 1.60 m/s, intervalos de tiempo 600 s). Los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla 7.

Los pesos iniciales del bagazo para los diferentes experimentos, las temperaturas con las cuales se calentó el aire para el secado del bagazo, las velocidades del aire caliente que fue alimentado el secador y los tiempos de muestreo con los que se trabajaron para obtener cada uno de los datos mostrados en las diferentes tablas que se mencionaron anteriormente se muestran en forma de resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones con las cuales se realizaron los seis experimentos.

Experimento	Ws (grs)	W (grs)	T (° C)	V (m/s)	Tiempo de muestreo, t (s)
1	80	220	60	1.00	150
2	70	310	60	1.40	300
3	80	340	60	1.60	600
4	80	440	80	1.00	600
5	100	420	80	1.40	600
6	80	440	80	1.60	600



Figura 12. Secador piloto de charolas tipo túnel, con dimensiones de 2.75 m de largo, 28 cm de ancho y 28 cm de alto.



Figura 13. Secador piloto de charolas tipo túnel conectado al software.



Figura 14. Descendencia de peso del bagazo conforme se va secando de acuerdo al intervalo de tiempo seleccionado para cada uno de los seis experimentos realizados.

CAPITULO 4

Resultados y Discusiones

En éste capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los seis experimentos realizados durante el secado del bagazo de caña de azúcar a las diferentes condiciones que se mencionaron en el capítulo anterior, así como los cálculos realizados a partir de los datos de las tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

Primero se determinará la humedad X_t del bagazo de caña, para después determinar las curvas de secado R , con los valores de la humedad al equilibrio X^* , intervalos de humedad libre dX , intervalos de tiempo dt , kilogramos de bagazo seco utilizados L_s y el área del secador piloto A , para finalmente realizar un escalamiento como ejemplo.

Tabla 2. Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el primer experimento.

t (h)	W (kg)
0	0.22
0.12194444	0.21437612
0.24694444	0.20849266
0.37194444	0.1969661
0.49694444	0.19143794
0.62194444	0.16621117
0.78027778	0.15850938
1.00527778	0.14632445
1.25527778	0.12219495
1.50527778	0.10531788
1.755	0.09669647
2.08833333	0.08236925

Tabla 3. Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el segundo experimento.

t (h)	W (kg)
0	0.31
0.23777778	0.29246456
0.65416667	0.24191698
0.82083333	0.2296798
1.15416667	0.21421351
1.4875	0.18797307
2.15416667	0.17935166
2.48722222	0.15603727
2.65388889	0.13220038
3.48722222	0.12828155
4.15361111	0.11396479
4.32027778	0.07952094

Tabla 4. Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el tercer experimento.

t (h)	W (kg)
0	0.34
0.16666667	0.29232621
0.33333333	0.26832211
0.83333333	0.23674162
1	0.21379299
1.5	0.18808551
1.66694444	0.17740541
3.00027778	0.13879194
3.50055556	0.13090204
5.00055556	0.11805381
5.50083333	0.1168858

Tabla 5. Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el cuarto experimento.

t (h)	W (kg)
0	0.44
0.34555556	0.37406972
0.51222222	0.34136061
0.84555556	0.32550766
1.01222222	0.29102202
1.34555556	0.19339629
3.17861111	0.17372902
3.51194444	0.1242996
4.845	0.11419426
5.01166667	0.1053534
5.17833333	0.10409937

Tabla 6. Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el quinto experimento.

t (h)	W (kg)
0	0.42
0.1597222	0.402569
0.3263889	0.382066
1.4927778	0.262965
2.1594444	0.23963
2.8258333	0.198519
3.6591667	0.166959
3.9925	0.149173
4.4922222	0.135828
5.8255556	0.115398
6.0755556	0.107247
6.2419444	0.104844

Tabla 7. Pesos de bagazo de caña en función del tiempo obtenidos en el sexto experimento.

t (h)	W (kgs)
0	0.44
0.5	0.3945
1.166667	0.327608
1.666667	0.284616
2.500278	0.231874
3.000278	0.204264
3.666944	0.164888
4.000556	0.152296
5.333889	0.130079
6.000833	0.120005
6.6675	0.092029

A partir de los datos de la tabla 2, y aplicando la ecuación (1), se convertirán dichos datos a una curva de secado para ello se procederá a calcular los valores de la variable **Xt**.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad \text{ec. (1)}$$

dónde:

X_t = Humedad del sólido (bagazo) en: [kg totales de agua / kg de sólido seco]

W = Peso del sólido (bagazo) húmedo en: [kg totales de agua + kg sólido seco]

W_s = Peso del sólido bagazo) seco en: [kg]

Ejemplo: el primer cálculo para un tiempo igual a cero se realizó con $W = 0.22$; $W_s = 0.08$; obteniendo el siguiente resultado.

$$X_t = (0.22 - 0.08) / 0.08 = \underline{\underline{1.75 \text{ kg de agua / kg de bagazo seco}}}$$

Después se procedió a calcular el contenido de humedad libre **X** para cada valor de **Xt** obtenido y aplicando la ecuación (2), como se muestra a continuación.

$$X = X_t - X^* \quad \text{ec. (2)}$$

dónde:

X = Humedad libre en: [kg de agua libre/ kg de bagazo seco]

X_t = Humedad del bagazo en: [kg totales de agua / kg de bagazo seco]

X^* = Humedad de equilibrio en: [kg de humedad de equilibrio/ kg de bagazo seco]

La humedad de equilibrio X^* que se utilizó para determinar los valores de la humedad libre X de los datos obtenidos para cada uno de los experimentos se muestran en la Tabla 8. Por lo tanto tenemos que para el primer valor de humedad libre del primer experimento es:

$X = 1.75 - 0.00236925 = 1.74763075$, por lo tanto el contenido de humedad libre es el siguiente:

$X = 1.74763075$ kg de agua libre/ kg de bagazo seco

Los resultados obtenidos de humedad X_t del bagazo y los de humedad libre X , para cada uno de los diferentes intervalos de tiempo del primer experimento se muestran en la Tabla 9.

Tabla 8. Condiciones de humedad de equilibrio X^* , bagazo seco utilizado L_s y área superficial de secado A .

Experimento	T (° C)	V (m/s)	X^* (kg de H ₂ O/kg bagazo seco)	L_s (kg)	$\bar{A}$ (m ²)
1	60	1.00	0.00236925	0.08	0.10175
2	60	1.40	0.00952094	0.07	0.10175
3	60	1.60	0.0368858	0.08	0.10175
4	80	1.00	0.02409937	0.08	0.10175
5	80	1.40	0.004844	0.10	0.10175
6	80	1.60	0.012029	0.08	0.10175

Tabla 9. Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X obtenidos a una temperatura de 60°C , una velocidad de aire de 1.00 m/s y una humedad de equilibrio $X^* = 0.00236925$.

