



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Agrarias
Escuela de Ingeniería en Alimentos

Estandarización del Proceso de Secado de Carragenina en la Empresa Extractos Naturales Gelymar S.A

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Ciencia de los Alimentos

VALERIA DEL CARMEN VELÁSQUEZ VELÁSQUEZ

Valdivia – Chile

2007

PROFESOR PATROCINANTE:

Sr. Kong Shun Ah – Hen
Ingeniero en Alimentos, (Dipl. - Ing.; Dr.- Ing.)
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

PROFESOR COPATROCINANTE:

Sr. Patricio Morales Pino
Ingeniero Civil Químico
Extractos Naturales Gelymar S.A

PROFESOR INFORMANTE:

Sr. Erwin Carrasco Ruiz
Ingeniero Civil Químico
Instituto de Ciencias y Tecnología de los Alimentos

A, mis padres por su apoyo y gran esfuerzo, ya que gracias a ellos y a Dios fue posible hacer realidad este gran anhelo de formarse como profesional.....

AGRADECIMIENTOS

- Agradezco a la empresa Gelymar S.A, en especial al Sr. Patricio Morales por su apoyo y ayuda entregada en los aspectos técnicos y experimentales de este estudio.
- Al profesor Kong Shun Ah – Hen, por su disposición, ayuda y apoyo brindado en el desarrollo teórico de este trabajo.
- A aquellas personas del área de producción de la empresa Gelymar, que tuvieron la disposición de colaborar en el desarrollo práctico de este estudio.
- A mi familia, en especial a mis padres, hermanos, por su cariño y apoyo entregado en todo momento.
- A mi madrina Viola y primo José Miguel, por su apoyo entregado en los momentos en que más lo necesitaba.
- A amigas por el apoyo y colaboración entregada en todo momento.

INDICE DE MATERIAS

Capitulo		Página
1	INTRODUCCION	1
2	REVISION BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Carrageninas	2
2.2	Secado de los alimentos	3
2.3	Fundamento teórico de la operación de secado	5
2.4	Cinética de secado	5
2.3.1	Periodos de secado	6
2.3.2	Parámetros de proceso	7
2.3.3	Parámetros adimensionales	10
2.4	Estática del proceso de secado	12
2.5	Eficiencia del proceso de secado y sus parámetros de control	14
2.5.1	Temperatura de Alimentación del aire	15
2.5.2	Flujo de sólidos	15
2.5.3	Diferencial de temperatura en el aire	15
2.5.4	Temperatura de sólidos de alimentación	16
2.5.5	Aire y sus propiedades	16
2.5.5.1	Uso de la carta psicrométrica	16
2.6	Fluidización	17
2.6.1	Ventajas y desventajas de la fluidización	17
III	MATERIALES Y METODOS	19
3.1	Materiales	19
3.2	Metodología	20
3.2.1	Experimento clásico de cinética de secado	20
3.2.1.1	Ensayo en el laboratorio	20
3.2.1.2	Evaluación de resultados	21
3.2.2	Estática de secado	23
3.2.2.1	Levantamiento de datos	23
3.2.2.2	Evaluación de resultados	24

3.2.3	Estandarización de los parámetros operacionales para el proceso de secado	26
3.2.3.1	Levantamiento de datos	26
3.2.3.2	Determinación de los parámetros operacionales estándares	27
IV	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	29
4.1	Antecedentes generales	29
4.1.1	Descripción de la zona en estudio	29
4.1.2	Descripción del problema	29
4.2	Experimento clásico de cinética de secado	30
4.2.1	Curva de cinética de secado	31
4.2.2	Determinación de los parámetros de proceso	32
4.2.3	Determinación del modelo de secado	33
4.2.4	Superficie activa específica y coeficiente de vaporización	35
4.3	Evaluación de operación de secado bajo las condiciones reales de operación	36
4.3.1	Evaluación del tiempo de proceso	36
4.3.2	Comparación de la pérdida de humedad teórica y real	38
4.4	Control de la operación de prensado de carragenina precipitada	39
4.4.1	Influencia de humedad del producto en la operación de secado	39
4.4.2	Estandarización de las variables de control en la operación de prensado	40
4.5	Estática de secado	41
4.5.1	Análisis de flujo específico de aire y energía	41
4.5.2	Pérdidas energéticas	42
4.5.3	Estandarización de los parámetros operacionales de secado	43
4.5.3.1	Resultados obtenidos del levantamiento de datos	43
4.5.3.2	Determinación de los parámetros operacionales estándares	45
4.5.3.3	Parámetros estandarizados	46
5	CONCLUSIONES	51
6	RESUMEN	52

	SUMARY	53
7	BIBLIOGRAFIA	54
8	ANEXOS	56

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Ensayos de cinética de secado	20
2	Características de cada tratamiento o ensayo de cinética de secado	30
3	Registro de datos para determinar el estado del aire fresco para el ensayo cinético	31
4	Parámetros de caracterización del proceso determinados a partir de las curvas de secado	32
5	Características de secado y coeficiente de vaporización	35
6	Parámetros estadísticos del tiempo teórico de proceso	37
7	Parámetros estadísticos de la pérdida de humedad teórica y real	39
8	Costo energético según la humedad del producto a la salida de la prensa 2.	39
9	Parámetros estándares para la operación de prensado – prensa N°2	40
10	Resumen del estado del aire fresco utilizado en el proceso de secado	43
11	Resumen de los parámetros operacionales en extracto GWG	44
12	Resumen de los parámetros operacionales en extracto GMR	44
13	Condiciones promedios del estado del aire fresco	45
14	Condiciones del aire de salida para ambos extractos	45
15	Pérdidas de eficiencia evaporativa y energéticas en ambos extractos	45
16	Flujo específico de aire y energía para ambos extractos	45
17	Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GWG (humedad Producto de Salida 55 y 60%)	47
18	Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GWG (humedad Producto de Salida 65 y 70%)	48
19	Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GMR (humedad Producto de Salida 55 y 60%)	49
20	Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GMR (humedad Producto de Salida 65 y 70%)	50

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Fórmula química de cada tipo de carragenina	3
2	Curva típica de cinética de secado	9
3	Esquema psicrométrica para determinar flujo específico de calor ideal y real	25
4	Esquema psicrométrica para determinar flujo específico de aire ideal y real	26
5	Contenido de humedad en función del tiempo para todos los ensayos de cinética de secado	31
6	Modelo adimensional para los ensayos de secado de la carragenina Extracto GWG	34
7	Modelo de secado en el periodo de velocidad decreciente de secado	34
8	Correlación entre el coeficiente de vaporización y la humedad inicial	36
9	Tiempo teórico de secado utilizando el modelo adimensional y la velocidad máxima de secado	37
10	Comparación entre la pérdida de humedad teórica y real de los diferentes batch analizados	38
11	Relación entre el flujo específico de aire y calor para extracto GWG	41
12	Relación entre el flujo específico de aire y calor para extracto GMR	42
13	Curva que relaciona las pérdidas con el consumo de energía	42

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Diagrama de flujo del proceso de carragenina de ambas líneas de la planta	56
2	Pantalla del computador de control de la zona secado – molienda de la línea KCI	57
3	Datos registrados del ensayo cinético de secado	58
4	Datos de evaluación del tiempo de proceso bajo las condiciones reales de proceso	59
5	Datos de evaluación de la pérdida de humedad bajo las condiciones reales de proceso	60
6	Lotes monitoreados y analizados para cada extracto	61
7	Datos y curva que determina la relación frecuencia y flujo de producto prensado y pelletizado	62
8	Datos y curva que determina la relación frecuencia y caudal de aire impulsado por el ventilador	63
9	Datos y curva que relaciona la velocidad de la bomba de descarga del repulpador y el caudal de producto	64
10	Fotografía del Secador lecho fluidizado	65
11	Nomenclatura de términos utilizados en el desarrollo del estudio	66

1. INTRODUCCION

En la Empresa Extractos Naturales Gelymar S. A., se ha constatado en la línea *KCI* una alta variabilidad en el proceso de secado de la carragenina, lo que influye directamente en el contenido de agua del producto a la salida del secado y en los altos consumos de gas licuado. Como consecuencia de esto la productividad de la empresa es afectada, y se hace necesario realizar un estudio de cinética, para conocer las características de secado de este producto, además estudiar la estática de secado en el equipo, con el objeto de lograr una estandarización del proceso, contribuyendo a su optimización.

Objetivo General

- Estandarizar el control de proceso de la zona de secado bajo las condiciones actuales de operación de la línea *KCI*.

Objetivos Específicos

- Determinar la cinética y estática del proceso de secado de la carragenina en el extracto GWG
- Evaluar el proceso de secado en la línea de procesamiento de la carragenina, en el extracto GWG, utilizando el modelo cinético teórico y la estática de secado
- Confeccionar cartas de control de los parámetros operacionales del proceso de secado en la línea de procesamiento de la carragenina, extracto GWG y GMR

2. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1 Carrageninas

Las carrageninas son polisacáridos naturales presentes en ciertas variedades de algas rojas, capaces de formar coloides viscosos o geles, en medio acuoso. Químicamente las carrageninas son poligalactanos, polímeros lineales de moléculas alternadas de D-galactosa y 3,6 anhidro galactosa (3,6 AG) unidas por enlaces α -1,3 y β -1,4. Las moléculas de galactosa poseen grupos sulfato y/o piruvato, encontrándose generalmente como sales de sodio, potasio o calcio. El contenido y posición de los grupos sulfatos diferencian los 4 tipos de carragenina de importancia comercial, los cuales son:

- *Carragenina kappa I*: Esta carragenina es capaz de formar en agua, geles de alta fuerza que a la vez aporta moderada viscosidad. Tiene un alto poder de gelificación, y el uso a bajas dosis permite lograr la textura deseada del gel. Posee un contenido de ester sulfato entre 24 y 25 % y entre 35 y 40 % de 3,6 anhidro galactosa. Para su completa disolución necesita una temperatura de 75°C¹.
- *Carragenina kappa II*: Se extrae de algas rojas de aguas frías, y se caracteriza por su alta reactividad con proteínas lácteas, forma geles firmes y elásticos con moderada sinéresis. Aporta mayor viscosidad que la carragenina *kappa I* dado a su mayor peso molecular. Posee entre 25 y 28 % de ester sulfato y entre 32 y 34 % de 3,6 anhidro galactosa. Su completa disolución se produce a temperaturas cercanas a 70 °C¹.
- *Carragenina iota*: Se caracteriza por formar geles elásticos, termoreversibles y de muy baja sinéresis. La carragenina de este tipo requiere una temperatura de 65 °C para su completa disolución y aportan mayor viscosidad que las carrageninas *kappa II*. Posee un contenido entre 30 y 32 % de ester sulfato y entre 28 y 32 % de 3,6 anhidro galactosa¹.

¹ www.gelymar.com

- *Carragenina lambda*: Es la única fracción de las carrageninas que no necesita de altas temperaturas para su solubilización. Las carrageninas *lambda* esta compuesta aproximadamente de 35 % de ester sulfato y 0 % de 3,6 anhido galactosa, lo que le confiere una alta capacidad espesante y estabilizante.

En la práctica, los extractos son mezclas de los distintos tipos de carrageninas. Una carragenina del tipo *Kappa I* con menor proporción de carragenina *Kappa II* es el *Extracto GWG* de Gelymar, en cambio una carragenina tipo *Kappa II* y menor proporción de *Kappa I* es el *Extracto GMR*. Según el protocolo de innovación de Gelymar la primera se caracteriza por tener una baja viscosidad con fuerza de gel alta y la última por tener una viscosidad y fuerza de gel media, en general los extractos de esta línea son caracterizados por su fuerza de gel.

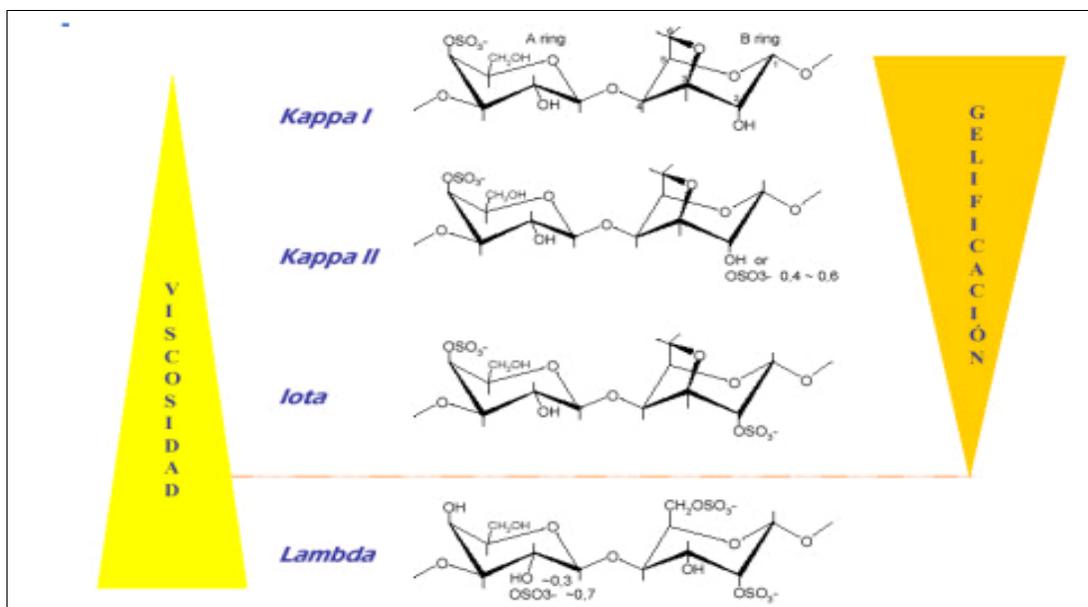


FIGURA 1. Formula química de cada tipo de carragenina

2.2 Secado de los alimentos

Según lo señalado por Doymaz y Pala (2003), citados por VEGA et al. (2005), son ampliamente conocidas las ventajas de los alimentos deshidratados ya que al reducir el contenido de humedad de ellos se previene el crecimiento de microorganismos y se

minimizan las demás reacciones que los deterioran. Según lo señalado por Jarayaman y Das Gupta, (1995), citado por VEGA et al. (2005), también el secado de los alimentos reduce su volumen y peso lo que influye en una reducción importante de los costos de empaque, almacenamiento y transporte. Los productos secos además permiten ser almacenados a temperatura ambiente por largos períodos de tiempo.

El agua en el alimento no se encuentra pura, sino que está formando parte de disoluciones de sólidos, geles y de emulsiones, o ligada de diversos modos, a los constituyentes sólidos. Los tejidos vegetales, como los de animales, son de naturaleza celular, la cual influye sobre su comportamiento durante el secado. El agua se elimina de los alimentos por medio del proceso de difusión a través de la estructura interior del alimento sólido. El movimiento del agua líquida es seguido por la evaporación de la misma en algún punto del alimento, para lo cual es necesario el calor, por lo tanto, el proceso de secado es en sí un transporte simultáneo de masa y calor.

Movimientos de solutos: El agua líquida que fluye hacia la superficie durante el secado forma parte de una disolución de varios compuestos. El desplazamiento de algunos compuestos solubles se ve dificultado por las paredes celulares, que actúan como membranas semipermeables (BRENNAN et al., 1998).

Retracción: En los primeros momentos de secado, los cuales ocurren a bajas velocidades, la cuantificación de la retracción se relaciona con la cantidad de agua eliminada. Hacia el final del secado, la retracción es cada vez menor, de modo que el tamaño y las formas finales del producto se alcanzan antes de terminar el secado. La retracción de los alimentos durante el secado puede influir sobre la velocidad de secado, debido a los cambios en el área de la superficie de secado y la generación de gradientes de presión al interior del producto (BRENNAN et al., 1998).

Formación de costra: Es la formación de una película impermeable y dura que frena el secado. Aunque se desconoce el mecanismo exacto, es probable que esté influido por múltiples factores, entre lo que pueden encontrarse la migración de sólidos solubles a la superficie y las elevadas temperaturas que se alcanzan en ella, hacia el

final del secado, que inducen complejos cambios físicos y químicos en la capa superficial (BRENNAN et al., 1998).

2.3 Fundamento teórico de la operación de secado

El secado es un fenómeno complejo que involucra la transmisión de calor para evaporar el líquido y el transporte de masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor desde la superficie hacia el aire.

En la industria, el secado se puede realizar por transferencia de calor por convección, conducción, radiación o una combinación de estos (PERRY, 1992).

El control del proceso de secado de una partícula dependen de:

- La estructura del producto por secar y de los parámetros de secado, tales como la temperatura, la velocidad y la humedad relativa del aire.
- El contenido de agua del producto por secar.
- Las dimensiones del producto por secar.
- La superficie expuesta a la velocidad de transferencia
- El contenido de agua de equilibrio del producto por secar².

Como existe transferencia de masa y calor, el mecanismo del secado depende de la naturaleza del material a secar y el método de contacto entre el sólido y el fluido de secado. Existen tres tipos de sólidos: cristalinos, porosos y no porosos. Las partículas cristalinas no contienen líquido en su interior y el secado ocurre solamente en la superficie del sólido. Los sólidos verdaderamente porosos contienen líquido en el interior de los poros. Los sólidos no porosos comprende geles coloidales, sólidos celulares densos y, muchos otros materiales poliméricos (McCABE et al., 1991).

2.4 Cinética de secado

La cinética de secado de un material relaciona la variación del contenido de agua del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo. Son varios los factores que influyen sobre la cinética, entre los cuales se encuentran; la humedad del aire de secado, el mismo contenido de agua del producto por secar, como también las dimensiones y diseño del equipo de secado.

² www.sc.ehu.es/nmwmiga/secadero.htm

A partir de curvas de cinética de secado, que pueden ser obtenidas a nivel de laboratorio, puede hacerse 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, etc³.

Generalmente al modelar un proceso de secado se presupone las siguientes condiciones:

- La forma y el tamaño de la superficie activa de intercambio se consideran constantes.
- Al inicio del proceso, el sólido tiene el mismo contenido de agua inicial en cualquier punto, presentando una homogeneidad en la distribución de agua en la matriz sólida.
- Los coeficientes de transferencia de calor y masa se mantienen constantes durante el proceso de secado.
- En la interfase el sólido y el aire están en equilibrio³.

2. 4.1 Periodos de secado. El proceso de secado se caracteriza por dividirse en tres fases: fase inicial de precalentamiento, fase de velocidad de secado constante, y una fase de velocidad de secado decreciente.

Precalentamiento: Este es un periodo de “estabilización” en que se equilibran las condiciones de la superficie del sólido y el aire de secado. En general, el tiempo de esta fase es despreciable en comparación con el ciclo completo (BRENNAN et. al., 1998). Al principio el producto se encuentra frío, o sea, con una baja presión de vapor, lo que hace que exista una baja velocidad de transferencia de masa. Por el contrario, hay una gran diferencia de temperatura entre el aire y el producto, lo que hace que la transferencia de calor sea alta (POTTER y HOTCHKISS, 1995).

Fase de velocidad de secado constante: La velocidad depende sólo de las condiciones externas, queda constante debido a que se transporta tanto líquido desde

³ www.monografias.com

el interior que la capacidad de vaporización de superficie se usa totalmente. La superficie del sólido se mantiene saturada, gracias al flujo de agua desde el interior del sólido hacia la superficie. Ocurre el desplazamiento del vapor desde la superficie saturada hacia una capa de aire estático, y luego hasta la corriente de aire principal. En esta fase la velocidad de transferencia de calor se equilibra con la transferencia de masa, de forma que la temperatura de superficie se mantiene constante (BRENNAN et al., 1998). La evaporación se produce hasta la temperatura de bulbo húmedo del aire. Este periodo perdura hasta que haya migración de líquido desde el interior, siendo el principal mecanismo de transporte de masa el flujo capilar de agua, aunque puede existir alguna difusión de líquido. El mecanismo interno de flujo de humedad no afecta la velocidad de secado en este periodo, es el entorno secante, el aire, el que impone la velocidad de secado que se incrementa con el aumento de temperatura. Lo mismo ocurre con la velocidad del aire de secado, si este es mayor también lo será la velocidad de secado (POTTER y HOTCHKISS, 1995).

Los factores que controlan el secado durante el periodo de velocidad constante son: el área de superficie de secado, la diferencia de temperatura, o contenido en agua, entre el aire y la superficie de desecación y los coeficientes de transmisión de calor y masa (BRENNAN et al., 1998).

Fase de velocidad decreciente: Esta fase comienza cuando se alcanza la humedad crítica. La zona de evaporación que en la etapa anterior era en la superficie ahora se desplaza hacia el interior del producto. La brusca reducción de la superficie efectiva de transferencia, una alimentación insuficiente de agua libre es la causa de la disminución de la velocidad de secado (POTTER y HOTCHKISS, 1995). A partir del punto de humedad crítica o inicio del periodo de velocidad decreciente, la temperatura de la superficie comienza a elevarse, elevación que continua a lo largo del secado, hasta aproximarse a la temperatura de bulbo seco del aire, que es el momento en que el producto se acerca a la sequedad (BRENNAN et. al, 1998).

2.4.2 Parámetros de proceso. Es importante definir los parámetros de proceso necesarios para realizar la evaluación correspondiente. En la FIGURA 2 se representan gráficamente los parámetros básicos.

Humedad promedio (\bar{X}): Con la pérdida de peso en el tiempo se puede calcular la humedad promedio, \bar{X} , como la masa de agua por unidad de masa del sólido seco en función del tiempo de secado, como se muestra en la FIGURA 2.

$$\bar{X} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (2.1)$$

Punto crítico (t_{cr}): A partir del gráfico que se muestra en la FIGURA 2 se puede obtener el punto crítico. Para la determinación del punto crítico se puede utilizar un método gráfico numérico, tomando los primeros valores de la curva de secado y aplicando el método de regresión lineal. Los valores de la curva que se ajustan a la recta con valor del coeficiente de correlación cercano a uno corresponden al periodo de velocidad constante de secado. El punto crítico es el punto donde termina la recta del periodo de velocidad constante y se inicia el segundo período de secado a velocidad decreciente (CUVERTINO, 2004).

Humedad de equilibrio (\bar{X}^*): Para un aire con humedad relativa definida, el contenido de agua del sólido que sale del secador no puede ser inferior al contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad del sólido que entra (McCABE et al, 1991). La curva de secado sigue generalmente un curso asintótico hacia el final del proceso, lo que permite determinar la humedad de equilibrio. En este punto se termina el proceso de secado convectivo.

Constante de tiempo W Se puede definir además un parámetro del tiempo, conocido como la *constante del tiempo*, la cual corresponde a la razón entre la capacidad máxima de secado y la velocidad máxima de proceso. Este parámetro es también un tiempo ficticio utilizado para caracterizar el proceso de secado de un producto. Es el tiempo que demoraría el proceso de secado desde el inicio del ensayo en condición estacionario hasta alcanzar la humedad de equilibrio, si la velocidad de secado fuese constante en todo el proceso (CUVERTINO, 2004). En la FIGURA 2 se puede apreciar la recta de extrapolación para obtener la constante del tiempo.

$$t^* = \left(\frac{\bar{X}_0 - \bar{X}^*}{\bar{X}_0 - \bar{X}_{cr}} \right) t_{cr} \quad (2.2)$$

$$t^* = \frac{\bar{X}_0 - \bar{X}^*}{(d\bar{X}/dt)_0} = \frac{\text{capacidad máxima de secado}}{\text{velocidad máxima de proceso}} \quad (2.3)$$

Humedad crítica (\bar{X}_{cr}): No es una propiedad del alimento, sino que depende del tamaño de la partícula y de las condiciones de secado. Generalmente la etapa de velocidad de secado constante finalizará cuando alcance la *humedad crítica*. Por lo tanto, en la curva de secado este periodo se deberá ajustar a una recta (la humedad crítica coincide con el punto, en que la recta ajustada se separa de la curva de secado) (POTTER y HOTCHKISS, 1995).

Este punto marca el instante en que el agua en estado líquido, el cual se encuentra en la superficie del sólido, se hace insuficiente para mantener una película continua que recubra toda el área de secado (McCABE et al, 1991).

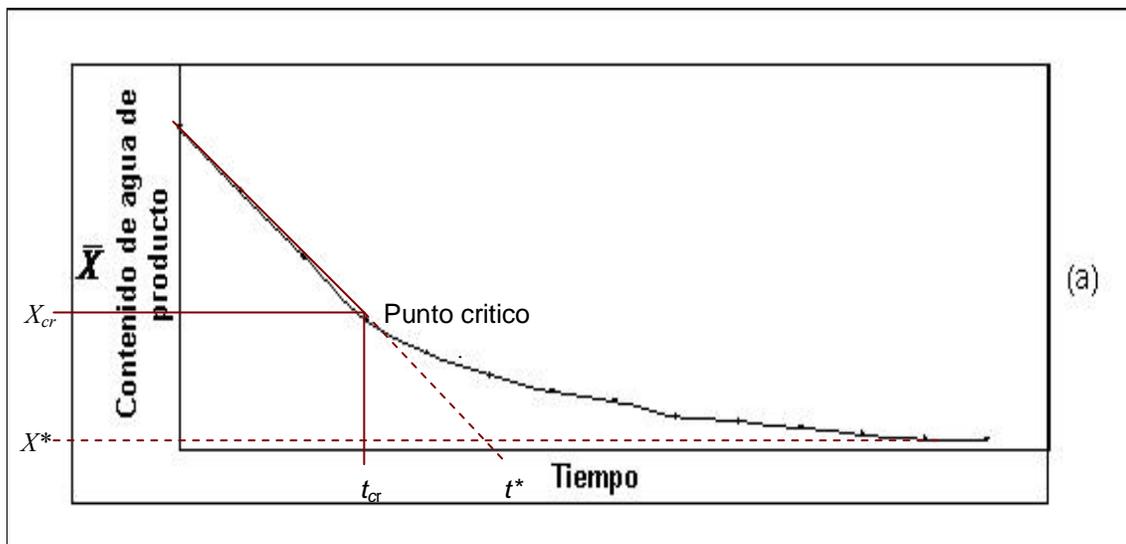


FIGURA 2. Curva típica de cinética de secado

Velocidad de secado constante: Esta velocidad se caracteriza por ser independiente del contenido de humedad. En ausencia de radiación o transmisión de calor por conducción a través del contacto directo del sólido con superficies calientes, la

temperatura del sólido durante el periodo de velocidad constante es la temperatura húmeda del aire (McCABE et al., 1991). La velocidad de secado se puede representar como:

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = \sigma \frac{A}{M_s} (\bar{Y}_p - \bar{Y}) \quad (2.4)$$

Siendo σ : coeficiente de vaporización (kg aire/m² s)

A/M_s : superficie activa específica (m²/kg)

Velocidad máxima de secado $(d\bar{X}/dt)_0$: La velocidad máxima de secado corresponde a la máxima cantidad de agua evaporada respecto a su cantidad de masa seca por tiempo de secado, es decir la capacidad máxima de proceso por tiempo de secado.

Velocidad máxima de secado, $(d\bar{X}/dt)_0 = \frac{\bar{X}_0 - \bar{X}^*}{t^*} \quad (2.5)$

Coficiente de vaporización (σ) **y superficie activa específica** (A/M_s): Para evaluar la operación de secado real, a través de la velocidad de secado constante y el modelo de secado adimensional, es necesario determinar el coeficiente de vaporización y la superficie activa específica. El coeficiente de vaporización se puede determinar a través de la ECUACIÓN 2.4.

Fuerza impulsora: La fuerza impulsora del movimiento del vapor a través de la delgada capa de aire estático es el gradiente de presión de vapor de agua entre la superficie en desecación y la corriente principal del aire de secado (BRENNAN et al, 1998). Se puede caracterizar también como la diferencia de concentración de humedad entre la superficie de la interfase y el núcleo del flujo.

2. 4.3 Parámetros adimensionales. En la evaluación de un proceso de secado es necesario considerar condiciones de operación estandarizadas para posibilitar la comparación de ensayos con distintos contenidos de agua de los productos por secar y

distintas humedades del aire de secado. Para estandarizar la humedad del sólido por secar se define una humedad estándar con respecto a la capacidad de secado del producto.

Humedad estándar: Este parámetro considera la variación de humedad con respecto a la variación máxima de la humedad en el ensayo. En el periodo de velocidad decreciente la humedad puede variar desde la humedad en el punto crítico hasta la humedad de equilibrio. La diferencia entre la humedad en el punto crítico y la humedad de equilibrio corresponde a la cantidad máxima de humedad que puede ser eliminada en el proceso (CUVERTINO, 2004). Este valor se utiliza de referencia, y permite evaluar el comportamiento de un tipo de producto con humedades iniciales diferentes. Se define como lo indica la siguiente ecuación:

$$\bar{u} = \frac{\bar{X} - \bar{X}^*}{\bar{X}_{cr} - \bar{X}^*} \quad (2.6)$$

Tiempo estándar: En el segundo período de secado con velocidad decreciente, el tiempo necesario para una reducción constante en la humedad del producto varía durante el proceso. A menor velocidad de secado, mayor será el tiempo de secado para la eliminación de una misma cantidad de humedad. Por tanto, en la modelación del proceso de secado es conveniente relacionar el tiempo absoluto de secado con la constante de tiempo, el cual depende de la velocidad máxima de secado. Se obtiene así un parámetro de tiempo, en el cual se relativiza el tiempo en función de la misma velocidad de secado (CUVERTINO, 2004). El tiempo adimensional para el proceso de secado en el periodo de velocidad decreciente se define en la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{t}{t^* - t_{cr}} \quad (2.7)$$

Humedad estándar del aire de secado. Para el proceso de secado, la humedad del aire de secado es un parámetro muy importante, ya que define un potencial de secado del aire. Se define la humedad estándar del aire de secado con respecto a la humedad de saturación a la temperatura de operación. Si en cualquier instante durante el proceso de secado, a una temperatura de entrada T_E y humedad Y_E y una temperatura

de salida T_S y humedad Y_E , la cual correspondería a la temperatura de saturación de aire, se tiene una humedad, Y , del aire, se puede definir esta humedad, η , con respecto a la humedad total que puede absorber el aire de secado, como lo indica la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Y - Y_E}{Y_S - Y_E} = \frac{T_E - T}{T_E - T_S} \quad (2.8a)$$

En esta ecuación se puede entrever que la humedad máxima que puede lograr el aire de secado es 1, y con este valor el potencial de secado del aire vuelve a cero. Por lo tanto, para el proceso el potencial de secado del aire, ε , se define según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 1 - \eta \quad (2.8b)$$

2.5 Estática del proceso de secado

La estática de secado evalúa el proceso de secado a través de balances de masa y energía en determinados instantes sin considerar la velocidad del proceso. Ayuda a determinar si existen pérdidas y estimarlas, para que en consecuencia se tomen las decisiones correspondientes. A continuación se indican los balances de masa y energía:

Balance de masa:

$$M_{A,in} + M_{B,in} + M_{c,in}(1 + Y_1) = M_{A,out} + M_{B,out} + M_{c,out}(1 + Y_2) \quad (2.9a)$$

Balance de entalpía:

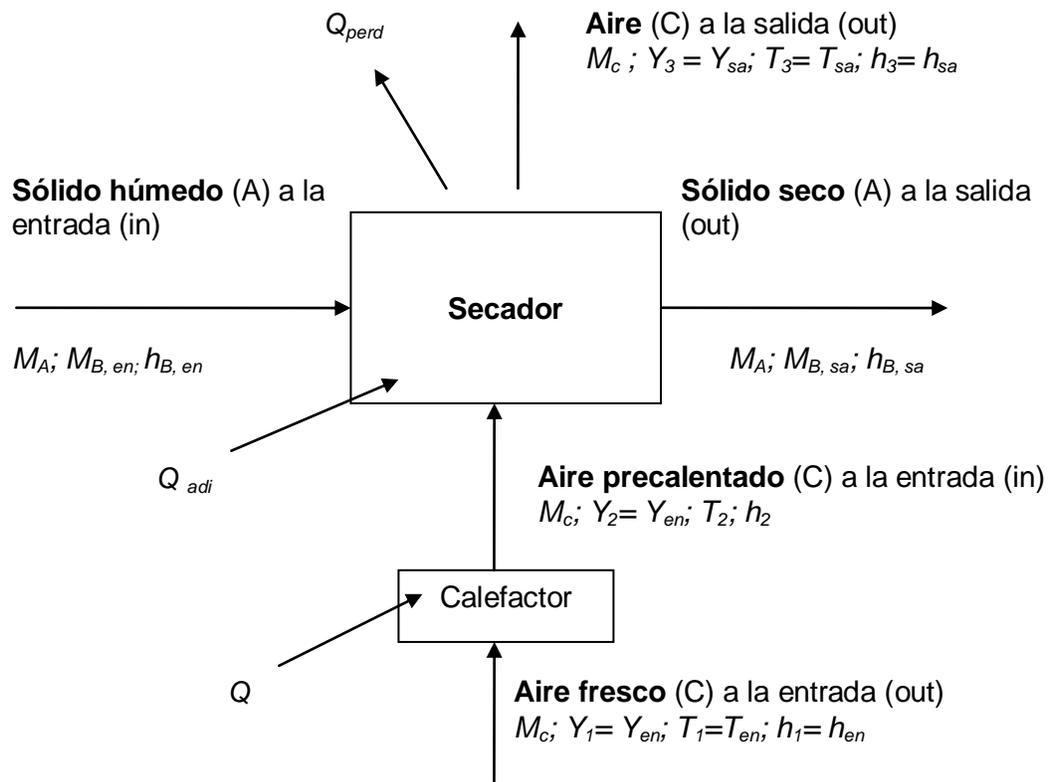
$$(M_A h_A + M_B h_B)_{in} + M_{C,in} h_1 + Q + Q_{adi} = (M_A h_A + M_B h_B)_{out} + M_{C,out} h_3 + Q_{perd} \quad (2.9b)$$

Donde los subíndices son: A sólido, B agua y, C aire.

Y : humedad del aire

h : entalpía

Q : flujo de calor



En el caso del secador ideal se consideran las siguientes suposiciones:

- Se considera sólo la energía térmica.
- El aire se calienta sólo en el precalentador; no hay flujo adicional de calor en el secador.
- Se desprecian las pérdidas de energía.
- La entalpía del sólido y de la instalación no cambia durante el proceso de secado.
- La entalpía de la humedad libre es despreciable en comparación con la entalpía de vaporización.

Considerando un flujo de masa constante para el sólido (A) y el aire (C)

$$\text{Sólido } M_{A, in} = M_{A, out} = M_A = \text{Constante}$$

$$\text{Aire } M_{C, in} = M_{C, out} = M_C = \text{Constante}$$

De acuerdo a las consideraciones anteriores se tiene:

Flujo específico de calor

$$\frac{Q}{M_B} = \frac{h_1 - h_3}{Y_1 - Y_3} \quad (2.10)$$

Flujo específico de aire

$$\frac{M_C}{M_B} = \frac{1}{Y_3 - Y_1} \quad (2.11)$$

2.6 Eficiencia del proceso de secado y sus parámetros de control

En términos prácticos, la eficiencia del proceso de secado expresa la cantidad de calor necesario para producir una unidad de producto seco con una humedad definida o bien la cantidad de calor por unidad de agua evaporada. A continuación se indican las formas de medir la eficiencia de un secador:

Eficiencia térmica. Es dependiente de la temperatura de operación y en términos generales se define como la “cantidad de calor que se ocupa en la evaporación en relación a lo generado”⁴. Es decir:

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{calor necesario para la evaporación}}{\text{calor suministrado}}$$

Eficiencia térmica global. Se define como la “fracción total de calor suministrado al secador en relación al calor usado en el proceso”⁴.

La recuperación de calor es una alternativa para reducir en forma considerable el consumo de calor, reincorporando el aire que expulsa el secador a la corriente de aire que ingresa al ventilador o al quemador, ya que este, muchas veces tienen una escasa saturación y se encuentra caliente (50 °C). Esto logra una mayor eficiencia térmica en el secador.

4

<http://200.13.98.241/~rene/separacion/manuales/psneu.pdf#search=%22secado%20por%20transporte%20neumatico%22>

El aislamiento de las paredes es muy importante para evitar las pérdidas de calor debido a que entre las razones por las que se producen este tipo de pérdidas se encuentran la convección y radiación a través de las paredes del equipo de secado. Este problema ocurre mayormente cuando el secador está situado en un ambiente frío. Algunos modelos de secadores modernos, tienen muy escasas pérdidas por estas razones⁵.

Eficiencia evaporativa. Se define como la relación entre la “capacidad de evaporación real con la capacidad que se obtendría en el caso que el aire de salida hubiese llegado hasta la saturación”⁴.

2.5.1 Temperatura de alimentación del aire. Un incremento de esta variable disminuye los requerimientos de calor por parte del secador para un flujo dado. Estudios han comprobado que al aumentar la temperatura del aire se reduce el consumo específico de energía. Cuando se quiere aumentar la capacidad de secado y su eficiencia, unas de las alternativas es aumentar la temperatura del aire, ya que de esta forma se reduce la humedad relativa del aire que se adquiere⁶.

2.5.2 Flujo de sólidos. Para lograr una óptima utilización del calor se requiere alimentar el máximo de flujo de sólidos secos posible. Esto significa que se tiene que disminuir al máximo la humedad del flujo de producto que ingresa a la operación de secado⁶.