$t \text{ (h)}$	$X_t(\text{kg de agua/kg de bagazo seco})$	$X(\text{kg de agua libre/kg de bagazo seco})$
0	1.75	1.74763075
0.12194444	1.6797015	1.67733225
0.24694444	1.60615825	1.603789
0.37194444	1.46207625	1.459707
0.49694444	1.39297425	1.390605
0.62194444	1.07763963	1.07527038
0.78027778	0.98136725	0.978998
1.00527778	0.82905563	0.82668638
1.25527778	0.52743688	0.52506763
1.50527778	0.3164735	0.31410425
1.755	0.20870588	0.20633663
2.08833333	0.02961562	0.02724637

El procedimiento que se siguió para determinar la humedad del bagazo X_t y la humedad libre X con los datos obtenidos en el según experimento fue el que se aplicó para el primero, utilizando las ecuaciones (1) y (2), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9. Del mismo modo se aplicó para los cuatro experimentos restantes, de los cuales los resultados se muestran en la Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 respectivamente.

Tabla 10. Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X obtenidos a una temperatura de 60°C , una velocidad de aire de 1.40 m/s y una humedad de equilibrio $X^* = 0.00952094$.

$t \text{ (h)}$	$X_t(\text{kg de agua/kg bagazo seco})$	$X(\text{kg de agua libre/kg de bagazo seco})$
0	3.42857143	3.41905049
0.23777778	3.1780651	3.16854416
0.65416667	2.45595686	2.44643592
0.82083333	2.28114	2.27161906
1.15416667	2.060193	2.05067206
1.4875	1.68532957	1.67580863
2.15416667	1.56216657	1.55264563
2.48722222	1.22910386	1.21958292
2.65388889	0.88857686	0.87905592
3.48722222	0.83259357	0.82307263
4.32027778	0.62806843	0.61854749

Tabla 11. Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X obtenidos a una temperatura de 60°C , una velocidad de aire de 1.60 m/s y una humedad de equilibrio $X^* = 0.0368858$.

$t \text{ (h)}$	$X_t(\text{kg de agua/kg bagazo seco})$	$X(\text{kg de agua libre/kg de bagazo seco})$
0	3.25	3.2131142
0.16666667	2.65407763	2.61719183
0.33333333	2.35402638	2.31714058
0.83333333	1.95927025	1.92238445
1	1.67241238	1.63552658
1.5	1.35106888	1.31418308
1.66694444	1.21756763	1.18068183
3.00027778	0.73489925	0.69801345
3.50055556	0.6362755	0.5993897
5.00055556	0.47567268	0.43878688
5.50083333	0.46107249	0.42418669

Tabla 12. Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X obtenidos a una temperatura de 80°C , una velocidad de aire de 1.00 m/s y una humedad de equilibrio $X^* = 0.02409937$.

$t \text{ (h)}$	$X_t(\text{kg de agua/kg bagazo seco})$	$X(\text{kg de agua libre/kg de bagazo seco})$
0	4.5	4.47590063
0.34555556	3.6758715	3.65177213
0.51222222	3.26700763	3.24290826
0.84555556	3.06884575	3.04474638
1.01222222	2.63777525	2.61367588
1.34555556	1.41745363	1.39335426
3.17861111	1.17161275	1.14751338
3.51194444	0.553745	0.52964563
4.845	0.42742825	0.40332888
5.01166667	0.3169175	0.29281813
5.17833333	0.30124213	0.27714276

Tabla 13. Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X obtenidos a una temperatura de 80°C , una velocidad de aire de 1.40 m/s y una humedad de equilibrio $X^* = 0.004844$.

$t \text{ (h)}$	$X_t(\text{kg de agua/kg bagazo seco})$	$X(\text{kg de agua libre/kg de bagazo seco})$
0	3.2	3.195156
0.1597222	3.025691	3.020847
0.3263889	2.820658	2.815814
1.4927778	1.629649	1.624805
2.1594444	1.396296	1.391452
2.8258333	0.985186	0.980342
3.6591667	0.66959	0.664746
3.9925	0.491727	0.486884
4.4922222	0.358278	0.353435
5.8255556	0.153977	0.149133
6.0755556	0.072465	0.067622

Tabla 14. Datos de humedad X_t del bagazo y humedad libre X obtenidos a una temperatura de 80°C , una velocidad de aire de 1.60 m/s y una humedad de equilibrio $X^* = 0.012029$.

$t \text{ (h)}$	$X_t(\text{kg de agua/kg bagazo seco})$	$X(\text{kg de agua libre/kg de bagazo seco})$
0	4.5	4.487971
0.5	3.931248	3.919219
1.166667	3.095102	3.083072
1.666667	2.557701	2.545671
2.500278	1.898424	1.886394
3.000278	1.553306	1.541277
3.666944	1.061102	1.049073
4.000556	0.903696	0.891666
5.333889	0.625982	0.613953
6.000833	0.500057	0.488028
6.6675	0.150368	0.138338

Después de haber realizado los cálculos necesarios y obtenido los valores de la humedad X_t del bagazo y de la humedad libre X para cada uno de los experimentos efectuados, el siguiente paso es, calcular los valores de la velocidad de secado R con la ecuación (3), como se muestra a continuación.

$$R = - \frac{L_s dX}{A dt} \quad \text{ec (3)}$$

dónde:

R = velocidad de secado en: [kg de H₂O/h * m²]

L_s = kilogramos de bagazo seco usado

A = área superficial expuesta al secado en: [m²]

dX = diferencia de humedad libre en: [hg de H₂O]

dt = diferencia de tiempo en: [hrs]

Al sustituir los datos de tiempo **t** y humedad libre **X** tomados de la tabla 9, en la ecuación (3) con un área **A** y la muestra utilizada de bagazo seco **L_s** tomados de la tabla 8, tenemos que:

$$R = - (0.08\text{kg}) (1.74763075 - 1.67733225)/(0.10175\text{m}^2) (0 - 0.12194444)$$

$$R = \underline{\underline{0.45325187 \text{ kg de H}_2\text{O/h * m}^2}}$$

Con el mismo procedimiento mostrado anteriormente se obtuvieron los valores de velocidad de secado **R**, restantes de la tabla 9, para cada una de las condiciones de tiempo y humedad libre, dichos resultados se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Condiciones de velocidad de secado **R**, en función del tiempo y humedad libre para el primer experimento.

t (h)	X(kg de agua libre/kg de bagazo seco)	R(kg de H ₂ O/h * m ²)
0	1.74763075	0.45325187
0.12194444	1.67733225	0.46258162
0.24694444	1.603789	0.90626516
0.37194444	1.459707	0.43464649
0.49694444	1.390605	1.98343155
0.62194444	1.07527038	0.47806274
0.78027778	0.978998	0.53223827
1.00527778	0.82668638	0.94857985
1.25527778	0.52506763	0.66347204
1.50527778	0.31410425	0.33930221
1.755	0.20633663	0.48669081
2.08833333	0.02724637	0

De la misma manera en la que se determinaron los valores de las velocidades de secado **R** para el primer experimento, se hizo para cada uno de los cinco experimentos restantes. De los cuales sus resultados obtenidos se muestran en las tablas 16, 17, 18, 19 y 20 respectivamente.

Tabla 16. Condiciones de velocidad de secado **R**, en función del tiempo y humedad libre para el segundo experimento.

t (h)	X(kg de agua libre/kg de bagazo seco)	R(kg de H ₂ O/h * m ²)
0	3.41905049	0.24986057
0.237777778	3.16854416	0.4018857
0.65416667	2.44643592	0.41555027
0.82083333	2.27161906	0.39561789
1.15416667	2.05067206	0.38822329
1.4875	1.67580863	0.37035302
2.15416667	1.55264563	0.31418359
2.48722222	1.21958292	0.2310858
2.65388889	0.87905592	0.10106123
3.48722222	0.82307263	0.04375253
4.32027778	0.61854749	0

Tabla 17. Condiciones de velocidad de secado **R**, en función del tiempo y humedad libre, para el tercer experimento.

t (h)	X(kg de agua libre/kg de bagazo seco)	R(kg de H ₂ O/h * m ²)
0	3.2131142	2.81123086
0.16666667	2.61719183	1.41547518
0.33333333	2.31714058	1.52701209
0.83333333	1.92238445	1.35323617
1	1.63552658	0.66922319
1.5	1.31418308	0.60818123
1.66694444	1.18068183	0.4350569
3.00027778	0.69801345	0.3771314
3.50055556	0.5993897	0.1115369
5.00055556	0.43878688	0.06887557
5.50083333	0.42418669	0

Tabla 18. Condiciones de velocidad de secado **R**, en función del tiempo y humedad libre, para el cuarto experimento.

t (h)	X(kg de agua libre/kg de bagazo seco)	R(kg de H ₂ O/h * m ²)
0	4.47590063	3.35748415
0.34555556	3.65177213	1.92879273
0.51222222	3.24290826	0.80602614
0.84555556	3.04474638	0.74070545
1.01222222	2.61367588	1.25279115
1.34555556	1.39335426	1.06052816
3.17861111	1.14751338	1.03772757
3.51194444	0.52964563	0.84361533
4.845	0.40332888	0.59589229
5.01166667	0.29281813	0.52132835
5.17833333	0.27714276	0.07394771
5.345	0	0

Tabla 19. Condiciones de velocidad de secado **R**, en función del tiempo y humedad libre, para el quinto experimento.

t (h)	X(kg de agua libre/kg de bagazo seco)	R(kg de H ₂ O/h * m ²)
0	3.195156	1.072558
0.1597222	3.020847	1.209039
0.3263889	2.815814	0.939131
1.4927778	1.624805	0.937283
2.1594444	1.391452	0.981651
2.8258333	0.980342	0.859638
3.6591667	0.664746	0.839919
3.9925	0.486884	0.502226
4.4922222	0.353435	0.359877
5.8255556	0.149133	0.322288
6.0755556	0.067622	0.118712
6.2419444	0	0

Tabla 20. Condiciones de velocidad de secado **R**, en función del tiempo y humedad Libre, para el sexto experimento.

t (h)	X(kg de agua libre/kg de bagazo seco)	R(kg de H ₂ O/h * m ²)
0	4.349633	1.621295
0.5	3.780881	0.947142
1.166667	2.944734	0.885519
1.666667	2.407333	0.794318
2.500278	1.748056	1.077166
3.000278	1.402939	0.495447
3.666944	0.910735	0.473091
4.000556	0.753328	0.301335
5.333889	0.475615	0.20582
6.000833	0.34969	0.180555
6.6675	0.231994	0.059158
7.1675	0	0

A hora con los datos de la tabla 9, correspondientes al primer experimento se trazara una gráfica de humedad libre X contra tiempo t como se muestra en la figura 15. Con los datos de la tabla 15, se realizo una curva de secado R, la cual se muestra en la figura 16.

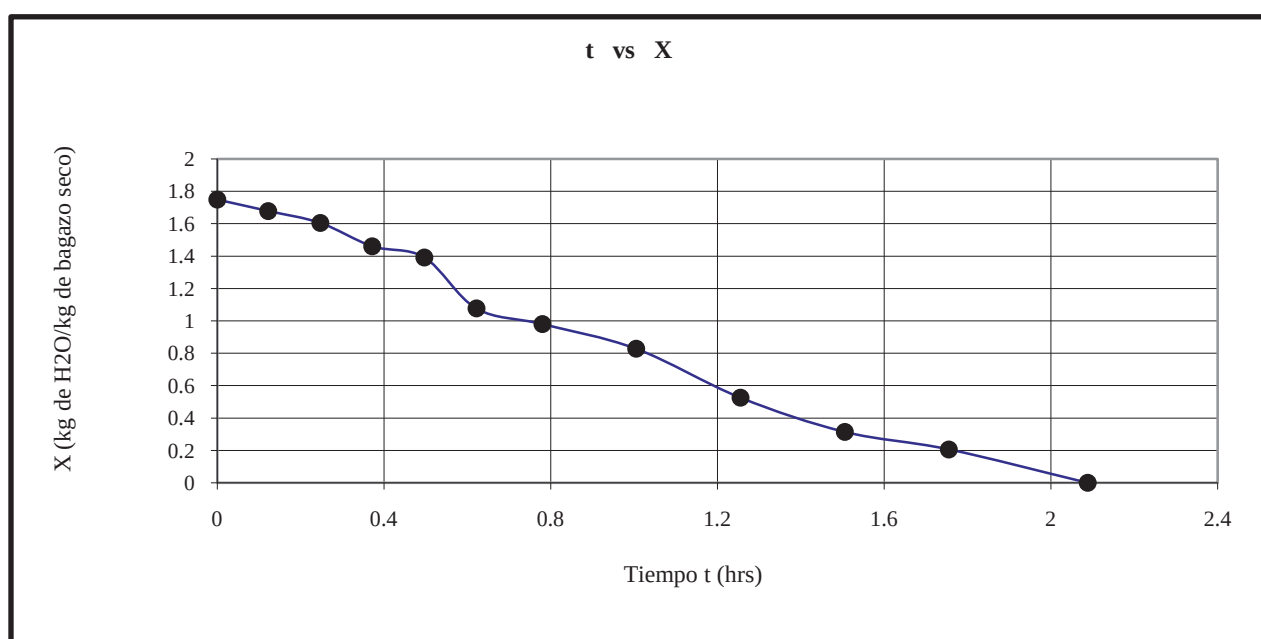


Figura 15. Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo t, para el experimento 1.