2.5.3 Diferencial de temperatura en el aire. A mayor diferencial de temperatura entre la entrada y la salida, menor será el requerimiento de calor para producir una unidad de producto con una humedad constante. Esto se puede lograr aumentando la temperatura del aire de entrada o disminuyendo la temperatura del aire de salida, no siendo esta última la más eficaz ya que el producto saldría muy húmedo⁶.

⁵ www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S00.htm

⁶ <http://200.13.98.241/~rene/separacion/manuales/psneu.pdf#search=%22secado%20por%20transporte%20neumatico%22>

2.5.4 Temperatura de sólidos de alimentación. Un aumento de esta variable reduce la cantidad de calor para producir una unidad de sólidos secos. Una de las alternativas para aumentar la eficiencia de un secador es precalentando el producto que ingresa. Ya que se necesita una cierta cantidad de energía para aumentar la temperatura del producto, por lo que si llega al secador con una mayor temperatura se acelera el proceso de secado⁵. Pocas veces se utiliza este método para aumentar la eficiencia debido al alto costo y posibilidad de descomposición de los sólidos⁶.

2.5.5 Aire y sus propiedades: El aire atmosférico está constituido por una mezcla de gases, de los cuales en mayor proporción se encuentran el nitrógeno, el oxígeno y el vapor de agua. Para el caso del secado interesa fundamentalmente considerar al aire húmedo como una mezcla de sólo dos componentes, el **aire** y el **vapor de agua**. Esta mezcla tiene una cantidad de vapor de agua limitada, ya que cuando el aire contiene el máximo de vapor, se alcanza un estado de saturación, por lo que al agregarle éste en forma adicional, condensará.

Cuando un sólido se pone en contacto con aire de humedad inferior a la contenida por el sólido, dada por la curva de humedad de equilibrio, el sólido comienza a perder humedad hasta alcanzar la humedad de equilibrio con el aire (McCABE et al., 1991).

2.5.5.1 Uso de la carta psicrométrica. Se usa para diseñar secadores de convección, determinar en forma rápida y simple los parámetros de estado (T , Y , HR , h) y representación clara del cambio de estado del aire húmedo. A continuación se indican las definiciones utilizadas en la carta psicrométrica:

Humedad absoluta del aire. Es la masa de agua que contiene una unidad de masa del aire seco y se mide generalmente en kg de agua por kg de aire seco.

Humedad relativa del aire. Es una relación entre la masa de vapor de agua que contiene el aire a una determinada temperatura y la que es capaz de contener, si estuviera saturado a esa misma temperatura. Su valor, medido en porcentaje, varía del 0 % al 100 % que corresponde al estado de saturación. La evaporación máxima se da cuando el aire a la salida logra alcanzar su estado de saturación. Pero en la práctica

esto no es posible, aunque en los casos en que los sólidos se encuentran muy húmedos el aire sale casi en su estado de saturación⁷.

Temperatura bulbo húmedo. Esta temperatura se mide a través de un termómetro, cuyo bulbo es envuelto con un paño empapado en agua, por lo que la temperatura de bulbo húmedo se define como el efecto de rebajar la temperatura que se produce al absorber el calor por evaporación del agua. Cuanto menor es la humedad relativa del aire más rápidamente se evapora el agua del paño.

Temperatura bulbo seco. Ésta corresponde a la temperatura que prescinde de la radiación calorífica de los objetos que rodean el ambiente y de los efectos de la humedad relativa y de la velocidad del aire.

2.7 Fluidización

La fluidización se basa en el principio de suspensión de partículas, donde se hace pasar un flujo ascendente de un fluido a través de un lecho de sólidos. Cada partícula es rodeada por el medio fluidizante (gas o líquido), lo cual favorece los mecanismos de transferencia (Urrutia, 2006).

2.7.1 Ventajas y desventajas de la fluidización

Según KUNI (1968), citado por URRUTIA (2006), el lecho fluidizado tiene características deseables e indeseables frente a otros tipos de secadores:

Ventajas

- El suave y líquido flujo de partículas permite operaciones continuas controladas automáticamente con un fácil manejo.
- La rápida mezcla de sólidos lleva a condiciones casi isotérmicas a través del reactor y la operación se puede controlar sin ningún problema.
- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible transportar grandes cantidades de calor producido o necesitado en los grandes secadores.

7

<http://200.13.98.241/~rene/separacion/manuales/psneu.pdf#search=%22secado%20por%20transporte%20neumatico%22>

- Los porcentajes de calor y masa entre el gas y las partículas son altos cuando se comparan con otros métodos de contacto.
- Alta circulación de sólidos.

Desventajas

- Una alta tasa de aglomeración por presencia de finos, lo que afecta la operación.
- La rápida mezcla de sólidos en el lecho conduce a tiempos de residencia no uniformes.
- Un elevado arrastre de finos hace necesario equipos recuperadores de sólidos
- Deterioros producidos por efectos erosivos al secador y accesorios, debido a la abrasión de partículas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio teórico y práctico se llevó a cabo en el área de producción de la Empresa *Extractos Naturales Gelymar S. A.*, Planta de Carrageninas (CGA). Lo que se refiere al experimento cinético, este fue realizado en el Laboratorio de Innovación de la misma empresa.

3.1 Materiales

Materia prima: Extracto GWG y GMR prensado, seco y molido

Secador lecho fluidizado, PILLET

Termómetro de mercurio, Brannan ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$)

Psicrómetro

Anemómetro

Balanza infrarrojo Pesamatic Sartorius modelo MA – 30 ($\pm 0,002$ g)

Balanza de precisión ($\pm 0,01$ g)

Estufa de secado Memmert ULM 400

Crisoles de porcelana

Registro de datos por sistema de PLC

Descripción del Extracto GWG. Es una carragenina tipo *Kappa I*, con presencia en menor proporción de *Kappa II*, el cual se caracteriza por tener baja viscosidad y alta fuerza de gel, según los Protocolos de Innovación de la empresa.

Descripción del Extracto GMR. Es una carragenina tipo *Kappa II*, con presencia en menor proporción de *Kappa I*, el cual se caracteriza por tener viscosidad y fuerza de gel media, propiedades que se traducen en un índice de leche apropiado para la estabilización de suspensiones.

3.2 Metodología

Se describe el procedimiento utilizado para la realización tanto de los ensayos como del estudio de la cinética de secado. Además se describe el procedimiento de diseño y estudio del balance de materia y energía en el secador de lecho fluidizado.

3.2.1 Experimento clásico de cinética de secado. Este experimento se realiza a nivel de laboratorio y contempla el seguimiento de la pérdida de humedad del producto en un ambiente, donde la humedad relativa del aire es casi constante. Al realizarlo en una estufa de secado de laboratorio, se debe utilizar una cantidad de muestra, de tal manera que el volumen de agua que se evapora es despreciable con respecto al volumen de aire en circulación en la estufa, por lo que la variación de la humedad del aire será también despreciable durante el proceso de secado.

3.2.1.1 Ensayo en el laboratorio. El ensayo se realizó en una estufa de convección natural. Se tomaron las muestras de producto prensado (producto que entra al secador) de dos lotes diferentes (*Batch* 1869 y *Batch* 1895) para el mismo tipo de extracto (*GWG*). Se determinó la humedad inicial en una balanza infrarrojo y con esto se calculó la cantidad de materia seca en cada muestra. El ensayo de cinética fue hecho en triplicado y a dos temperaturas diferentes. Las muestras se pesaron a intervalos de tiempo determinados, deteniendo el pesaje y el secado de las muestras al momento de alcanzar un valor constante.

CUADRO 1. Ensayos de cinética de secado

Tratamiento	Muestras	Temperatura de secado (°C)
T-1	Batch 1869	100
T-2	Batch 1869	80
T-3	Batch 1895	100
T-4	Batch 1895	80

Además se registró la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco para determinar el estado del aire fresco que ingresaba a la estufa.

Dimensiones de la estufa. Tiene un largo de 39,8 cm por un alto de 39,9 cm y un ancho de 35,4 cm. Por lo tanto, el volumen de aire es de 56215 cm³.

Superficie activa específica (A/M_s). Para obtener el coeficiente de vaporización se determinó la superficie activa específica, midiendo las dimensiones de las partículas a secar y determinando su respectivo peso. Se obtuvo un promedio del peso y del área de superficie de 10 muestras del pelletizado.

3.2.1.2 Evaluación de resultados. Los datos para la obtención de las curvas de secado se indican en el ANEXO 3. Las curvas para cada ensayo se representaron como $\bar{X} = f(t)$, la humedad promedio de la muestra sólida en función del tiempo como se indica en la FIGURA 2, donde la humedad promedio (\bar{X}) se obtiene de acuerdo a la ECUACIÓN 2.1. y a partir de esto se encuentran los parámetros de proceso:

- *Tiempo y humedad crítica (t_{cr} , \bar{X}_{cr}):* determinados de acuerdo al método para la obtención del punto crítico, indicado en 2.3.2
- *Constante de tiempo* de acuerdo a la ECUACIÓN 2.2
- *Humedad de equilibrio* como se muestra en la FIGURA 2
- *Velocidad máxima* de acuerdo a la ECUACIÓN 2.5

Parámetros adimensionales.

- *Humedad estándar (v) y tiempo estándar (τ)* según las ECUACIONES 2.6 y 2.7 respectivamente, obteniéndose así la curva de secado adimensional para cada lote de muestras analizadas.
- *Coefficiente de vaporización (σ):* Se obtuvo de acuerdo a la ECUACIÓN 2.4, para lo cual se determinó la superficie activa específica (A/M_s) y la humedad de saturación (Y_p), este último se obtiene de acuerdo al principio de saturación adiabática, por lo que corresponde a la humedad de saturación del aire a la temperatura en la superficie de la muestra sólida.

Luego se realizó la evaluación del proceso bajo las condiciones reales de proceso para lo que se determina:

- *Tiempo teórico de proceso (t_p)*: Este parámetro se obtuvo para cada monitoreo realizado, por lo que se consideraron las condiciones específicas de secado en cada caso. A través de las ECUACIONES 2.4 y 2.5 se obtiene la constante de tiempo (t^*), posteriormente con la ECUACIÓN 2.2 se obtiene el tiempo crítico (t_{cr}). Luego con el modelo obtenido válido para el periodo de velocidad decreciente, es decir, a partir del punto crítico, se obtiene el tiempo adicional necesario para lograr la humedad obtenida en el caso real. Finalmente se suma el tiempo crítico, t_{cr} , y el tiempo obtenido con el modelo de secado, el que correspondería al tiempo teórico total necesario para alcanzar la humedad correspondiente, este se compara con el tiempo que se demora en la práctica, el cual se fija en 1 hora, ya que el flujo de producto es cuantificado en kg/h.

$$t_p = t_{cr} + t_a \quad (3.1)$$

t_p : Tiempo teórico de proceso

t_a : Tiempo adicional a partir del punto crítico, obtenido con el modelo de secado

- *Pérdida de humedad teórica (H_t) y real (H_r) en el producto*: Para la obtención de la pérdida de humedad teórica se calcula la diferencia entre la humedad promedio inicial y final de los datos de proceso y luego este valor se divide por el tiempo teórico de proceso, como lo describe la ECUACIÓN 3.2. Finalmente la pérdida de humedad real se calcula con diferencia entre la humedad en base seca final e inicial de los datos del proceso y se dividen por el tiempo real referencial que es 1 hora (ECUACIÓN 3.3).

$$H_t = \frac{\overline{X_f} - \overline{X_0}}{t_p} \quad (3.2)$$

$$H_r = \frac{\overline{X_f} - \overline{X_0}}{1} \quad (3.3)$$

3.2.2 Estática de secado. Se utilizó la estática de secado principalmente con el fin de obtener el flujo específico de aire y energía para el estudio del proceso. La metodología utilizada en esta etapa se describe en adelante.

3.2.2.1 Levantamiento de datos. Para el diseño del balance de masa y energía se realizó principalmente un levantamiento de datos. Para ello se realizó un muestreo, tanto para extracto GWG como para GMR registrándose también como datos las condiciones o parámetros de proceso en el secado de estos extractos.

Parámetros de operación. El registro de datos se realizó a través del sistema de PLC, donde se rescataron los parámetros operacionales cada ciertos intervalos de tiempo, donde también se toman las muestras para el análisis de humedad del producto, este último es fundamental para llevar a cabo el estudio. Los parámetros operacionales registrados fueron los siguientes:

- Frecuencia de la bomba de descarga del estanque repulpador.
- Temperatura del aire a la entrada del secador.
- Temperatura del aire a la salida del secador.
- Frecuencia del ventilador de aire de entrada (tiro forzado)

Humedad del producto de entrada y salida del secador. Se tomaron las muestras de producto a la salida de la etapa de prensado y en la válvula exclusiva a la salida del secador, realizándose con estas muestras los análisis de humedad correspondientes.

Estado del aire fresco. Se registra la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco en intervalos de tiempo de 30 min, el levantamiento de estos datos se hizo tanto en época de primavera como de verano, con estos parámetros es posible determinar la humedad absoluta, volumen específico y entalpía. Finalmente se determinó un promedio de cada uno de los parámetros mencionados para ser utilizados en el estudio.

Determinación del flujo de producto a la entrada del secador. Debido a que este flujo es regulado a través del variador de frecuencia de la bomba de descarga del estanque de repulpado y la velocidad de la prensa N° 2, se pesó el producto que entra

al secador durante un intervalo de tiempo determinado para diferentes frecuencias aplicadas y así se generó una curva de relación entre frecuencia en Hz de la bomba y flujo de producto generado en kg/h, que entra al secador.

Determinación del flujo de aire. Debido a que la velocidad del aire también se regula a través de un variador de frecuencia de los ventiladores, se midió a través de un anemómetro la velocidad del aire (m/s) en determinadas frecuencias. Luego con el área del ducto de entrada de aire se determinó el caudal (m^3/s) y, con estos datos se generó una curva de relación entre frecuencia (Hz) y caudal de aire generado (m^3/s).

Control del proceso de prensado. Debido a la variabilidad y a los altos valores de humedad observados en el producto prensado, con los datos registrados de esta zona se elaboró una tabla, donde se muestra una relación entre la frecuencia aplicada a la bomba de descarga del estanque repulpador y la velocidad de la prensa N° 2, además de estabilizar la presión de los rodillos de la prensa en 4 – 4,5 Bar.

Tiempo de repulpado. Según el protocolo de elaboración del extracto GWG, este tiempo debe ser mínimo de 20 min. Para verificar que este tiempo se está cumpliendo realmente en el proceso, se determinó el volumen del estanque repulpador y se lo relacionó con la velocidad de descarga de este.

3.2.2.2 Evaluación de resultados. A partir de los balances de masa y de energía se obtienen las ecuaciones para determinar el flujo específico de aire y calor, lo cual se determinó de la siguiente forma:

Flujo específico de aire y calor: En cada monitoreo realizado se calcularon estos parámetros, lo cual se hizo de acuerdo a las ECUACIONES 2.10 y 2.11 respectivamente y, a través del uso de la carta psicrométrica se determinaron los datos de humedad absoluta y entalpía del aire, tanto a la entrada como a la salida del secador.

Pérdidas de energía ($Q_{pérd.}$): La ECUACIÓN 2.10 es utilizada para determinar el flujo de calor específico teórico y real. Ambos flujos se diferencia en la entalpía del aire de salida (h_3), los demás componentes de la ecuación son exactamente los mismos valores, la forma de cómo se obtiene h_3 para cada caso está indicado en la FIGURA 3. La diferencia entre h_2 y h_3 es la pérdida de entalpía, lo cual ha debido ser agregado al sistema para que se logre a la salida la temperatura teórica T_3 . De lo anterior se determinan las pérdidas como lo indica la siguiente ecuación:

$$Q_{pérd.} = Q_{real} - Q_{ideal} \quad (3.4)$$

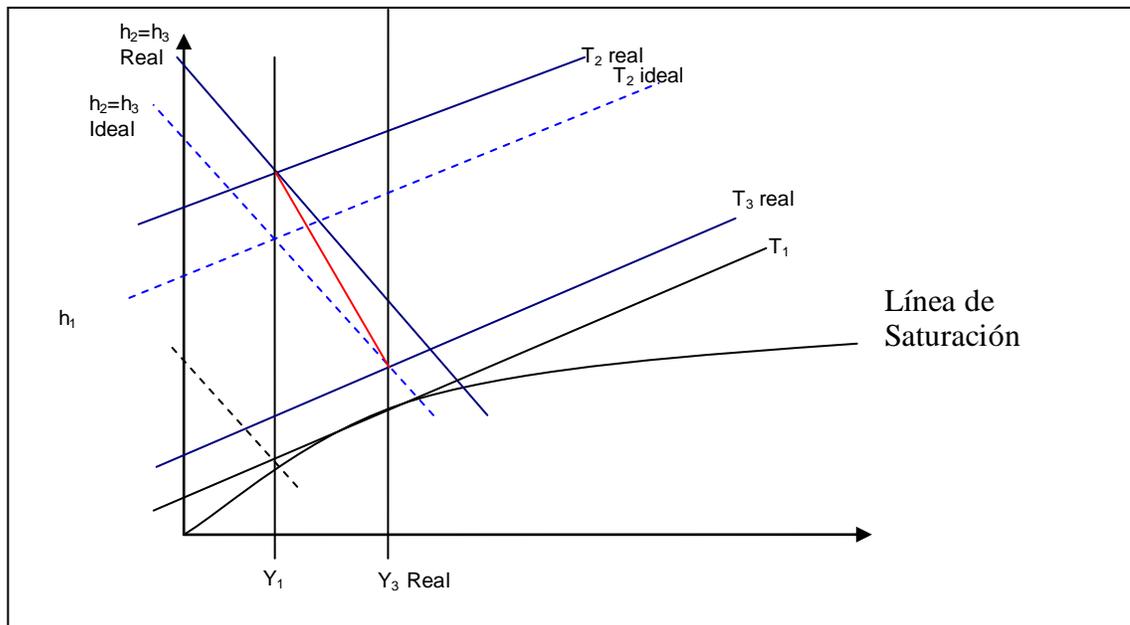


FIGURA 3. Esquema psicrométrica para determinar el flujo específico de calor ideal y real

Pérdida de eficiencia evaporativa (PEE). En este caso la ECUACIÓN 2.11 se utiliza para determinar el flujo específico de aire ideal y real, la diferencia para obtener cada flujo se da en la humedad absoluta del aire de salida Y_3 , ya que en el caso ideal se busca la humedad de saturación en la carta psicrométrica. En la FIGURA 4 se puede ver como se obtiene cada parámetro de la ecuación. La ecuación que se indica a continuación es utilizada para determinar las pérdidas de eficiencia evaporativa:

$$PEE = \left(\frac{M_C}{M_B} \right)_{ideal} - \left(\frac{M_C}{M_B} \right) \quad (3.5)$$

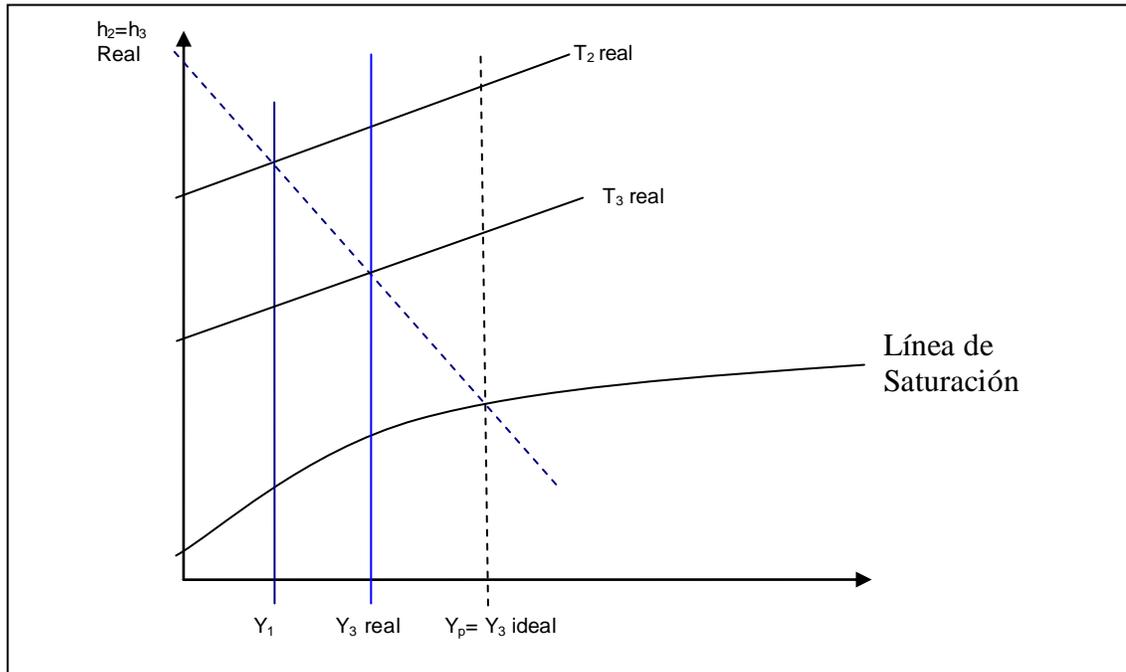


FIGURA 4. Esquema psicrométrica para determinar el flujo específico de aire ideal y real

3.2.3 Estandarización de los parámetros operacionales para el proceso de secado. La estandarización de los parámetros operacionales consiste en determinar el flujo de aire y temperatura requerida para eliminar una cantidad de agua determinada, es decir un flujo de producto con una humedad inicial y final establecida. A continuación se detalla el procedimiento y parámetros utilizados para obtener lo descrito anteriormente.

3.2.3.1 Levantamiento de datos. A través del levantamiento de datos se determinaron promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, máximo y mínimo para cada parámetro utilizado para estandarizar la operación de secado.

3.2.3.2 Determinación de los parámetros operacionales estándares. Se determina la temperatura del aire precalentado y el flujo de aire necesario para secar diferentes flujos de producto, con características específicas de humedad de entrada y salida. Los rangos utilizados para cada parámetro se determinaron en base a los máximos y mínimos obtenidos del levantamiento de datos. A continuación se indica el procedimiento utilizado para determinar cada parámetro.

Temperatura del aire precalentado. En la FIGURA 3 se esquematiza el cálculo de este parámetro. Al inicio se determina el $(Q/M_b)_{ideal}$, utilizando los datos promedios de humedad absoluta del aire fresco (Y_1), entalpía del aire fresco (h_1), y humedad del aire de salida (Y_3). Con este último dato y con una temperatura de 40 °C (T_3) en el aire de salida se determinó a través del diagrama h,Y de Mollier la entalpía del aire de salida h_3 . Luego a este flujo se le agrega el porcentaje promedio de pérdidas energéticas (Q_{perd}) determinado en el levantamiento de datos, obteniendo así el $(Q/M_B)_{real}$. Reemplazando este valor en la ECUACIÓN 2.10 se despeja h_3 , considerando h_3 igual a h_2 , se determina en el diagrama h,Y de Mollier la temperatura del aire caliente necesario para el secado. Esto se realizó para los extractos GMR y GWG.

Flujo de aire específico. En la FIGURA 4 se esquematiza el cálculo de este parámetro. Para calcular este parámetro se utiliza la ECUACION 2.10. Al inicio se calcula $(M_C/M_B)_{ideal}$, utilizando el promedio de la humedad absoluta del aire (Y_1) y a través del principio de saturación adiabática, tomando el valor anterior en el diagrama h,Y de Mollier se sigue a entalpía constante hasta el punto de saturación, siendo este el valor de Y_3 . Luego se agrega la pérdida de eficiencia evaporativa promedio para obtener $(M_C/M_B)_{real}$, lo que representa la masa de aire requerido para evaporar 1 kg de agua.

Frecuencia del ventilador del aire de entrada. Para diferentes flujos y humedad de entrada y salida de producto, se determina a través de balance de masa el flujo másico de agua que es necesario evaporar. Luego dividiendo el valor de $(M_C/M_B)_{real}$ por la

densidad del aire fresco promedio, calculado en el levantamiento de datos, se obtiene el caudal de aire necesario para evaporar el agua en las diferentes condiciones de flujo y humedad de este. Finalmente la frecuencia del ventilador se obtiene de la ecuación que se indica en el ANEXO 8.

4. PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general de este trabajo es la estandarización del proceso de secado en la línea *KCI*, el cual consta de varias etapas, incluyendo una etapa de secado que se realiza en conjunto con la molienda del producto, en el molino GPM-1. Debido a varios factores no controlables, los ensayos se limitaron a una zona de estudio, el cual comprende principalmente un secador de lecho fluidizado, marca PILLET.

4.1 Antecedentes generales

A continuación se indica tanto la descripción de la zona en estudio como del problema observado con el fin de tener una visión general del trabajo realizado.

4.1.1 Descripción de la zona en estudio. El producto que llega hasta el secador proviene pelletizado de la zona de prensa con un contenido de agua variable que está alrededor de 87 %, produciéndose en el secador una reducción de humedad hasta alrededor de 66 %, dependiendo del flujo y humedad del producto. La deshidratación se produce en un secador de lecho fluidizado marca PILLET. El fluido utilizado para el secado es aire, el cual es calentado a través de un calefactor a gas licuado. Luego el producto es llevado a la zona de molienda por transporte neumático y el aire de salida del secador se dirige hacia un ciclón, donde se recupera el producto fino que es arrastrado por el aire. Finalmente este producto recuperado en el ciclón es introducido a la línea que lleva el producto hasta la molienda. Como el producto a la salida del secador no alcanza la humedad requerida (12 %), se da término a la etapa de secado en el molino (GPM-1). La figura que es representativa de la zona se puede ver en el ANEXO 2 y luego en el ANEXO 10 se muestra el equipo de secado de lecho fluidizado.

4.1.2 Descripción del problema. El principal problema que se detecta es la alta variabilidad en la operación de secado, esto debido a que aparentemente se utilizan diferentes criterios de operación. En general no se observa una relación entre la cantidad de producto a secar, y sus características de humedad del producto, con la temperatura y volumen o masa del aire utilizado.

Otros de los problemas observados son los altos y variados valores de humedad del producto a la entrada del secador. Para esto es necesario realizar mejoras con el fin de disminuir y estabilizar estos valores de humedad.

Debido a estos problemas y otros factores se obtiene un producto con un alto contenido de humedad a la salida del secador, siendo ésta en promedio entre 65 y 66 %, lo cual no es deseable ya que no se está aprovechando la energía consumida y además se debe gastar energía adicional para llegar a la humedad deseada de 12 % utilizando el quemador del molino GPM-1.

Los problemas mencionados anteriormente fueron abordados, haciendo algunas mediciones y modificaciones en la planta y ensayos de laboratorio. A continuación se muestran los resultados obtenidos de la cinética de secado del extracto GWG, la evaluación del proceso utilizando el modelo cinético, los resultados obtenidos a partir del cálculo de flujo energético y de aire utilizados en la producción de extracto GWG y GMR. Finalmente se muestran las cartas de control calculadas para diferentes condiciones de flujo y humedad de entrada y salida del producto.

4.2 Experimento clásico de cinética de secado

Los ensayos para determinar la cinética de secado del producto se lleva a cabo a partir de muestras de producto prensado de dos diferentes lotes, denominados *Batch 1869* y *Batch 1895*, según la nomenclatura propia de la empresa. En el siguiente cuadro se indican los diferentes tratamientos realizados.

CUADRO 2. Características de cada tratamiento o ensayo de cinética de secado

Tratamiento	Contenido de humedad inicial \bar{X}_0 %	Contenido de masa seca M_s %	Peso inicial g		
			R1	R2	R3
T-1	89,2	10,8	5,9818	5,9259	-----
T-2	89,2	10,8	5,9045	5,7132	-----
T-3	84,1	15,9	5,8251	5,8651	5,7745
T-4	84,1	10,8	5,8867	5,8169	5,8087

El aire es uno de los factores más importante en el secado, tanto en el proceso como en su evaluación, por lo que es necesario al realizar un ensayo cinético, conocer el estado del aire fresco que ingresa al secador o estufa de secado en el caso de los ensayos. A continuación se muestra un cuadro con los valores promedios que caracterizan el estado del aire durante el ensayo.

CUADRO 3. Registro de datos para determinar el estado del aire fresco para el ensayo cinético

	T_{bs} °C	T_{bh} °C	Y_1 kg/kg
Promedio (n=3)	13,66	19,00	0,007
Desviación estándar	± 0,58	± 0,87	-
C. V. (%)	4,25	4,57	-

4.2.1 Curvas de cinética de secado. Para el estudio de la cinética de secado de un producto se realizan las gráficas del contenido de agua (o humedad) en función del tiempo, $\bar{X} = f(t)$, las que se muestran a continuación corresponden a los diferentes tratamientos descritos en el CUADRO 2.

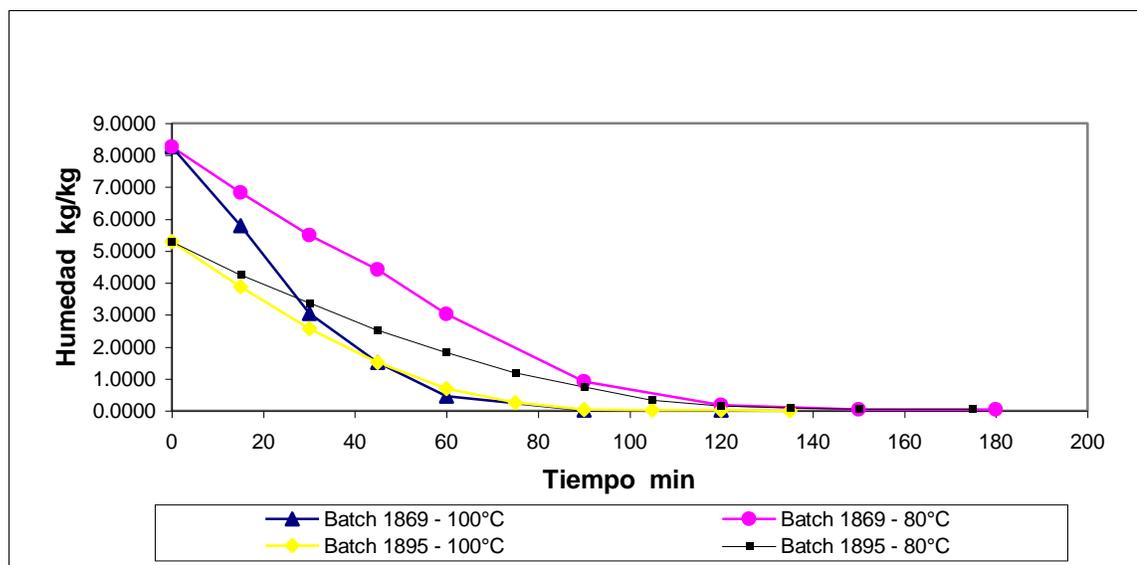


FIGURA 5. Contenido de humedad en función del tiempo para todos los ensayos de cinética de secado

En la FIGURA 5, se observan las diferencias entre las curvas de secado de los diferentes ensayos realizados. Como es esperado el secado realizado a 100 °C tiene una curva con una mayor pendiente que el realizado a 80 °C, esto se debe a que la temperatura de proceso es un factor que aumenta la velocidad de secado.

Debido a que existen muchas variables que afectan la humedad absoluta durante el secado, es necesario estandarizar los datos de tiempo y humedad para poder establecer una relación válida para cualquier caso, y de esta forma encontrar un modelo que caracterice el secado del producto o extracto en estudio.

4.2.2 Determinación de los parámetros de proceso. Para lograr una descripción del comportamiento de la carragenina durante el secado se determinaron los parámetros del proceso: tiempo crítico, humedad crítica, constante de tiempo, humedad de equilibrio y velocidad máxima de secado.

CUADRO 4. Parámetros de caracterización del proceso determinados a partir de las curvas de secado

Ensayo Lote – T°	Trat.	Punto Crítico		Constante de tiempo, t* min	Humedad de equilibrio, X* kg/kg	Velocidad Máxima (dX/dt) _{max} kg /kg min
		Tiempo crítico (t _{cr}) min	Humedad crítica (X _{cr}) kg/kg			
1869 – 100°C	T-1	31,08	3	48,64	0,0301~ 0	0,169191
1869 – 80°C	T-2	60,53	3	94,72	0,0301~ 0	0,086881
1895 – 100°C	T-3	24,86	3	57,10	0,0323~ 0	0,092066
1895 – 80°C	T-4	36,60	3	83,79	0,0323~ 0	0,062740

Punto crítico t_{cr}, \bar{X}_{cr} : En el CUADRO 4, se observa que la humedad crítica es la misma en todos los ensayos con un valor de 3 kg agua por kg m.s.; este parámetro es característico del producto, cabe destacar que en ambos casos el tamaño del pellet (partícula de carragenina) a secar es el mismo. Con respecto al tiempo crítico, este es diferente en todos los tratamientos realizados. Al comparar entre T-1 y T-2 se distingue que esta fase está influenciada por la temperatura, ya que existe un menor tiempo crítico a mayor temperatura de secado, es decir, a 100 °C. Si se compara entre los tratamientos T-1, T-2, T-3 y T-4, se observa que los tiempos son menores en los dos últimos casos, esto se produce porque la humedad inicial de este lote es menor (84%). Esto indicaría que la fase anterior al punto crítico está fuertemente influenciada por la

humedad inicial. Lo cual es una variable importante que se debe controlar ya que hasta este punto es donde se extrae la mayor cantidad de agua. Es por eso la importancia de bajar y estabilizar la humedad del producto prensado.

*Constante de tiempo t^** : Se observa el efecto de la temperatura en el valor de la constante de tiempo, el cual es menor a mayor temperatura, por lo que es menor en los casos T-1 y T-3 (100 °C), y mayor en los casos T-2 y T-4 (80 °C).

*Humedad de equilibrio \bar{X}^** : Se observa un valor de humedad de equilibrio que visualmente tiende hacia cero (FIGURA 5). Se logró una estimación a partir del promedio de la humedad mínima alcanzada en los ensayos a diferentes temperaturas para cada lote, demostrándose una diferencia de sólo 0,0022 kg agua por kg m.s, entre los diferentes valores promedio y una humedad de equilibrio promedio para todos los ensayos de 0,0312 kg agua/kg m.s. Este valor es relativamente bajo, por lo que se consideró en los cálculos una humedad de equilibrio igual a 0.

Velocidad máxima de secado $d\bar{X}/dt_{m\acute{a}x}$: Con la ECUACIÓN 2.5 se determinan los valores de velocidad máxima de secado para cada ensayo, en el CUADRO 4 se presentan los valores determinados de la velocidad de secado, la cual esta directamente relacionada con la temperatura. En los tratamientos T-2 y T-4, donde el secado se realizó a 80 °C, se obtiene menor velocidad que en los tratamientos T-1 y T-3, donde el secado se hizo a 100 °C. Además cabe destacar que en los tratamientos, donde la humedad inicial es más alta (T-1 y T-2) la velocidad es también mayor, debido a la mayor cantidad de agua superficial disponible, la cual se eliminó con mayor rapidez.

4.2.3 Determinación del modelo de secado. Es conveniente obtener un modelo que caracterice el producto, si se quiere predecir el comportamiento del proceso de secado del producto bajo distintas condiciones de operación. En la FIGURA 6 se observa, que es posible obtener un modelo que se ajuste a los ensayos con los dos distintos lotes. Los dos modelos de secado demuestran un comportamiento similar, y se diferencian sólo en los distintos contenidos de humedad al inicio de los ensayos,

teniendo el Batch 1895 el menor contenido de agua inicialmente. Es teóricamente posible mezclar todos los datos para obtener un modelo promedio. Considerando que es de interés el comportamiento después del punto crítico, se hizo la fusión de los datos para el periodo de velocidad decreciente de secado (FIGURA 7).