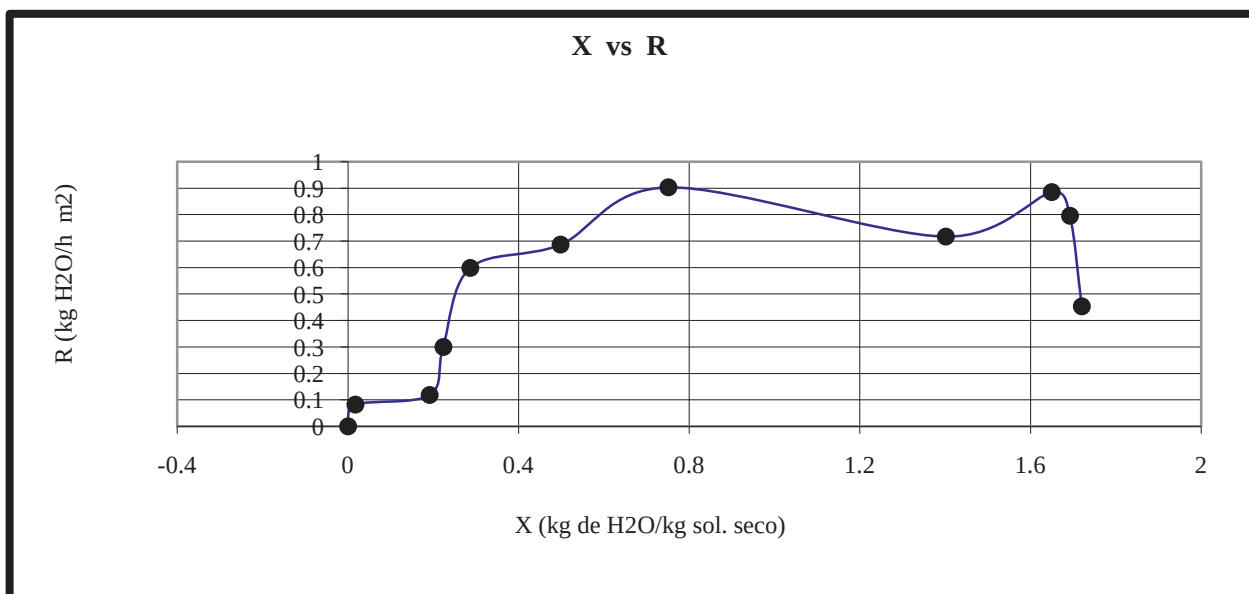


Figura 16. Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X, para el experimento 1.

Con los datos de la tabla 10, correspondientes al segundo experimento se realizó una gráfica de humedad libre en función del tiempo figura 17.

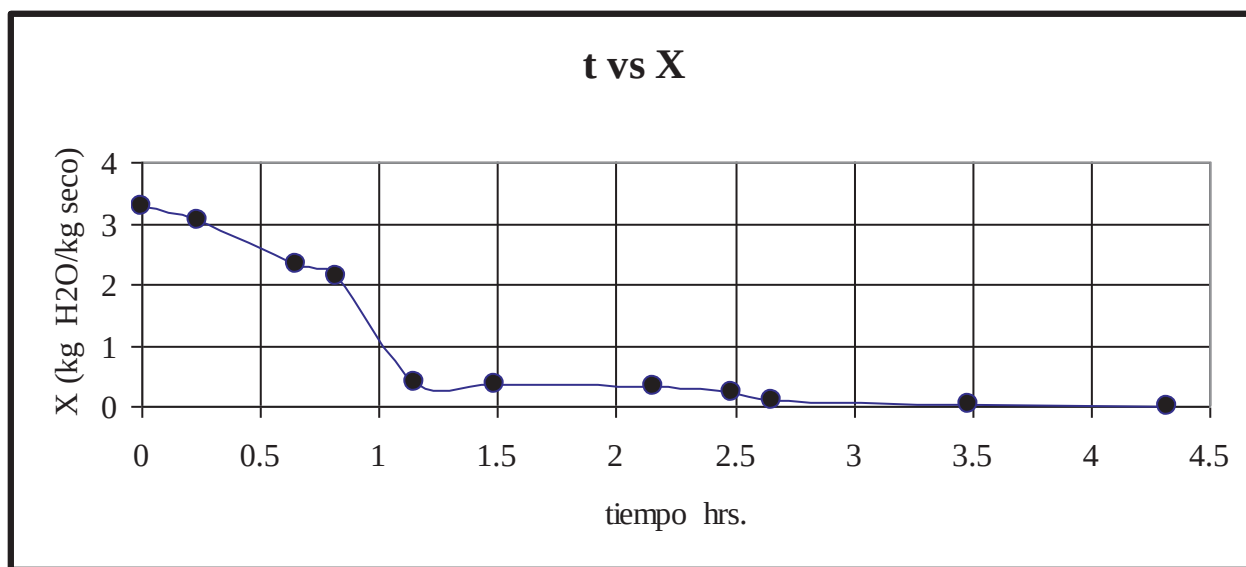


Figura 17. Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo t, para el experimento 2.

Con los datos de la tabla 16, se realizó una curva de velocidad de secado R, la cual se muestra en la figura 18.

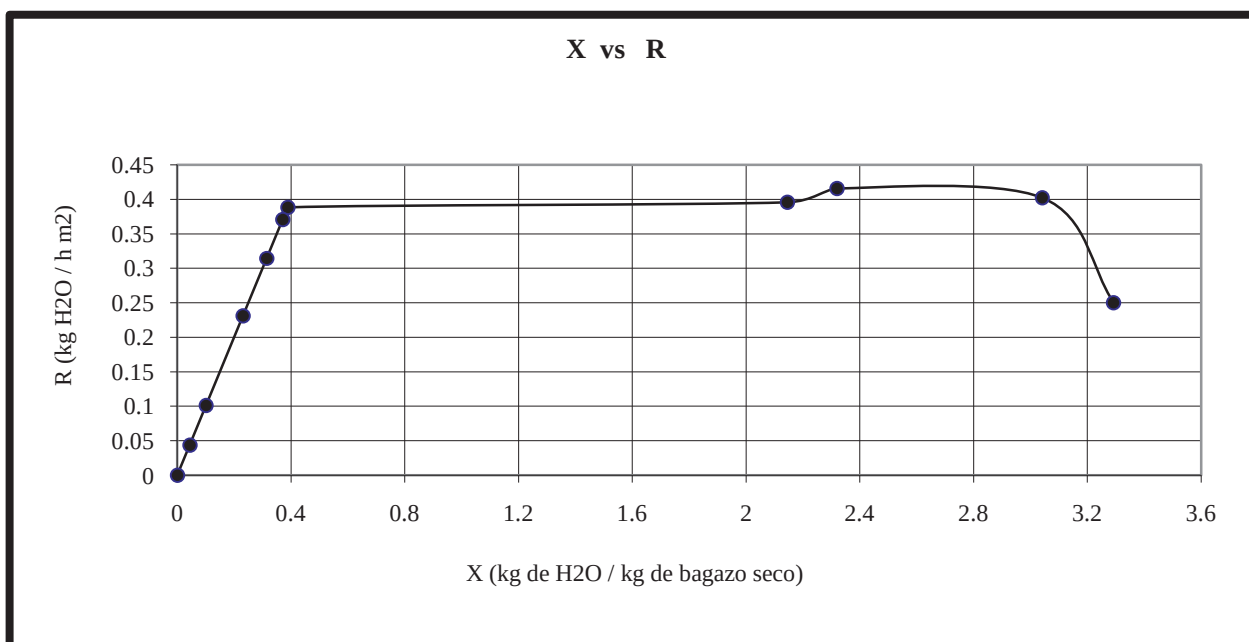


Figura 18. Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X, para el experimento 2.