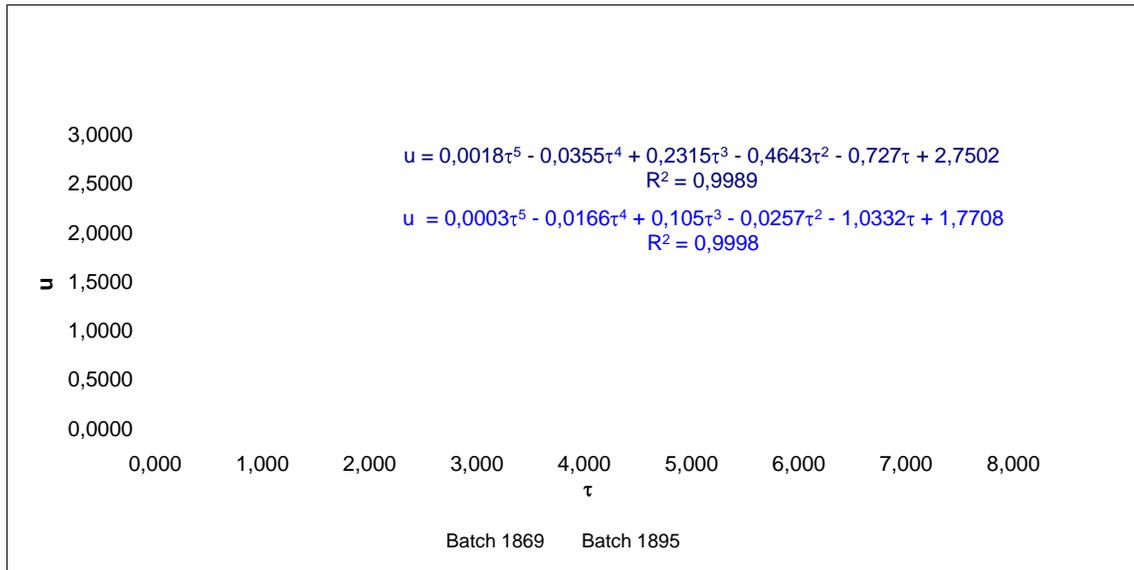


FIGURA 6. Modelo adimensional para los ensayos de secado de la carragenina Extracto GWG

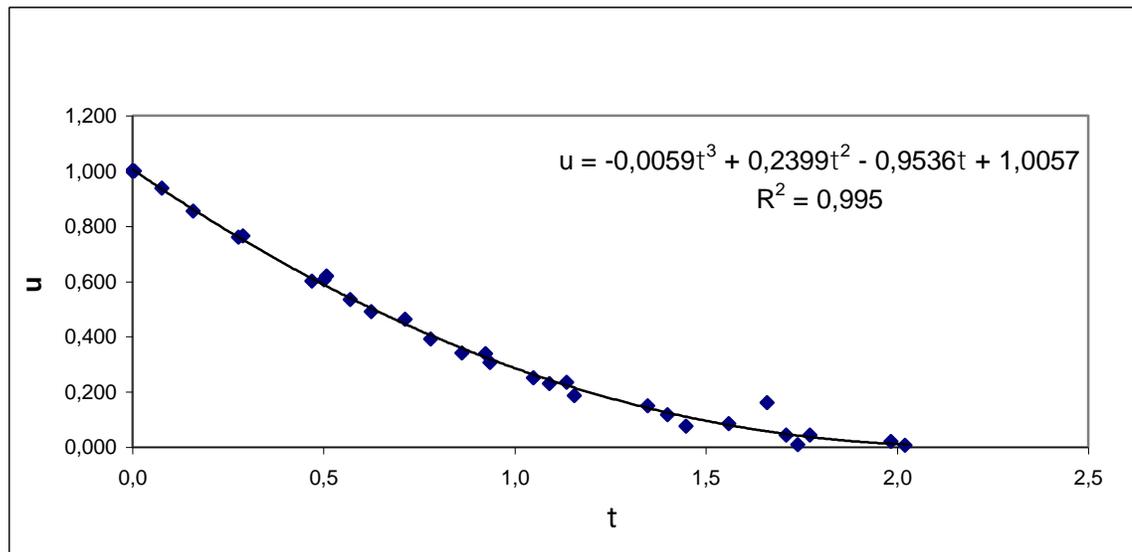


FIGURA 7. Modelo de secado en el periodo de velocidad decreciente de secado

El modelo que se muestra en la FIGURA 7 es válido para la fase de velocidad decreciente de secado, a partir del punto crítico, con la humedad adimensional igual a uno hasta el final del proceso de secado, donde la humedad adimensional es igual a 0. El modelo es válido para el extracto GWG, el cual fue utilizado en el experimento cinético. En la FIGURA 7 se puede ver que la correlación es bastante alta con $R^2 = 0,995$, lo que indica un buen ajuste del modelo a los datos de medición.

4.2.4 Superficie activa específica y coeficiente de vaporización. Para evaluar el proceso de secado bajo las condiciones reales de operación, es necesario determinar la velocidad de secado junto con la constante de tiempo t^* y luego determinar la superficie activa específica de producto y el coeficiente de vaporización para el proceso. Estos datos fueron determinados y se muestran en el CUADRO 5.

La superficie activa específica obtenida para el producto prensado y pelletizado tiene en promedio $4,538 \text{ m}^2/\text{kg}$ masa seca y, fue calculada a partir de las dimensiones y peso de diez unidades de pellet (partículas prensadas - pelletizadas). Con los valores de velocidad máxima obtenida (CUADRO 4) y la humedad inicial de cada ensayo se obtiene el coeficiente de vaporización para el extracto, utilizando la ECUACIÓN 2.4. En el CUADRO 5, se puede ver que este coeficiente de vaporización es dependiente de la humedad inicial del producto.

CUADRO 5. Características de secado y coeficiente de vaporización

Lote	Temp °C	\bar{X}_0 kg/kg	$d\bar{X}/dt$ Kg/kg min	A/M_s m ² /kg	σ kg/m ² min
Batch 1869	100	8,2593	0,169191	4,538	1,434096
“	80	8,2593	0,086882	4,538	0,957353
Batch 1895	100	5,2893	0,092067	4,538	0,780373
“	80	5,2893	0,062740	4,538	0,691337

En la FIGURA 8 no se observa una buena correlación para la dependencia del coeficiente de vaporización, para tener la posibilidad de obtener una correlación aceptable o un dato constante para todos los ensayos, sería necesario un nuevo estudio de la cinética de secado. Para efectos de cálculos se usará la ecuación determinada en la FIGURA 8 considerándola como una recta promedio.

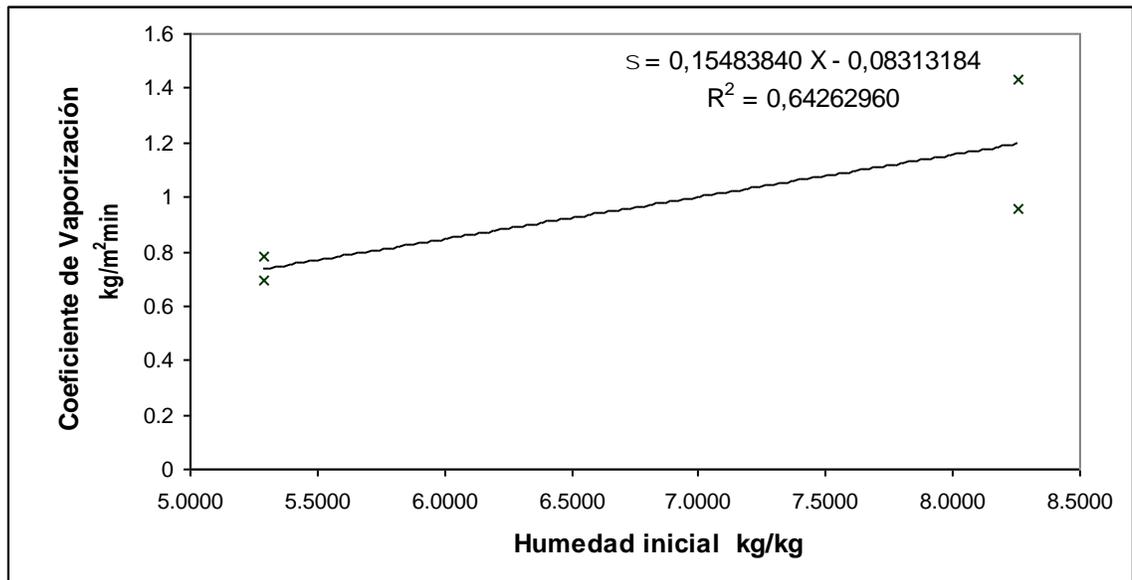


FIGURA 8. Correlación entre el coeficiente de vaporización y la humedad inicial

4.3 Evaluación del proceso de secado bajo las condiciones reales de operación

Con la utilización del modelo de secado adimensional y el coeficiente de vaporización se evalúa el proceso considerando todas las condiciones reales, las cuales fueron obtenidas en la etapa de levantamiento de datos en terreno.

4.3.1 Evaluación del tiempo de proceso. Para cada lote analizado, según las condiciones en que fue realizada la operación de secado, se determina el tiempo teórico para cada condición de flujo y humedad de entrada y salida del producto, registrado en terreno, además se considera el flujo y el estado del aire de secado. El tiempo obtenido es comparado con el tiempo real referencial de 1 hora. En la FIGURA 9 se observa que el tiempo teórico es muy variable y es menor que el tiempo real referencial de una hora. Esto se debe probablemente a la misma fluctuación en las condiciones de proceso, especialmente en la humedad inicial del producto. Esto indica además que el secador tiene una baja eficiencia con respecto al tiempo de proceso.

Se puede observar en la FIGURA 9, que en los lotes 165, 1676, 1737 y 1802 el tiempo real referencial de 60 min se acerca mucho al tiempo teórico, lo que no ocurre en los lotes 1667, 1662, 1663, 1704 y 1729. Comparando las condiciones de proceso que se

indican en el ANEXO 4, se destaca que en los casos, donde el tiempo teórico es muy corto y por lo tanto, más alejado del tiempo real referencial, ocurre en aquellos puntos, donde la temperatura es sobre 150 °C. Por otro lado, cuando la temperatura es más baja el tiempo teórico se acerca más al tiempo real referencial. Una explicación para esto está en las pérdidas energéticas, ya que no toda la energía es aprovechada eficientemente en el proceso de secado del producto. Más adelante se contabilizan estas pérdidas.

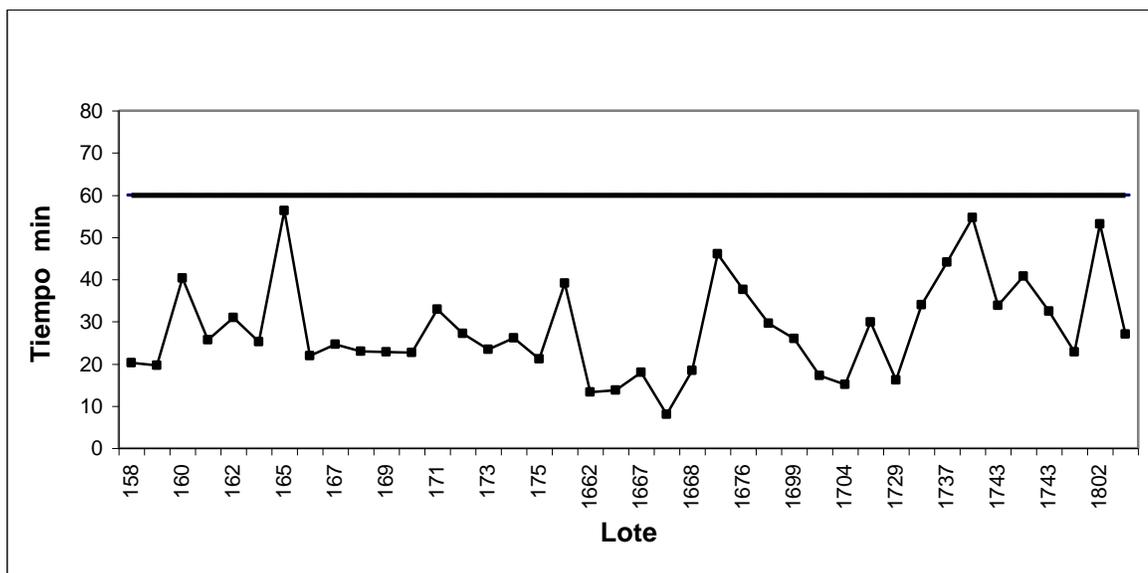


FIGURA 9. Tiempo teórico de secado utilizando el modelo adimensional y la velocidad máxima de secado

Si se compara el tiempo teórico que se observa en el CUADRO 6, con el tiempo real referencial de 1 h, se obtiene que la diferencia es de alrededor de ½ h. Esto tiene influencia en la productividad, lo cual de acuerdo al modelo cinético de secado podría mejorarse disminuyendo el tiempo de secado, según lo que indica el CUADRO 6.

CUADRO 6. Parámetros estadísticos del tiempo teórico de proceso

Parámetro estadístico	Tiempo teórico Min
Promedio	28,36
Desviación estándar	± 11,53
Coficiente de variación	40,66%

4.3.2 Comparación de la pérdida de humedad teórica y real. También se observa una gran variabilidad en el agua eliminada, especialmente lo que se ha determinado teóricamente, una de las razones de esta variabilidad podría ser causa de la diferencia en los parámetros operacionales, como las condiciones de proceso y los flujos de aire. Para lograr mejorar las condiciones de proceso es muy importante tener datos de humedad del producto y del estado del aire en línea al igual que los flujos de producto.

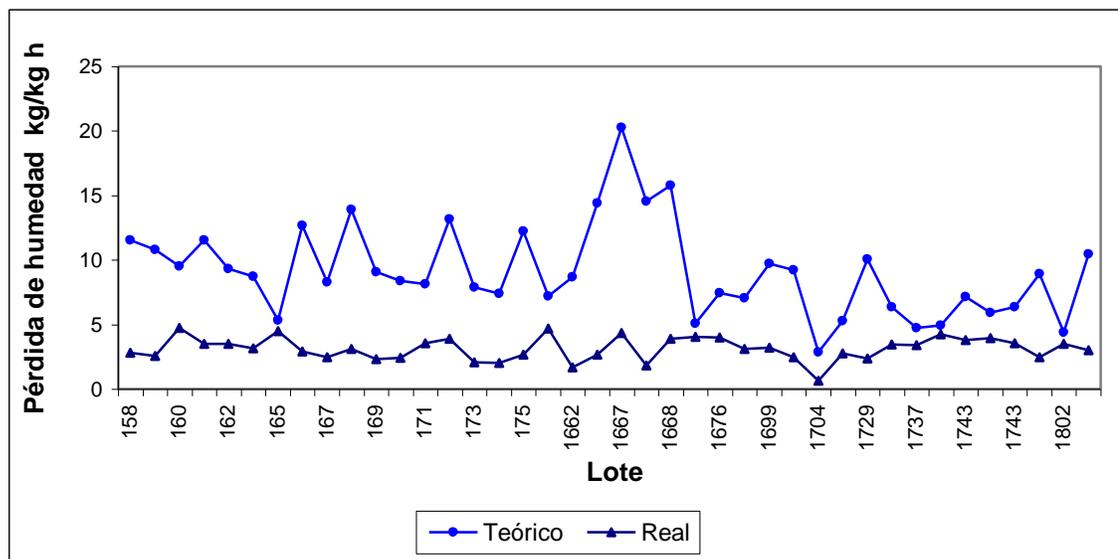


FIGURA 10. Comparación entre la pérdida de humedad teórica y real de los diferentes lotes analizados

En el gráfico que representa la FIGURA 10 se observa que en los lotes 165, 1662, 1675, 1704, 1737 y 1802 el agua eliminada teórica y real son casi del mismo valor, lo que es bastante positivo ya que indica una alta eficiencia del secador. Por otra parte, ocurre lo contrario en los lotes 1663, 1667 y 1668. En el ANEXO 5, donde están tabulados los datos de temperatura y caudal de aire junto con los datos de evaporación de agua, expresada como pérdida reales y teórica de humedad, al comparar las condiciones de proceso entre los distintos lotes, se observa que cuando el agua eliminada teórica y real son similares las temperaturas de proceso son inferiores que en aquellos casos donde ocurre lo contrario. Por lo tanto se podría concluir, que esto se relaciona directamente con las pérdidas energéticas, demostrando una baja eficiencia del secado en cuanto a la eliminación de cantidad de agua del producto y al tiempo de operación.

CUADRO 7. Parámetros estadísticos de la pérdida de humedad teórica y real

Parámetros Estadísticos	Pérdida de humedad kg/kg h		Relación Real/Teórico
	Teórico	Real	
Promedio	9,1175	3,1303	39,67%
Desviación estándar	± 3,5673	± 0,8890	± 20,60%
Coefficiente de variación	39,13%	28,40%	51,93%

En el CUADRO 7 se comparan los valores promedio teóricos y reales de cantidades de agua eliminada en la línea de proceso. Se alcanza en promedio sólo 39,67% de la cantidad de agua que se debería eliminar teóricamente por unidad de tiempo y masa seca, lo cual es bastante bajo, indicando nuevamente una baja eficiencia del secador.

4.4 Control de la operación de prensado de carragenina precipitada

El prensado es la etapa anterior al secado. Es la operación donde se elimina el agua en forma mecánica de la carragenina, y de esta etapa depende el porcentaje de humedad, con la que entra el producto al secador.

4.4.1 Influencia de la humedad del producto en la operación de secado

En el CUADRO 8 se muestra como influye económicamente el contenido de agua del producto que ingresa al secador. Considerando que normalmente esta humedad es alrededor de 87%, si se lograra entrar con solo 80% de agua, el ahorro sería de 41 % en el costo energético, gastado sólo para la evaporación del agua necesaria para obtener una producción de 140 kg/h con 12% de humedad.

Cuadro 8. Costo energético según la humedad del producto a la salida de la prensa 2

Humedad inicial (PR-2)	Agua a evaporar		Energía kcal/kg	Costo	
	kg/h	kg/día		\$US/día	\$US/mes
80%	418.88	8976.00	4847040.00	268.247	6974.41099
84%	554.40	11880.00	6415200.00	355.032	9230.83807
87%	710.77	15230.77	8224615.38	455.17	11834.4078
90%	960.96	20592.00	11119680.00	615.389	16000.1193

Además es importante destacar que la capacidad de diseño del secador es de 650 kg/h, por lo que al ingresar el producto con un contenido de agua inferior al 84 %,

significa que la capacidad del secador es suficiente para lograr un producto con un contenido de agua alrededor de 12%, esto sí, con un aislamiento térmico adecuado.

4.4.2 Estandarización de las variables de control en la operación de prensado.

En base a un análisis estadístico simple, se determinó una tabla con los parámetros de control de proceso, donde se hizo una relación entre la velocidad de alimentación de producto hacia la prensa y la velocidad de los rodillos de ésta, manteniendo la presión de los rodillos constante. Con estos parámetros se esperaría tener una humedad del producto prensado constante. Pero una de las variables determinantes para obtener un producto prensado de baja humedad es el tiempo de repulpado ya que afecta directamente la firmeza de la fibra, característica que facilita y optimiza el prensado. Por esta razón se verificó si el tiempo de repulpado está siendo el adecuado, para ello se determinó principalmente:

- Volumen estanque repulpador: **1.9889 m³**

CUADRO 9. Parámetros estándares para la operación de prensado – prensa N° 2

FBR	VP2	Presión Bar	
		Inferior	Superior
		min:4.0/máx.:4.5	min:4.0/máx.:4.5
<35	15,00	4,00	4,00
36 – 40	20,00	4,00	4,00
41 – 50	25,00	4,00	4,00
>50	28,00	4,00	4,00

Si el repulpado del producto es de 20 min el caudal sería de: **5,9667 m³/h**, de acuerdo al ANEXO 9, esto significa que se debería trabajar a una velocidad de 30 Hz aproximadamente, pero de acuerdo a la situación actual de la planta, esta velocidad de trabajo es en promedio de 50 Hz, por lo que se concluye que el tiempo de repulpado no está siendo el indicado por el protocolo de elaboración del extracto, lo cual es una limitante para obtener un producto bien prensado, ya que este tiempo influye directamente en la firmeza de la fibra, siendo esto último una de las determinantes en la operación de prensado para obtener una baja humedad.

4.5 Estática de secado

Para el desarrollo de esta etapa del estudio se realizó un levantamiento de datos en terreno. En el ANEXO 5 se pueden ver los lotes y las fechas en que fue realizado el proceso y registrados los datos. Luego se realizaron cálculos y gráficos para presentar los resultados.

4.5.1 Análisis del flujo específico de aire y energía. Para determinar el flujo de aire se utilizó la correlación del ANEXO 8. Según la FIGURA 11 y 12, se observa que en ambos extractos analizados existe una relación entre el flujo de aire y la energía utilizada, ya que si uno de estos aumenta, ocurre lo mismo con el otro.

Por lo tanto, al utilizar mayor cantidad de aire por unidad de agua evaporada, se está gastando mayor cantidad de energía por unidad de agua evaporada, lo cual es esperado, ya que al aumentar el flujo de aire se requiere mayor energía para lograr la temperatura requerida. Pero se podría minimizar el consumo energético aumentando la eficiencia evaporativa, ya que se ocuparía menos aire y como es proporcional al consumo energético, este último también sería menor.

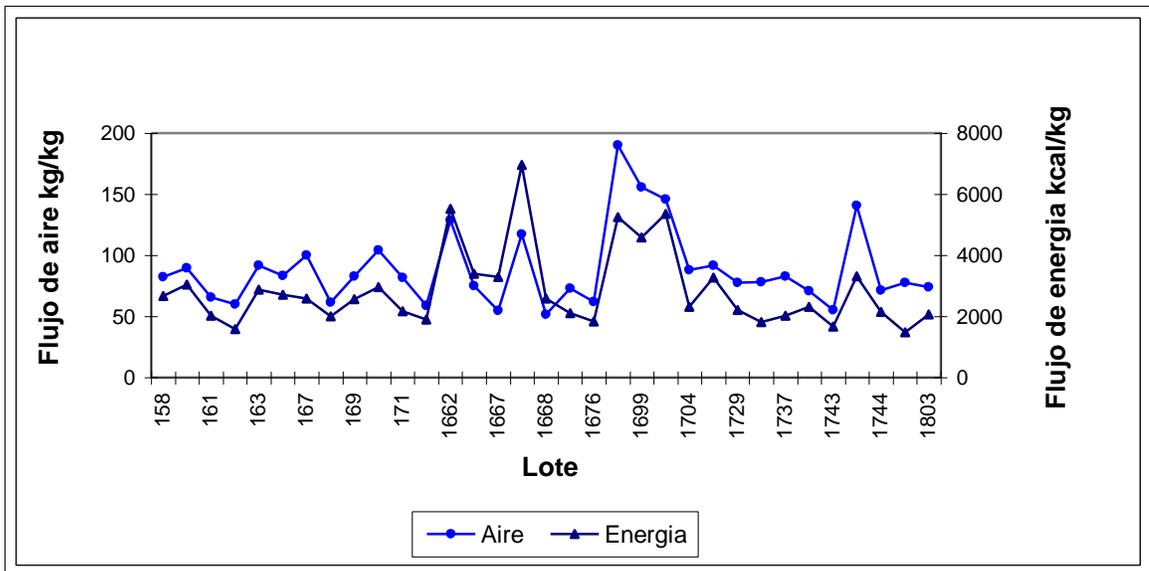


FIGURA 11. Relación entre el flujo específico de aire y calor para extracto GWG

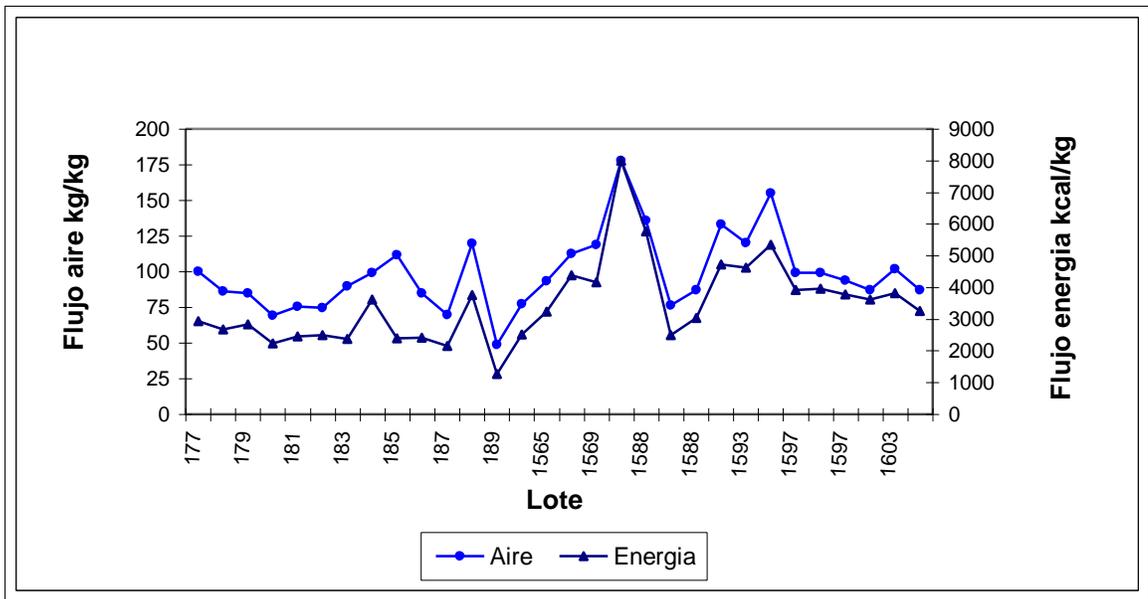


FIGURA 12. Relación entre el flujo específico de aire y calor para extracto GMR

4.5.2 Pérdidas energéticas. La FIGURA 13, muestra la correlación que existe entre las pérdidas energéticas y el consumo real de energía, por lo tanto, al tener altos consumos de energía refleja también las grandes pérdidas energéticas, esto indica también que debido a las pérdidas se elevan los consumos de gas.

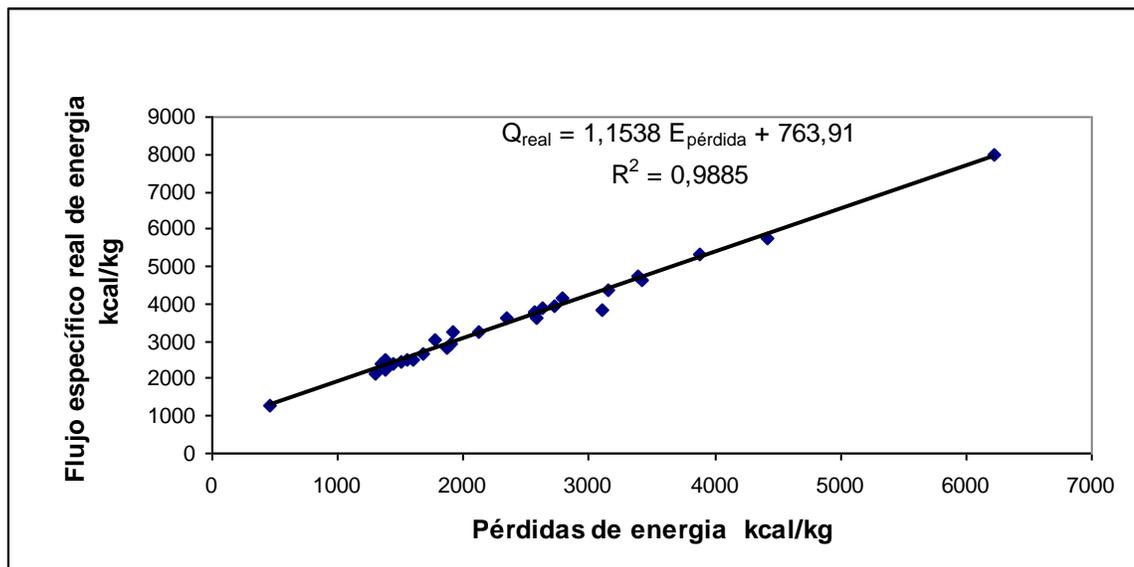


FIGURA 13. Curva que relaciona las pérdidas con el consumo de energía

En la gráfica de la FIGURA 13 se incluyen los datos de ambos extractos (GWG y GMR), y en los dos casos se obtuvieron pérdidas promedios sobre el 100 %, lo que indica que más de la mitad de la energía que se consume es utilizada en las pérdidas. Según la ecuación que correlaciona las pérdidas energéticas y el consumo real (FIGURA 13), alrededor de 115,38 % de las pérdidas corresponde al consumo real, equivalente a más de la mitad de la energía consumida que no se aprovecha en la operación del secado de la carragenina, esto también se vio reflejado en el tiempo de secado y la cantidad de agua real que se elimina en el proceso de secado. Se considera también que si no hubiera pérdidas, algo que en la práctica es imposible lograr, según la ecuación se tendría un consumo de energía de 763,91 kcal/kg agua.

4.5.3 Estandarización de los parámetros operacionales de secado. Para estandarizar los parámetros operacionales de secado fue necesario encontrar parámetros que eran desconocidos al momento de realizar el proceso y que para efectos del cálculo en este estudio eran imprescindibles, razón por lo cual se recurrió al levantamiento de datos y se determinó el promedio, desviación estándar, máximo y mínimo en cada parámetro, y finalmente a partir de estos datos hacer los cálculos detallados en la metodología.

4.5.3.1 Resultados obtenidos del levantamiento de datos. En los CUADROS 10, 11 y 12, se indican los datos utilizados para realizar los cálculos de parámetros estándares y en las observaciones se detalla como se utiliza cada dato en el procedimiento de estandarización de las variables de operación en el secado.

CUADRO 10. Resumen del estado del aire fresco utilizado en el proceso de secado

Parámetros	Promedio	D.S	C.V	Min	Max	Observaciones
Y_1 kg/kg	0,0087	\pm 0,002	22,99 %	0,0060	0,0132	La estandarización se basa en el promedio de este parámetro.
$T_{b,s}$ °C	18,62	\pm 5,12	27,50 %	12,00	28,00	
h_1 kcal/kg	9,64	\pm 2,29	23,74 %	6,50	14,33	
ρ_1 kg/m ³	1,195	\pm 0,002	0,20 %	1,151	1,226	La estandarización se basa en el promedio de este parámetro.

CUADRO 11. Resumen de los parámetros operacionales en extracto GWG

Parámetros	Promedio	D.S	C.V	Min	Max	Observaciones
FBR Hz	44,99	± 9,7	21,56 %	25	60	El mínimo y el máximo se utiliza como referencia para la estandarización. Además se utilizan valores intermedios.
FVE Hz	48,69	± 6,32	12,98 %	45	65	
%H ₁	85,8	± 2,22	2,59 %	81,72	90,00	El mínimo y el máximo son utilizados como referencia para la estandarización. Además se utilizan valores intermedios.
%H ₂	66,35	± 11,83	17,83 %	39,71	80,95	El promedio es utilizado como referencia para la estandarización.
Y ₃ kg/kg	0,0211	± 0,004	18,96 %	0,0128	0,0270	Determina la humedad final del aire a la que se pretende llegar.
Y _p kg/kg	0,0534	± 0,0133	24,91 %	0,0365	0,0910	
T ₃ °C	38,59	± 2,19	5,68 %	34,68	42,00	La estandarización se basa en un valor aproximado cercano al promedio. 40°C
T ₂ °C	155,32	± 38,02	24,48 %	106,05	270,15	
PEE %	293,24%	± 188,67%	64,34 %	93,04%	877,35%	La estandarización se basa en el promedio de este parámetro.
Q _{perd} %	167,97%	± 94,83%	56,46 %	59,12%	525,02%	La estandarización se basa en el promedio de este parámetro.

CUADRO 12. Resumen de los parámetros operacionales en extracto GMR

Parámetros	Promedio	D.S	C.V	Min	Max	Observaciones
FBR Hz	38,49	± 7,87	20,44 %	25	52	El mínimo y el máximo se como referencia para la estandarización. Además se utilizan valores intermedios.
FVE Hz	48,81	± 3,74	7,66 %	45	55	
%H ₁	86,56	± 1,83	2,12 %	82,54	90,02	El mínimo y el máximo se utiliza como referencia para la estandarización. Además se utilizan valores intermedios.
%H ₂	63,93	± 19,44	30,41%	9,01	84,60	El promedio es utilizado como referencia para la estandarización.
Y ₃ kg/kg	0,0195	± 0,0036	18,70 %	0,0131	0,0305	Determina la humedad final del aire a la que se pretende llegar.
Y _s kg/kg	0,0548	± 0,0062	11,36 %	0,0390	0,0680	
T ₃ °C	39,34	± 1,45	3,67 %	37,00	42,62	La estandarización se basa en un valor aproximado cercano al promedio. 40°C
T ₂ °C	157,51	± 18,81	11,94 %	114	199,4	
PEE %	361,42	± 173,39	47,97 %	80,44	975,85	La estandarización se basa en el promedio de este parámetro.
Q _{perd} %	199,01	± 78,34	39,37 %	58,01	435,71	La estandarización se basa en el promedio de este parámetro.

4.5.3.2 Determinación de los parámetros operacionales estándares. Para obtener estos parámetros es importante determinar el estado del aire de entrada y salida. Para esto se obtiene el promedio y se estandarizan estos valores. En los CUADROS 13 y 14 se indica el estado del aire de entrada y salida, además en este último se especifica para cada extracto. Todo esto se determina a través del levantamiento de datos.

CUADRO 13. Condiciones promedio del estado del aire fresco

Parámetro	Promedio
Y_1 kg/kg	0,00870
T_{bs} °C	12,93
h_1 kcal/kg	9,63936
ρ_1 kg/m ³	1,1949

CUADRO 14. Condiciones del aire de salida para ambos extractos

Parámetro	Extracto GWG	Extracto GMR
T_3 °C	40,00	40,00
Y_3 kg/kg	0,0211	0,0195
$h_2=h_3$ kcal/kg (Ideal)	22,50	22,00
$h_2=h_3$ kcal/kg (Real)	44,10	0,059
Y_p kg/kg	0,056	46,60

CUADRO 15. Pérdidas de eficiencia evaporativa y energética en ambos extractos

Parámetro	Extracto GWG	Extracto GMR
Q_{perd}	167,97%	199,01%
PEE	293,24%	361,42%

Las pérdidas que se indican en el CUADRO 15 se adicionan según corresponda al determinar el valor del flujo energético o de flujo de aire teórico. De esta forma se obtiene lo requerido en la práctica. En el CUADRO 15 se indican los valores reales, los cuales incluyen las pérdidas correspondientes.

CUADRO 16. Flujo específico de aire y energía para ambos extractos

Flujos	Extracto GWG	Extracto GMR
$(Q/M_B)_{ideal}$ kcal/kg	1037,15	1144,50
$(Q/M_B)_{Real}$ kcal/kg	2779,25	3422,18
$(M_C/M_B)_{ideal}$ kcal/kg	21,14	19,88
$(M_C/M_B)_{Real}$ kcal/kg	83,14	91,73

4.5.3.3 Parámetros estandarizados. En los CUADROS 17, 18, 19 y 20, se muestra el parámetro de frecuencia del ventilador del aire de entrada, estandarizado, según:

- Flujo de producto
- Humedad del producto de entrada
- Humedad del producto de salida

La frecuencia del ventilador a la salida del secador debe ser de 5 Hz mayor que la frecuencia del ventilador del aire de entrada al secador, ya que con esta diferencia se obtiene una buena fluidización del producto dentro del equipo.

Además es importante evaluar el uso de estas cartas, ya que sería bueno estabilizar y bajar el contenido de humedad y, aumentar la eficiencia térmica. Las cartas serían útiles en las condiciones actuales, pero es importante destacar que esta medida no minimiza los costos en cuanto a combustible.

CUADRO 17. Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GWG (humedad Producto de salida de 55 y 60 %)

		Humedad Producto a la Salida %																																						
		55										60																												
		Humedad Producto a la Entrada %																																						
		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90																	
Frecuencia Bomba Descarga de Estanque Repulpador Hz		Frecuencia Ventilador Hz																																						
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
20	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	21	22	23	25	26	27	28	29	30	31	32																		
21	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	22	24	25	26	27	28	29	30	31	32	34																		
22	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	23	25	26	27	28	29	30	32	33	34	35																		
23	27	28	29	30	32	33	34	35	36	37	38	24	26	27	28	29	31	32	33	34	36	37																		
24	28	29	31	32	33	34	35	36	37	39	40	26	27	28	29	31	32	33	34	36	37	38																		
25	30	31	32	33	34	35	37	38	39	40	41	27	28	29	31	32	33	35	36	37	39	40																		
26	31	32	33	34	36	37	38	39	40	42	43	28	29	30	32	33	34	36	37	39	40	41																		
27	32	33	34	36	37	38	39	41	42	43	45	29	30	31	33	34	36	37	39	40	41	43																		
28	33	34	36	37	38	40	41	42	43	45	46	30	31	33	34	36	37	39	40	41	43	44																		
29	34	35	37	38	40	41	42	44	45	46	48	31	32	34	35	37	38	40	41	43	44	46																		
30	35	37	38	39	41	42	44	45	46	48	49	32	33	35	36	38	40	41	43	44	46	48																		
31	36	38	39	41	42	44	45	46	48	49		33	34	36	38	39	41	42	44	46	47	49																		
32	37	39	40	42	43	45	46	48	49			34	35	37	39	40	42	44	45	47	49																			
33	39	40	42	43	45	46	48	49				35	36	38	40	42	43	45	47	49	50																			
34	40	41	43	44	46	48	49					36	37	39	41	43	45	46	48	50																				
35	41	42	44	46	47	49						37	39	40	42	44	46	48	50																					
36	42	44	45	47	49	50						38	40	41	43	45	47	49																						
37	43	45	46	48	50							39	41	43	44	46	48	50																						
38	44	46	48	49								40	42	44	46	48	50																							
39	45	47	49									41	43	45	47	49																								
40	46	48	50									42	44	46	48	50																								
41	47	49										43	45	47	49																									
42	48	50										44	46	48	50																									
43	50											45	47	49																										
44												46	48	50																										
45												46	49																											
46												47	50																											
47												48																												
48												49																												
49												50																												
50																																								
51																																								
52																																								
53																																								
54																																								
55																																								
56																																								
57																																								
58																																								
59																																								
60																																								

Nota: La zona en blanco indica que no es aplicable, debido a que el ventilador tiene una frecuencia máxima de 50 Hz.