Con los datos de la tabla 11, correspondientes al tercer experimento se realizo una grafica de humedad libre en función del tiempo figura 19.

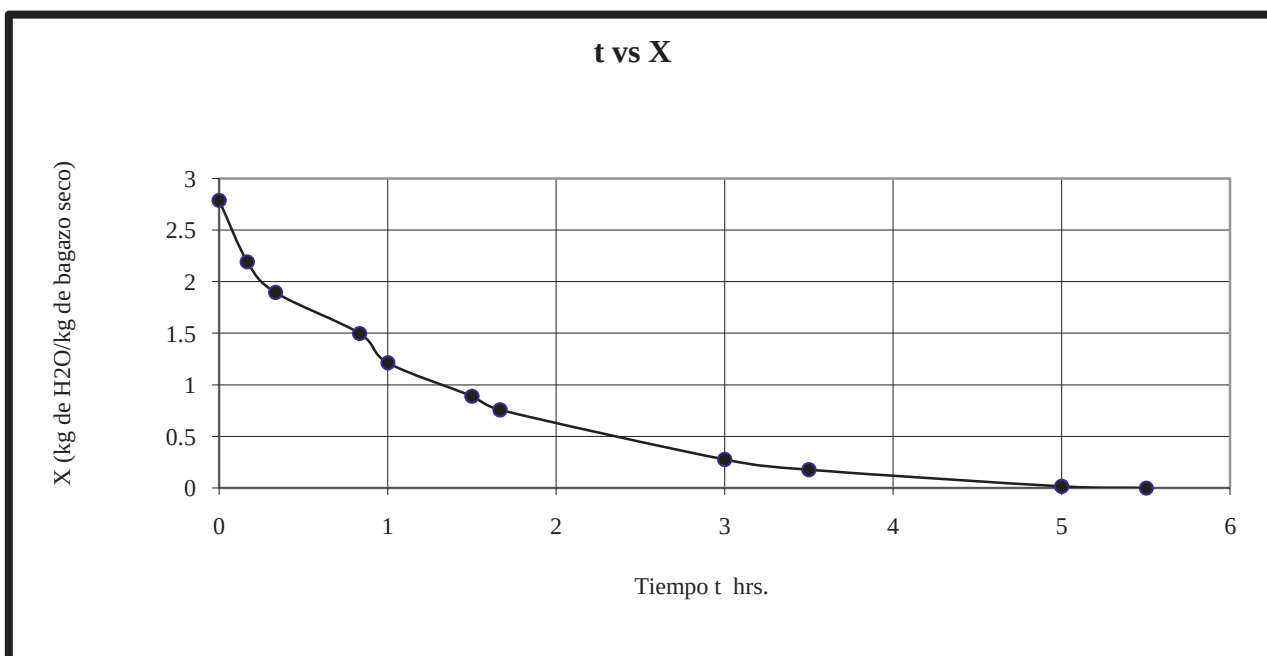


Figura 19. Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo t, para el experimento 3.

Con los datos de la tabla 17, se realizo una curva de velocidad de secado R, la cual se muestra en la figura 20.

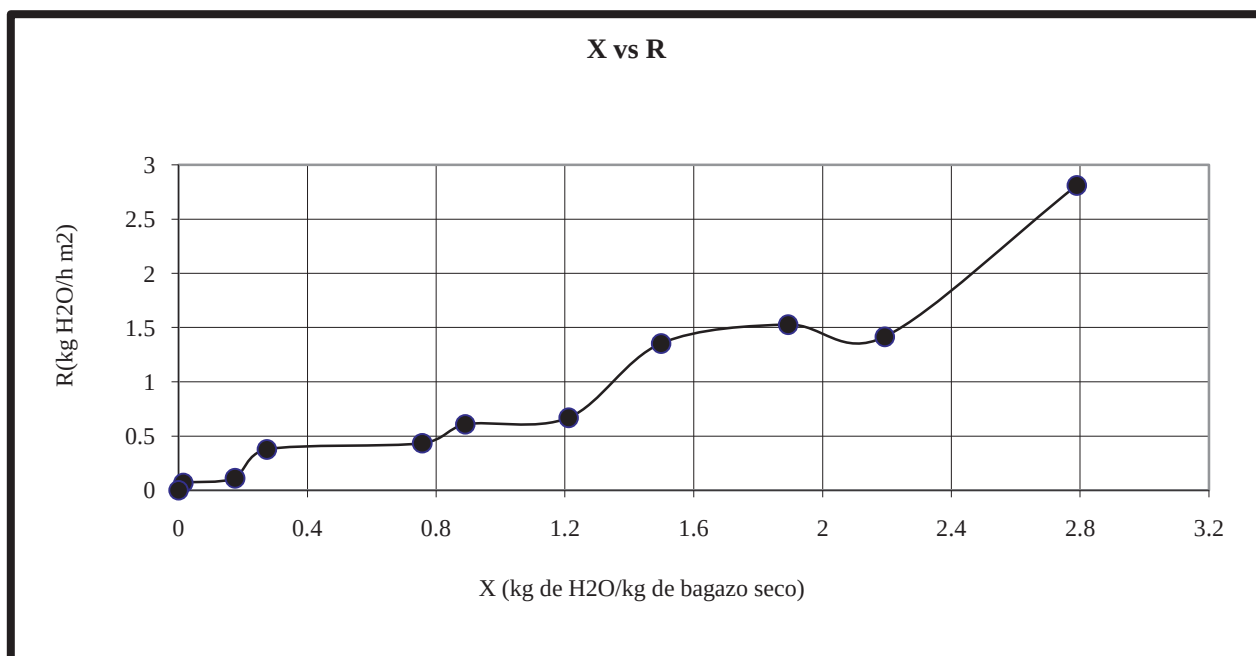


Figura 20. Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X, para el experimento 3.

Con los datos de la tabla 12, correspondientes al cuarto experimento se realizo una grafica de humedad libre en función del tiempo figura 21.

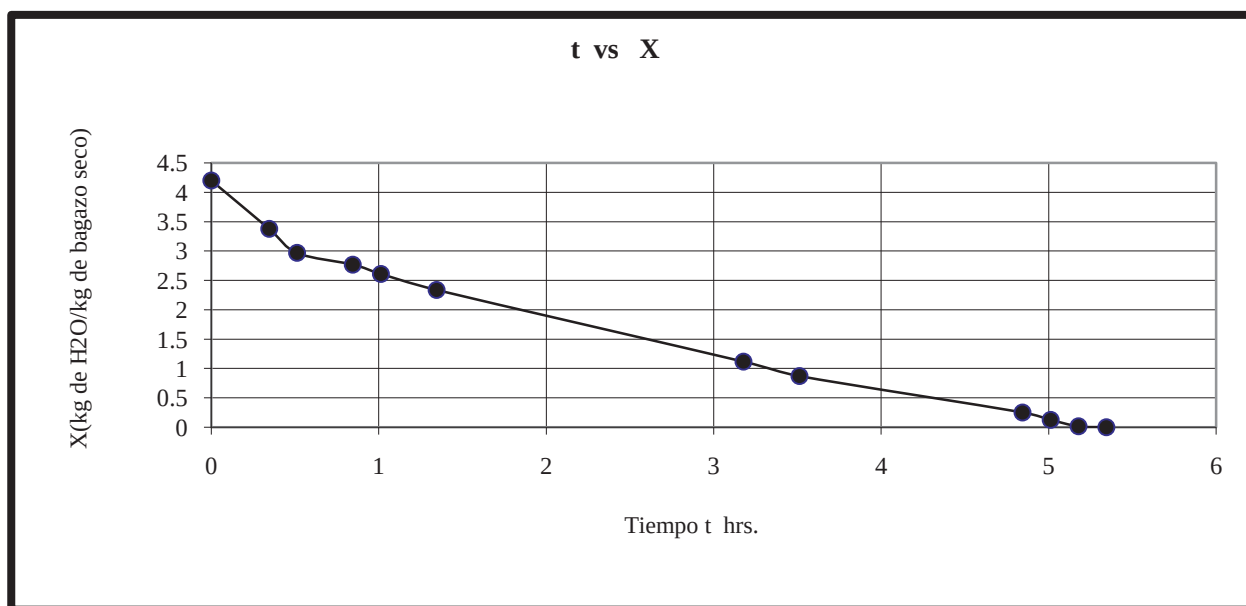


Figura 21. Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo t, para el experimento 4.

Con los datos de la tabla 18, se realizo una curva de velocidad de secado R la cual se muestra en la figura 22.

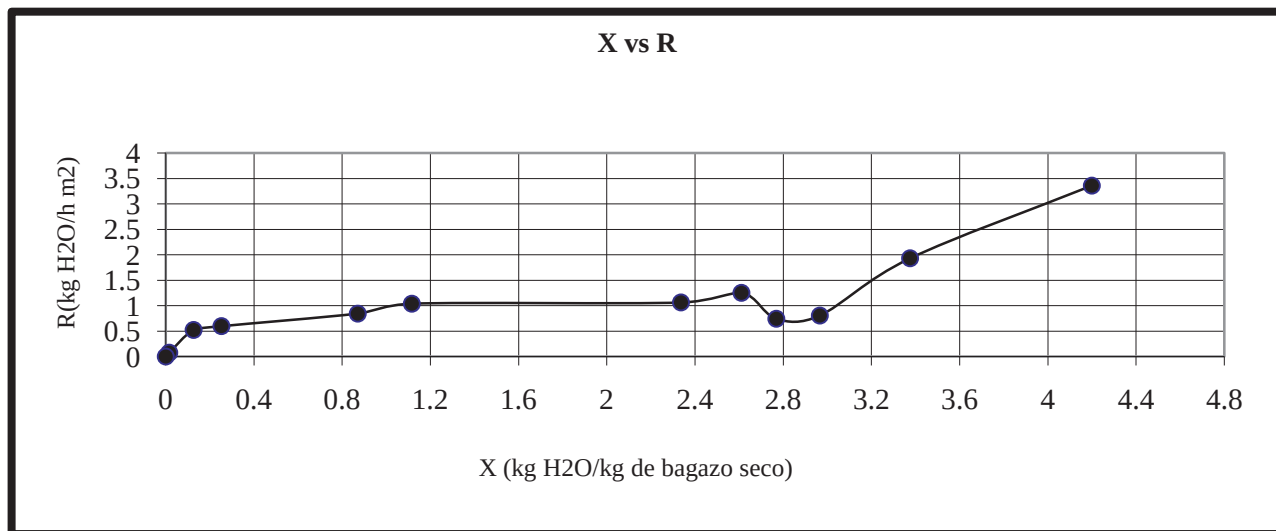


Figura 22. Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X, para el experimento 4.

Con los datos de la tabla 13, correspondientes al quinto experimento se realizo una grafica de humedad libre en función del tiempo figura 23.

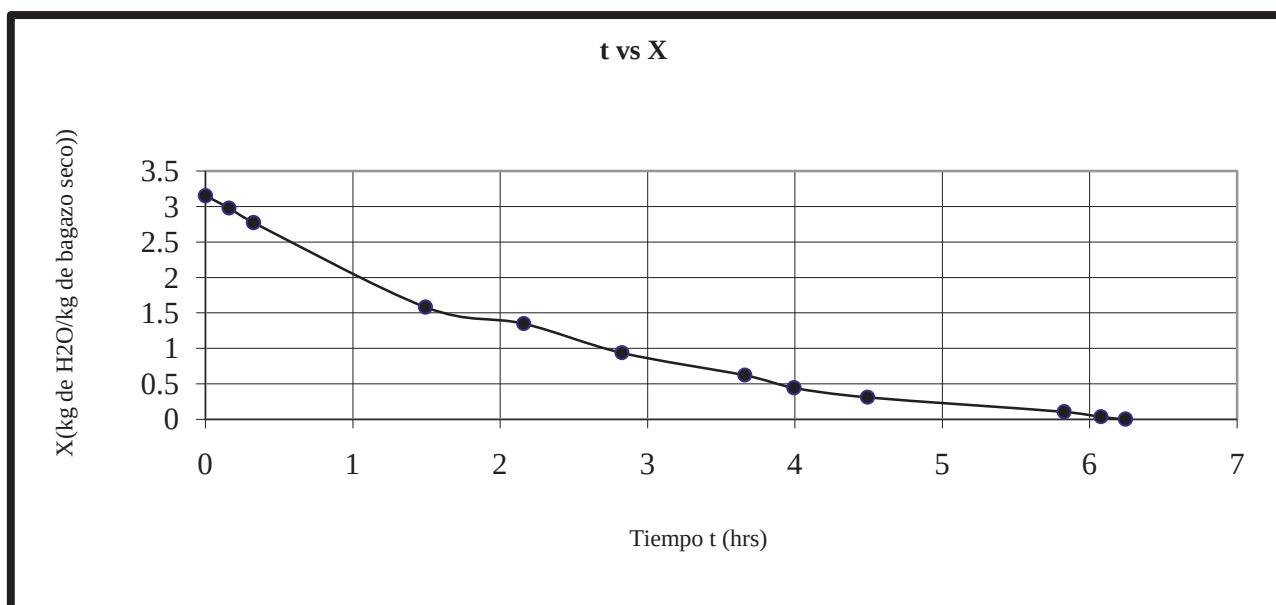


Figura 23. Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo t, para el experimento 5.

Con los datos de la tabla 19, se realizo una curva de velocidad de secado R la cual se muestra en la figura 24.