Temperatura aire precalentado: 170°C

Cuadro 18. Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GWG (humedad Producto de salida de 65 y 70%)

		Humedad Producto de Salida %																				
		65										70										
		Humedad Producto de Entrada %																				
		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
		Frecuencia Ventilador Hz																				
		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
53	56	59	61	64	23	24	26	27	28	29	31	14	16	17	19	20	21	23	24	26	27	28
55	57	60	62	65	24	26	27	28	29	31	32	15	16	18	19	21	22	24	25	27	28	30
56	58	61	64	66	25	27	28	29	31	32	34	16	17	19	20	22	23	25	27	28	30	31
23	21	22	24	25	27	28	29	31	32	34	35	16	18	20	21	23	24	26	28	29	31	33
24	22	23	25	26	28	29	31	32	33	34	35	17	19	20	22	24	26	27	29	31	32	34
25	23	24	26	27	29	30	32	33	35	36	38	18	19	21	23	25	27	28	30	32	34	35
26	24	25	27	28	30	32	33	35	36	38	39	18	20	22	24	26	28	29	31	33	35	37
27	25	26	28	29	31	33	34	36	38	39	41	19	21	23	25	27	29	31	32	34	36	38
28	25	27	29	30	32	34	36	37	39	41	42	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
29	26	28	30	32	33	35	37	39	40	42	44	20	22	25	27	29	31	33	35	37	39	41
30	27	29	31	33	34	36	38	40	42	43	45	21	23	25	27	30	32	34	36	38	40	42
31	28	30	32	34	35	37	39	41	43	45	47	22	24	26	28	31	33	35	37	39	41	44
32	29	31	33	35	37	39	40	42	44	46	48	22	25	27	29	31	34	36	38	40	43	45
33	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	23	25	28	30	32	35	37	39	42	44	46
34	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49		24	26	29	31	33	36	38	40	43	45	48
35	31	34	36	38	40	42	44	46	48	50		24	27	29	32	34	37	39	42	44	46	49
36	32	34	37	39	41	43	45	47	50			25	28	30	33	35	38	40	43	45	48	50
37	33	35	38	40	42	44	46	49				26	28	31	34	36	39	41	44	46	49	
38	34	36	39	41	43	45	48	50				26	29	32	34	37	40	42	45	48	50	
39	35	37	40	42	44	46	49					27	30	33	35	38	41	43	46	49		
40	36	38	40	43	45	48	50					28	31	33	36	39	42	44	47	50		
41	37	39	41	44	46	49						28	31	34	37	40	43	45	48			
42	37	40	42	45	47	50						29	32	35	38	41	44	47	49			
43	38	41	43	46	48							30	33	36	39	42	45	48				
44	39	42	44	47	49							30	33	36	39	42	46	49				
45	40	43	45	48	50							31	34	37	40	43	46	50				
46	41	43	46	49								32	35	38	41	44	47					
47	41	44	47	50								32	36	39	42	45	48					
48	42	45	48									33	36	39	43	46	49					
49	43	46	49									34	37	40	44	47	50					
50	44	47	50									34	38	41	44	48						
51	45	48										35	38	42	45	49						
52	46	49										35	39	43	46	50						
53	46	49										36	40	43	47							
54	47	50										37	40	44	48							
55	48											37	41	45	48							
56	49											38	42	45	49							
57	50											39	42	46	50							
58	50											39	43	47								
59												40	44	48								
60												40	44	48								

Nota: La zona en blanco indica que no es aplicable, debido a que el ventilador tiene una frecuencia máxima de 50 Hz.

Temperatura aire precalentado: 170°C

CUADRO 19. Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GMR (humedad Producto de salida de 55 y 60%)

		Humedad Producto a la Salida %																																							
		55%										60%																													
		Humedad Producto a la Entrada %																																							
		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90																		
Frecuencia Bomba Descarga de Estanque Repulpador Hz		Frecuencia Ventilador Hz																																							
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
20	26	27	28	29	30	31	32	34	35	36	37	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35																			
21	27	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	25	26	27	28	30	31	32	33	35	36	37																			
22	29	30	31	32	33	34	36	37	38	39	40	26	27	28	30	31	32	34	35	36	38	39																			
23	30	31	32	34	35	36	37	38	40	41	42	27	28	30	31	32	34	35	36	38	39	41																			
24	31	33	34	35	36	38	39	40	41	43	44	28	30	31	32	34	35	37	38	39	41	42																			
25	33	34	35	36	38	39	40	42	43	44	46	29	31	32	34	35	37	38	40	41	42	44																			
26	34	35	37	38	39	41	42	43	45	46	47	30	32	33	35	37	38	40	41	43	44	46																			
27	35	36	38	39	41	42	44	45	46	48	49	32	33	35	36	38	39	41	43	44	46	47																			
28	36	38	39	41	42	44	45	47	48	49		33	34	36	38	39	41	43	44	46	47	49																			
29	38	39	41	42	44	45	47	48				34	36	37	39	41	42	44	46	47	49																				
30	39	40	42	43	45	47	48					35	37	38	40	42	44	45	47	49																					
31	40	42	43	45	46	48						36	38	40	41	43	45	47	49																						
32	41	43	45	46	48							37	39	41	43	45	46	48																							
33	43	44	46	48	49							38	40	42	44	46	48																								
34	44	46	47	49								39	41	43	45	47	49																								
35	45	47	49									40	43	45	47	49																									
36	46	48										42	44	46	48																										
37	47	49										43	45	47	49																										
38	49											44	46	48																											
39												45	47	49																											
40												46	48																												
41												47	49																												
42												48																													
43												49																													
44																																									
45																																									
46																																									
47																																									
48																																									
49																																									
50																																									
51																																									
52																																									
53																																									
54																																									
55																																									
56																																									
57																																									
58																																									
59																																									
60																																									

Nota: La zona en blanco indica que no es aplicable, debido a que el ventilador tiene una frecuencia máxima de 50 Hz.
Temperatura aire precalentado: 160°C

CUADRO 20. Parámetros de operación estandarizados para secado de extracto GMR (humedad Producto de salida de 65 y 70%)

		Humedad Producto a la Salida %																														
		65										70																				
		Humedad Producto a la Entrada %																														
		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90									
Frecuencia Bomba Descarga de Estanque Repulpador Hz		Frecuencia Ventilador Hz																														
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	16	17	19	20	22	24	25	27	28	30
20	20	22	23	24	26	27	28	30	31	32	34											16	17	19	20	22	24	25	27	28	30	31
21	21	23	24	25	27	28	30	31	32	34	35											16	18	20	21	23	25	26	28	30	31	33
22	22	24	25	27	28	30	31	33	34	35	37											17	19	21	22	24	26	28	29	31	33	34
23	23	25	26	28	29	31	32	34	36	37	39											18	20	22	23	25	27	29	31	32	34	36
24	24	26	27	29	31	32	34	35	37	39	40											19	21	23	24	26	28	30	32	34	36	38
25	25	27	28	30	32	33	35	37	39	40	42											20	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
26	26	28	30	31	33	35	37	38	40	42	43											20	22	24	26	28	30	32	35	37	39	41
27	27	29	31	32	34	36	37	39	41	43	45											21	23	25	27	29	32	34	36	38	40	42
28	28	30	32	34	36	37	39	41	43	45	47											22	24	26	28	31	33	35	37	39	41	44
29	29	31	33	35	37	39	41	43	44	46	48											23	25	27	29	32	34	36	38	41	43	45
30	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48												23	26	28	30	33	35	37	40	42	44	47
31	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49												24	26	29	31	34	36	38	41	43	46	48
32	32	34	36	38	40	42	45	47	49													25	27	30	32	35	37	40	42	45	47	
33	33	35	37	39	42	44	46	48														26	28	31	33	36	38	41	43	46	49	
34	34	36	38	41	43	45	47															26	29	32	34	37	39	42	45	47		
35	35	37	39	42	44	46	49															27	30	32	35	38	40	43	46	49		
36	36	38	40	43	45	48																28	31	33	36	39	42	44	47			
37	37	39	41	44	46	49																28	31	34	37	40	43	46	48			
38	38	40	43	45	48																	29	32	35	38	41	44	47				
39	38	41	44	46	49																	30	33	36	39	42	45	48				
40	39	42	45	47																		31	34	37	40	43	46	49				
41	40	43	46	48																		31	34	38	41	44	47					
42	41	44	47	49																		32	35	38	42	45	48					
43	42	45	48																			33	36	39	43	46	49					
44	43	46	49																			33	37	40	44	47						
45	44	47																				34	38	41	44	48						
46	45	48																				35	38	42	45	49						
47	46	49																				36	39	43	46							
48	47																					36	40	44	47							
49	48																					37	41	44	48							
50	48																					38	41	45	49							
51	49																					38	42	46								
52																						39	43	47								
53																						40	44	48								
54																						40	45	49								
55																						41	45	49								
56																						42	46									
57																						43	47									
58																						43	48									
59																						44	48									
60																						45	49									

Nota: La zona en blanco indica que no es aplicable, debido a que el ventilador tiene una frecuencia máxima de 50 Hz.

Temperatura aire precalentado: 160°C

5. CONCLUSIONES

- Fue posible estandarizar en forma teórica la operación de secado de carragenina
- El punto crítico del extracto GWG está ubicado en 3 kg de agua por kg de masa seca, es decir alrededor de 75% de humedad.
- El modelo de secado encontrado es un polinomio de tercer grado y es aplicable en el periodo de velocidad decreciente de secado, después del punto crítico.
- Se determinó una eficiencia en el secador con respecto al tiempo de secado de 28,4 % y en cuanto a la pérdida de agua en el producto de 39,7 %.
- Es necesario realizar un estudio sobre las causas de las pérdidas energéticas ya que problemas como la aislación térmica inadecuada afectan directamente la eficiencia energética.
- Al minimizar el contenido de agua en el producto que ingresa al secador de un 87% a un 80 %, el ahorro económico sería de un 41% del consumo de energía de evaporación.
- Es una necesidad ampliar la capacidad de repulpado para mejorar la calidad de la fibra y de esta manera mejorar el proceso de prensado.
- El uso de las cartas de control desarrolladas no minimizan las pérdidas energéticas, ni tampoco bajan el consumo de combustible, sólo sirven para estabilizar las condiciones operacionales y el contenido de agua en el producto final.
- Para aumentar el control y la efectividad en los estudios se hace necesario un estudio de factibilidad económica en la automatización de la operación de secado.

6. RESUMEN

El objetivo de este estudio es la estandarización del proceso de secado de la carragenina, el cual se realiza en un secador de lecho fluidizado. Se utilizó la estática de secado, midiendo el contenido de agua del producto a la entrada y a la salida del secador, y además se registraron datos del control de proceso. Por otro lado, se realizó un estudio acerca de la cinética de secado del extracto GWG, el que se caracteriza por tener una alta proporción de carragenina *Kappa I* y menor proporción de *Kappa II*. Se implementaron ensayos cinéticos a dos temperaturas diferentes de 80 y 100 °C. De la estática de secado se cuantificaron las pérdidas energéticas, las que constituyen alrededor de 115%, equivalente a más de la mitad del consumo energético en el secador. Se determinó la pérdida de eficiencia evaporativa, finalmente se estandariza el flujo y la temperatura del aire requerida para diferentes flujos y humedad del producto, para los extractos GWG y GMR. Del estudio cinético se determinaron los parámetros de proceso, tales como la constante de tiempo, el punto crítico y se obtuvo un modelo de secado como un polinomio de tercer grado, además se obtuvo el coeficiente de vaporización y su correlación con la humedad del producto. Finalmente se determinó la eficiencia del secador en cuanto al tiempo de proceso y a la pérdida de agua provocada en el producto, los que fueron de 28,4 % y 39,7 % respectivamente. Tanto del ensayo cinético como de la estática de secado se confirmó la alta importancia económica que tiene el hecho de bajar el contenido de agua en el producto que entra al secador a través de un mejoramiento del proceso de prensado que precede y, automatizar los equipos para mejorar el control del proceso.

SUMMARY

The aim of this work was to find a mode for a standard control of the drying process of carrageenan, implemented in a fluidized bed dryer. The process was analysed with the help of a balance of matter for the drying process, measuring water content of the product at inlet and outlet of the dryer, and registering data from control board in production line. The kinetics of the drying process for an extract of carrageenan, extract GWG with a predominant content of *Kappa I* carrageenan and a minor proportion of *Kappa II* carrageenan, was determined through experiments at two different temperatures, namely 80 and 100 °C. From the balance of matter, energy loss was estimated and found to lie around 115 %, which was equivalent to more than half of the energy consumed for evaporation in the dryer. Loss in evaporative efficiency was also determined and standard values for air flow and air temperature were calculated for different conditions of flow rate and moisture content for the two carrageenan extracts, GWG and GMR. From the kinetics studies, process parameters, like time constant and critical point among others, were obtained, and a model for the drying process in the form of a polynomial function of third degree, was developed. Furthermore coefficient of vaporization for the process was obtained and its correlation to moisture content of product at inlet was found. Finally the efficiency of the dryer with respect to process duration and water loss was estimated to lie around 28.4 % and 39.7 % respectively. Through both balance of matter and kinetics essays, it was possible to show that it is of utmost importance to reduce the water content of the product at dryer inlet by improving the compression process which precede drying, and also to introduce automatization for process control.

7. BIBLIOGRAFIA

- CUVERTINO V. 2004. Comportamiento de secado de Pulpa de Murta (*Ugni molinae* Turcz) y estimación del consumo energético en la deshidratación de una lámina de fruta. Tesis Lic. en Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. <<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/fac992c/html/index-frames.html>>.
- BRENNAN J. et al.1998. Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos. Tercera Edición. Acribia.
- PERRY R.1992. Manual del Ingeniero Químico. Sexta edición. Mc Graw-Hill. México. 12-63 p.
- McCABE W et al. 1991. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Cuarta edición. Mc Graw-Hill.1112 p
- POTTER N, HOTCHKISS, J. 1995. Ciencia de los Alimentos. Quinta edición. Acribia.
- URRUTIA R. 2006. Diseño de un Secador Piloto de Lecho Fluidizado para Biomasa Forestal. Tesis Ing. Mecánico. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 124 p.
- VEGA A, ANDRES A, y FITO P. 2005. Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (*Capsicum annuum* L. cv Lamuyo). Información Tecnológica. (Chile) 16 (6). http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-7642005000600002&lng=es&nrm=iso (19 Nov. 2006).
- www.sc.ehu.es/nmwmigaj/SECADERO.htm. <16 Ago. 2006>
- www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S00.htm. <28 Ago. 2006>

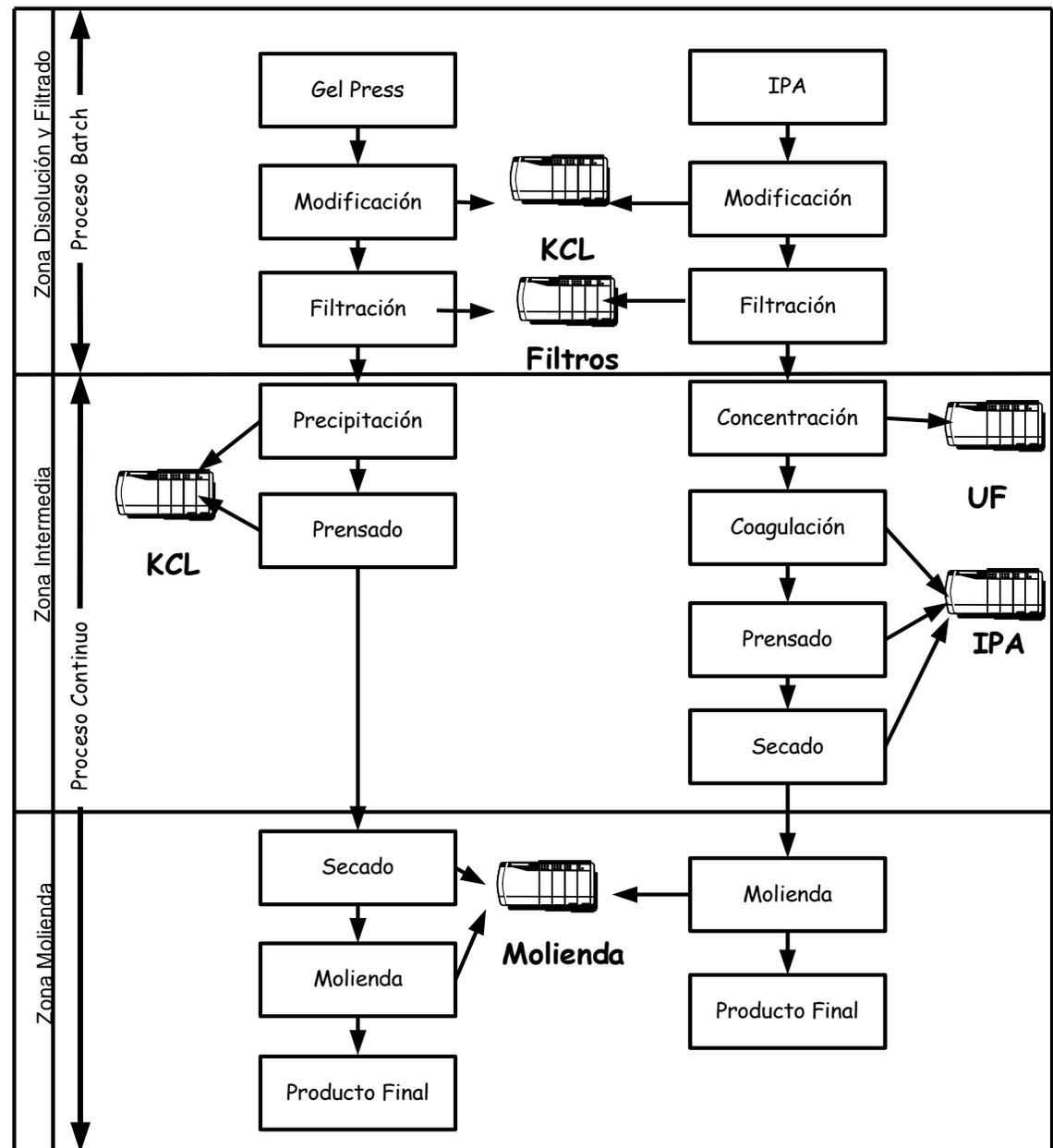
[http://200.13.98.241/~rene/separacion/manuales/psneu.pdf#search=%22secado%20por%20transporte%20neumatico%](http://200.13.98.241/~rene/separacion/manuales/psneu.pdf#search=%22secado%20por%20transporte%20neumatico%20).<22 Ago. 2006>