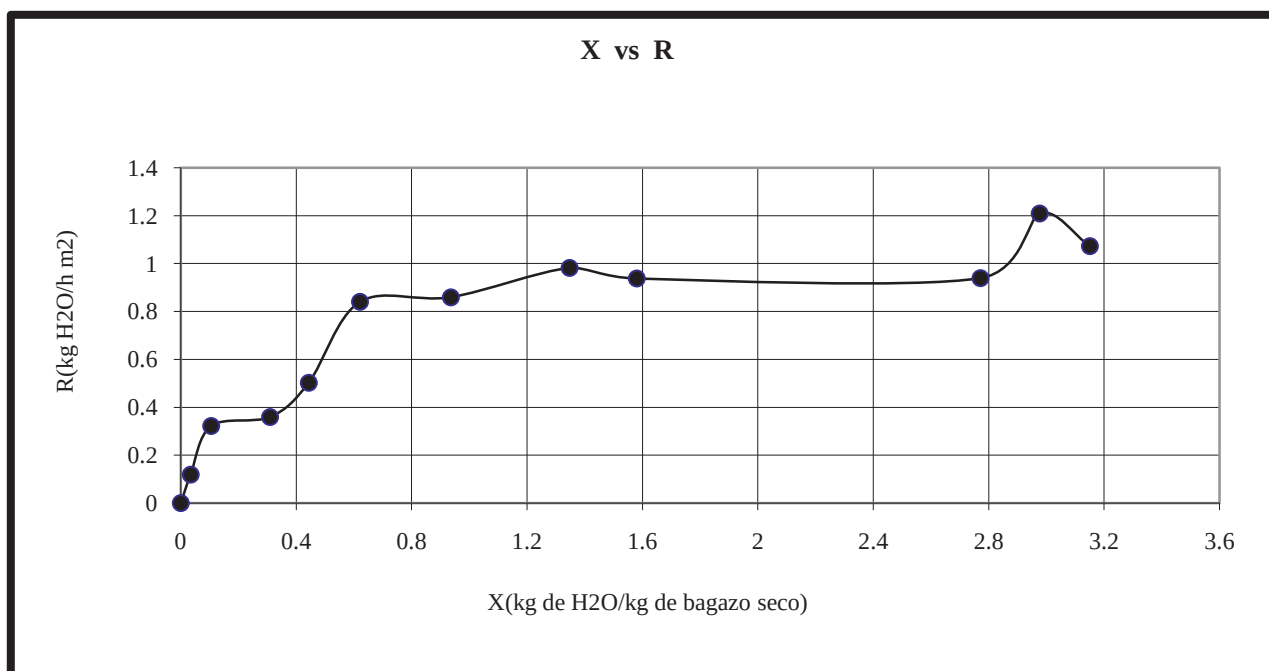


Figura 24. Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X, para el experimento 5.

Con los datos de la tabla 14, correspondientes al sexto experimento se realizó una gráfica de humedad libre en función del tiempo figura 25.

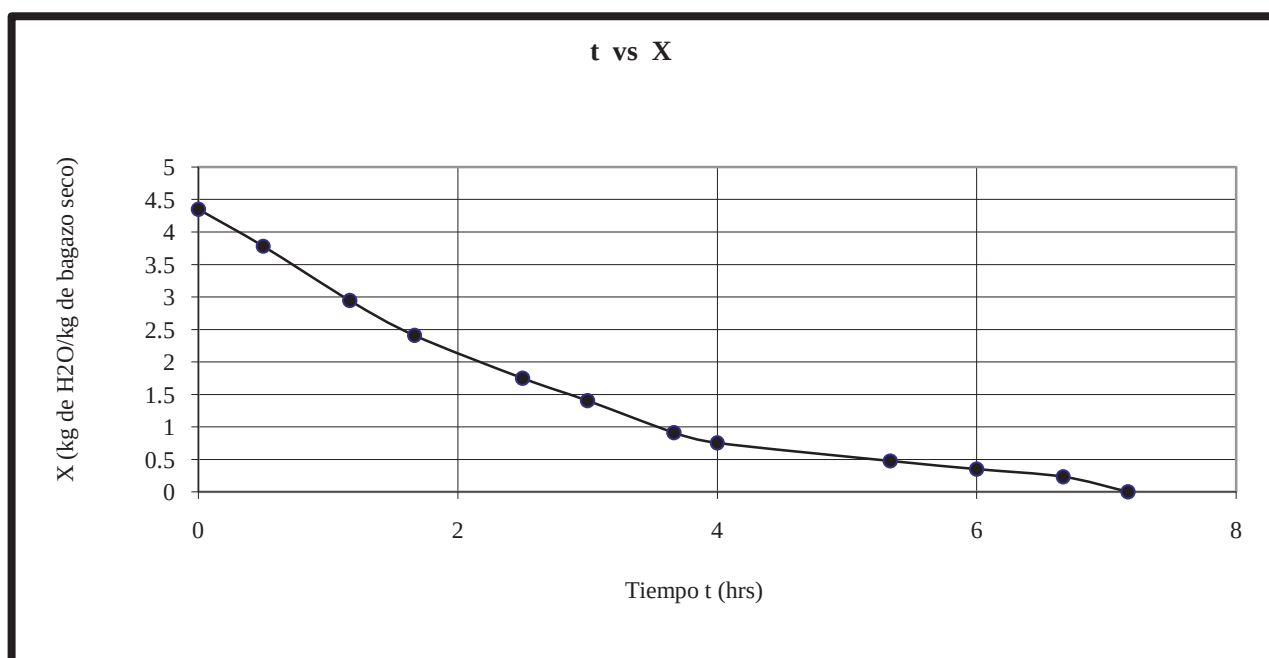


Figura 25. Humedad libre X del bagazo de caña en función del tiempo t, para el experimento 6.

Con los datos de la tabla 20, se realizó una curva de velocidad de secado R la cual se muestra en la figura 26.

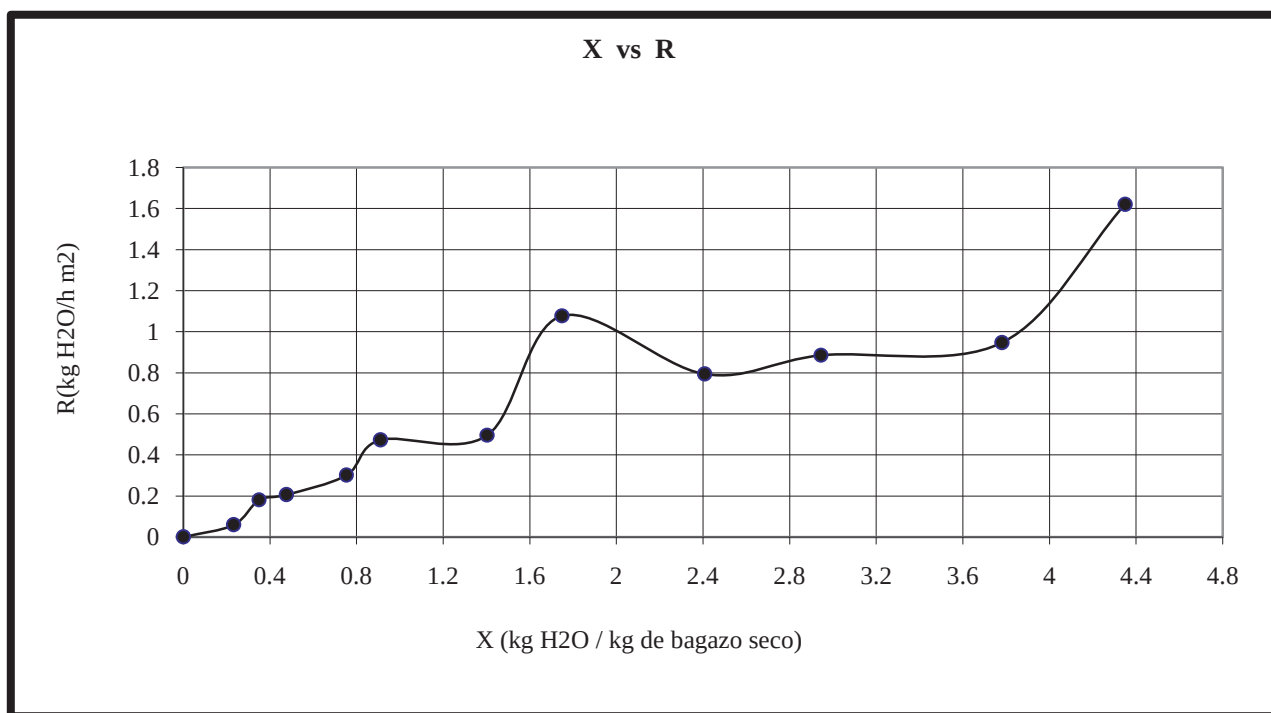


Figura 26. Curva de velocidad de secado R en función de la humedad libre X, para el experimento 6.

ESCALAMIENTO

En el siguiente ejemplo se muestra como se realiza un escalamiento del secador piloto tipo túnel de charolas, basándose en los resultados obtenidos de los seis experimentos realizados en el presente trabajo

Ejemplo: si se requiere secar 500 kg de bagazo, el cual contiene 50% de humedad en peso y se quiere reducir a un 30%. Determinar el área del secador.

De acuerdo a lo establecido tenemos como datos lo siguiente:

$L_s = 250$ kg de bagazo seco por lo que la humedad $(X_t)_1$ para las condiciones del 50% es:

$$(X_t)_1 = \frac{500 - 250}{250} = \underline{\underline{1 \text{ kg de agua / kg de bagazo seco}}}$$

Para determinar el segundo valor de $(X_t)_2$ se requiere conocer el peso del bagazo que existe al reducir la humedad al 30%, el cual se obtiene con la siguiente formula:

$$30\% = \frac{500 - Z}{Z} * 100 \quad \text{Despejando Z tenemos que :}$$

$$Z = \frac{500}{1.30} = 384.62 \quad \text{por lo tanto tenemos que } (Xt)_2 \text{ para estas condiciones es:}$$

$$(Xt)_2 = \frac{384.62 - 250}{250} = \underline{\underline{0.53848 \text{ kg de agua / kg de bagazo seco}}}$$

Con los valores de $(Xt)_1$ y $(Xt)_2$ calculados y con el valor de la humedad en equilibrio $X^* = 0.00236925$, tomada de la Tabla 8, se determina la humedad libre X_1 y X_2 .

$$X_1 = (Xt)_1 - X^* \quad \text{esto es:}$$

$$X_1 = 1 - 0.00236925 = \underline{\underline{0.99763075 \text{ kg de agua libre/ kg de bagazo seco}}}$$

$$X_2 = (Xt)_2 - X^* \quad \text{esto es:}$$

$$X_2 = 0.53848 - 0.00236925 = \underline{\underline{0.53611075 \text{ kg de agua libre/ kg de bagazo seco}}}$$

Con estos valores de humedad libre, se interpolaron los tiempos y la velocidad de secado R tomando los datos de la tabla 15, y los resultados fueron:

$$dt = 0.40283981$$

$$dX = 0.57142857$$

$$R = 11.1528313$$

Utilizando la siguiente ecuación:

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

$$A = \frac{-(250 \text{ kg de bagazo seco}) * (0.57142857)}{(11.1528313 \text{ kg de agua / h m}^2) * (0.40283981 \text{ h})} = 31.796875 \text{ m}^2$$

El área determinada es de **31.796875m²**.

Del mismo modo se hicieron los cálculos para determinar el área del secador, utilizando las condiciones de temperatura y velocidad de aire que se utilizaron en los experimentos. los resultados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Áreas obtenidas a las diferentes condiciones de temperatura y velocidad que se utilizaron en los seis experimentos efectuados.

T (° C)	v (m/s)	dt	dX	R	área (m ²)
60	1.00	0.40283981	0.57142857	11.1528313	31.796875
60	1.40	0.10841587	0.57142857	14.5041644	90.8482143
60	1.60	1.28847088	0.57142857	1.39477098	79.4921875
80	1.00	1.14826775	0.57142857	1.56507209	79.4921875
80	1.40	2.08442689	0.57142857	1.68321193	63.59375
80	1.60	1.33459264	0.57142857	0.86216591	79.4921875

CAPITULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

- El bagazo de caña es un material que puede utilizarse como combustible en diferentes aplicaciones de la Ingeniería Química, sin causar impactos ambientales, por que es renovable y no deforesta.
- Con los resultados obtenidos de cada uno de los seis experimentos realizados, es posible realizar un escalamiento del secador piloto de charolas tipo túnel a un secador del mismo tipo que cubra las necesidades requeridas para secar bagazo de caña, basándose en las curvas de velocidad de secado, es decir, que conociendo la cantidad de bagazo que se desea secar, el contenido de humedad que el bagazo tiene y a la cual se desea llegar, se puede determinar el área del secador y conocer el número total de charolas requeridas.
- Las condiciones de operación que mejor favorecen el secado del bagazo de caña son: del primer experimento con una temperatura de 60° C y una velocidad de aire de 1.00 m/s, ya que son los que dan como resultado un área mínima. Por lo que se sugiere trabajar con estas variables de temperatura y velocidad de aire para determinar el área optima del secador que cubra sus necesidades.

RECOMENDACIONES

Ahora que lo recomendable sería trabajar con las variables del experimento número dos que son: velocidad del aire 1.40 m/s y a una temperatura de 60° C ya que con estas condiciones el tiempo de secado es el óptimo, y considerando la parte *económica*, debido a que es más redituable secar en tiempos óptimos que con un secador de área óptima y tiempos prolongados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Foust A.S., Wenzel L.A., Clump C.W., Maus L. y Andersen L.B., (1975), "Principios de operaciones unitarias", CECSA, México.

Geankoplis C.J., (1998), "Procesos de transporte y operaciones unitarias", CECSA, México.

McCabe W.L., Smith J.C., y Harriot P., (2002), "Operaciones unitarias en ingeniería química", McGraw-Hill, Mexico.

Seader J.D. and Henley E.J., (2005), "Separation Process Principles", John Wiley & Sons, USA.

Treybal R. E., (1981), "Operaciones con transferencia de masa", McGraw-Hill. México.