www.gelymar.com. <05 Ene. 2007>

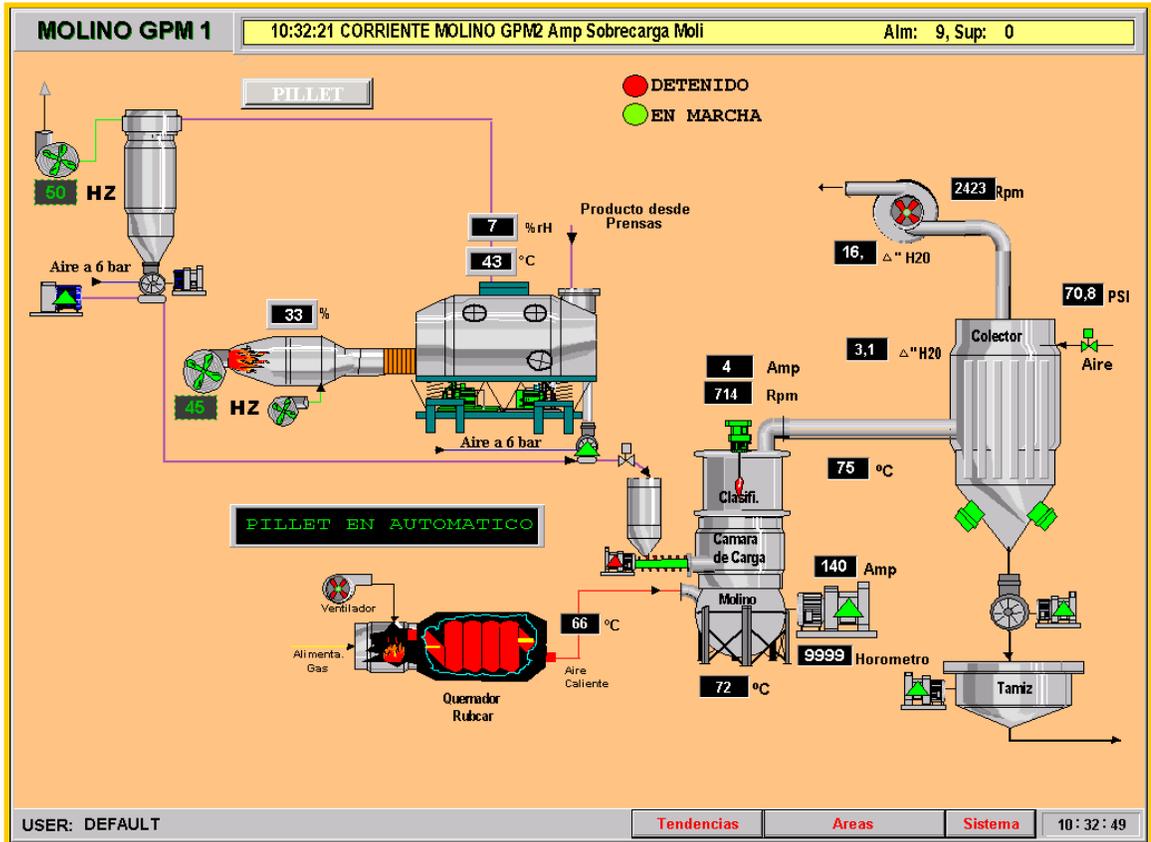
<http://www.monografias.com/trabajos15/operacion-secado/operacion-secado.shtml><03 Dic. 2007>

ANEXOS

ANEXO 1. Diagrama de flujo del proceso de carragenina de ambas líneas de la planta



ANEXO 2. Pantalla del computador de control de la zona secado – molienda de la línea gel – press

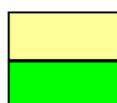


ANEXO 3. Datos registrados del ensayo cinético de secado

Tiempo min	Humedad kg/kg		Tiempo min	Humedad kg/kg	
	1869			1895	
	100	80		100	80
0	8,2593	8,2593	0	5,2893	5,2893
15	5,7850	6,8301	15	3,8854	4,2603
30	3,0421	5,5011	30	2,5654	3,3812
45	1,5149	4,4126	45	1,5107	2,5319
60	0,4518	3,0296	60	0,6955	1,8355
90	0,0277	0,9092	75	0,2621	1,2015
120	0,0277	0,1871	90	0,0497	0,7557
150		0,0405	105	0,0156	0,3395
180		0,0325	120	0,0118	0,1680
			135	0,0065	0,0904
					0,0657
					0,0581

ANEXO 4. Datos de evaluación del tiempo de proceso bajo las condiciones reales de proceso

Lote	Tiempo teórico	T ₂	Caudal aire
	min	°C	m ³ /h
158	20.20	157.8	32836.50
159	19.55	160.1	32836.50
160	40.25	157.8	32836.50
161	25.72	152.0	32836.50
162	30.91	132.2	32836.50
163	25.14	152.6	32836.50
165	56.28	130.0	32836.50
166	21.91	156.0	32836.50
167	24.65	136.0	32836.50
168	22.93	157.6	32836.50
169	22.75	148.2	32836.50
170	22.67	138.9	32836.50
171	32.97	131.0	32836.50
172	27.18	157.0	32836.50
173	23.37	146.0	32836.50
174	26.13	138.0	32836.50
175	21.20	164.1	32836.50
1662	39.08	195.1	36485.00
1662	13.34	186.1	36485.00
1663	13.67	197.2	36485.00
1667	18.03	255.6	36529.90
1667	8.01	270.2	36485.00
1668	18.37	216.9	36485.00
1675	46.02	132.5	45241.40
1676	37.55	133.1	45241.40
1698	29.61	125.1	47430.50
1699	25.98	133.2	47430.50
1704	17.14	163.0	34295.90
1704	15.13	155.3	32836.50
1704	29.93	121.3	32836.50
1729	16.22	158.3	33566.20
1729	33.93	131.1	33566.20
1737	44.06	106.0	33566.20
1737	54.65	113.7	33566.20
1743	33.87	145.7	33566.20
1743	40.75	136.0	33566.20
1743	32.49	108.3	32106.80
1743	22.80	136.4	32106.80
1802	53.09	92.2	35025.60
1803	27.02	126.2	34295.90

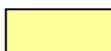


Batch donde el tiempo teórico se acerca al tiempo real

Batch donde el tiempo teórico se aleja al tiempo real

ANEXO 5. Datos de evaluación de la pérdida de humedad bajo las condiciones reales de proceso

Lote	T ₂	Caudal aire m ³ /h	Teórico	Real
	°C		Pérdida X kg/kg h	Pérdida X kg/kg h
158	157.8	32836.50	11.54	2.79
159	160.1	32836.50	10.80	2.56
160	157.8	32836.50	9.52	4.74
161	152.0	32836.50	11.55	3.50
162	132.2	32836.50	9.31	3.48
163	152.6	32836.50	8.75	3.17
165	130.0	32836.50	5.32	4.49
166	156.0	32836.50	12.66	2.93
167	136.0	32836.50	8.30	2.45
168	157.6	32836.50	13.91	3.09
169	148.2	32836.50	9.05	2.30
170	138.9	32836.50	8.39	2.41
171	131.0	32836.50	8.15	3.54
172	157.0	32836.50	13.15	3.90
173	146.0	32836.50	7.91	2.05
174	138.0	32836.50	7.38	2.03
175	164.1	32836.50	12.21	2.68
1662	195.1	36485.00	7.21	4.69
1662	186.1	36485.00	8.70	1.66
1663	197.2	36485.00	14.40	2.67
1667	255.6	36529.90	20.28	4.33
1667	270.2	36485.00	14.53	1.82
1668	216.9	36485.00	15.77	3.87
1675	132.5	45241.40	5.06	4.03
1676	133.1	45241.40	7.45	4.01
1698	125.1	47430.50	7.06	3.12
1699	133.2	47430.50	9.69	3.20
1704	163.0	34295.90	9.23	2.48
1704	155.3	32836.50	2.87	0.67
1704	121.3	32836.50	5.26	2.78
1729	158.3	33566.20	10.08	2.37
1729	131.1	33566.20	6.35	3.46
1737	106.0	33566.20	4.73	3.43
1737	113.7	33566.20	4.95	4.24
1743	145.7	33566.20	7.13	3.79
1743	136.0	33566.20	5.94	3.95
1743	108.3	32106.80	6.37	3.54
1743	136.4	32106.80	8.94	2.47
1802	92.2	35025.60	4.37	3.52
1803	126.2	34295.90	10.46	3.01

 Batch donde la pérdida de agua teórica se acerca a lo real.

 Batch donde la pérdida de agua teórica se aleja de lo real.

ANEXO 6. Lotes monitoreados y analizados para cada extracto

Extracto GWG

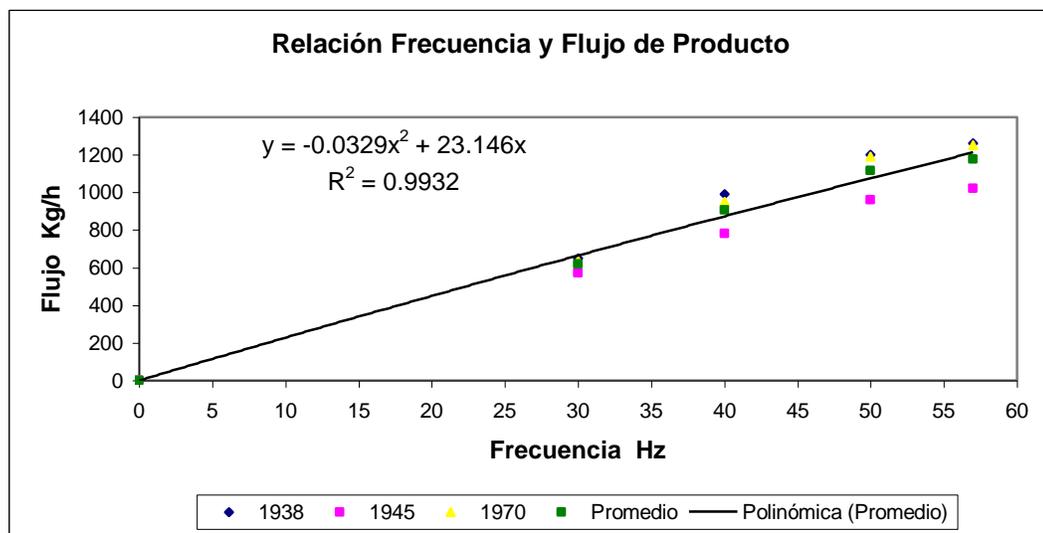
Fecha	Lote	Fecha	Lote
03-10-2006	1662	29-01-2007	158
03-10-2006	1662	29-01-2007	159
03-10-2006	1663	29-01-2007	160
04-10-2006	1667	29-01-2007	161
04-10-2006	1667	29-01-2007	162
04-10-2006	1668	29-01-2007	163
06-10-2006	1675	29-01-2007	165
06-10-2006	1676	30-01-2007	166
11-10-2006	1698	30-01-2007	167
11-10-2006	1699	30-01-2007	168
12-10-2006	1704	30-01-2007	169
16-10-2006	1704	30-01-2007	170
16-10-2006	1704	30-01-2007	171
17-10-2006	1729	31-01-2007	172
17-10-2006	1729	31-01-2007	173
18-10-2006	1737	31-01-2007	174
18-10-2006	1737	31-01-2007	175
19-10-2006	1743		
19-10-2006	1743		
30-10-2006	1802		
30-10-2006	1803		

Extracto GMR

Fecha	Lote	Fecha	Lote
07-09-2006	1565	31-01-2007	177
07-09-2006	1565	01-02-2007	178
08-09-2006	1569	01-02-2007	179
08-09-2006	1569	01-02-2007	180
08-09-2006	1569	01-02-2007	181
08-09-2006	1569	01-02-2007	182
12-09-2006	1588	01-02-2007	183
12-09-2006	1588	01-02-2007	184
12-09-2006	1588	01-02-2007	185
12-09-2006	1588	02-02-2007	186
13-09-2006	1593	02-02-2007	187
13-09-2006	1593	02-02-2007	188
13-09-2006	1593	02-02-2007	189
14-09-2006	1597	02-02-2007	190
14-09-2006	1597		
14-09-2006	1597		
15-09-2006	1603		
15-09-2006	1603		

ANEXO 7. Datos y curva que determina la relación frecuencia y flujo de producto prensado - pelletizado

FBR Hz	VP2 Hz	Flujo producto kg/h
		0,00
30	15	618,67
40	25	906,67
50	25	1116,67
57	28	1176,67

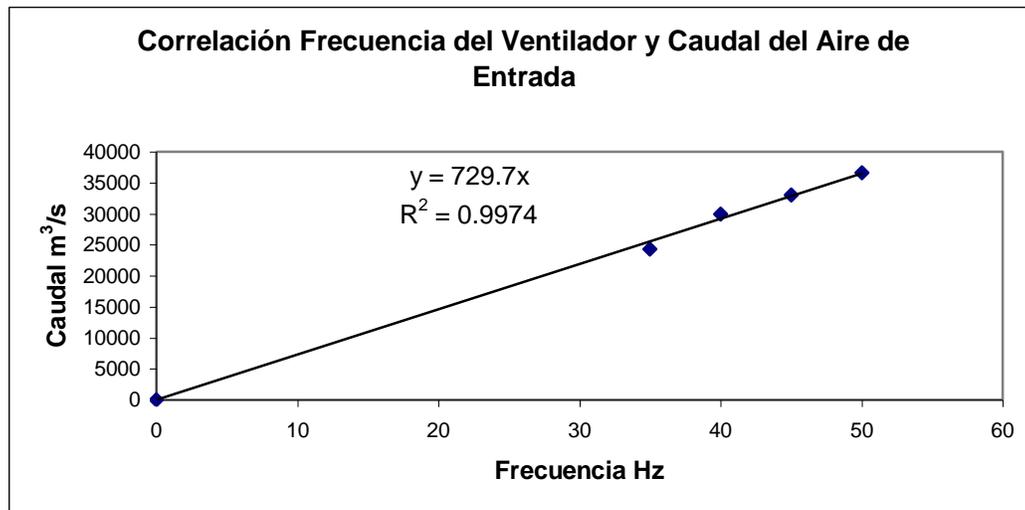


ANEXO 8. Datos y curva que determina la relación frecuencia y caudal de aire impulsado por el ventilador

Frecuencia Hz	Velocidad m/s	Caudal de Aire	
		m ³ /s	m ³ /h
0	0	0	0
35	20,86	6,74	24280,87
40	25,70	8,31	29920,97
45	28,36	9,17	33012,67
50	31,46	10,17	36621,82

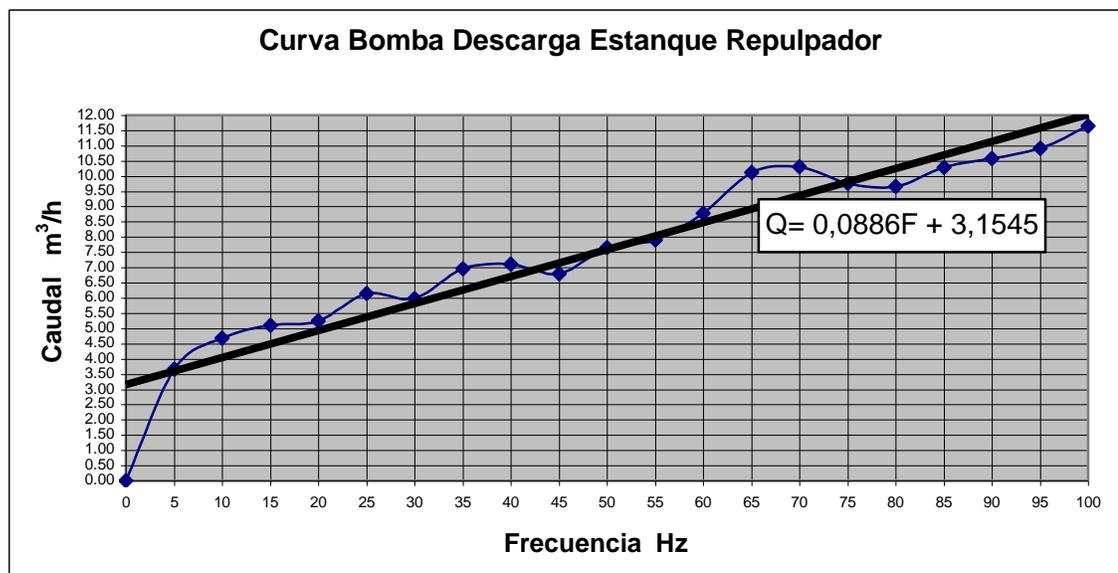
Área del ducto de entrada de aire

Radio m	Area m ²
0,320855615	0,3234



ANEXO 9. Datos y curva que relaciona la velocidad de la bomba de descarga del repulpador y el caudal de producto

F Hz	Caudal m ³ /h
0	3,1545
5	3,5975
10	4,0405
15	4,4835
20	4,9265
25	5,3695
30	5,8125
35	6,2555
40	6,6985
45	7,1415
50	7,5845
55	8,0275
60	8,4705
65	8,9135
70	9,3565
75	9,7995
80	10,2425
85	10,6855
90	11,1285
95	11,5715
100	12,0145



ANEXO 10. Fotografía del Secador de lecho fluidizado



ANEXO 11. Nomenclatura de términos utilizados en el desarrollo del estudio

Simbolo	Significado
A/M_s	Superficie activa específica m^2/kg
σ	Coefficiente de vaporización $kg/m^2 \text{ min}$
ρ_1	Densidad del aire fresco kg/m^3
h_2	Entalpía del aire caliente de entrada al secador $kcal/kg$
h_3	Entalpía del aire de salida del secador $kcal/kg$
h_1	Entalpía del aire fresco $kcal/kg$
M_c/M_B	Flujo específico de aire kg/kg
Q/M_B	Flujo específico de calor $kcal/kg$
FBR	Frecuencia bomba descarga estanque repulpador Hz
FVE	Frecuencia ventilador aire entrada al secador Hz
Y_2	Humedad absoluta del aire caliente kg/kg
Y_3	Humedad absoluta del aire de salida del secador kg/kg
Y_1	Humedad absoluta del aire fresco kg/kg
Y_p	Humedad de saturación kg/kg
X_0	Humedad promedio inicial kg/kg
M_s	Masa seca kg
PEE	Pérdidas de eficiencia evaporativa kg/kg
Q_{perd}	Pérdidas energéticas $kcal/kg$
T_{bh}	Temperatura bulbo húmedo del aire fresco $^{\circ}C$
T_{bs}	Temperatura bulbo seco del aire fresco $^{\circ}C$
T_2	Temperatura del aire caliente $^{\circ}C$
T_3	Temperatura del aire de salida del secador $^{\circ}C$
t_p	Tiempo de proceso teórico total min
t_a	Tiempo adicional al tiempo crítico obtenido con el modelo de secado min
H_t	Pérdida de humedad teórica en el producto $kg/kg \text{ h}$
H_r	Pérdida de humedad real en el producto $kg/kg \text{ h}$
VP2	Velocidad tela de la prensa N° 2 Hz