

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

FACULTAD DE QUIMICA

186

**ESTUDIO DEL SECADO DE UN  
PRODUCTO TERMOSENSIBLE**

**T E S I S**  
Que para obtener el título de:  
INGENIERO QUIMICO  
p r e s e n t a  
JESUS ENRIQUE ORTIZ GALVEZ

México, D. F.

1973

M-165611



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

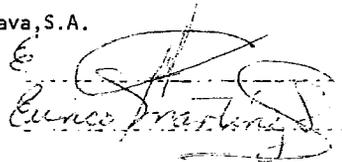
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PRESIDENTE: Prof. ALBERTO BREMAUNTZ MONGE  
VOCAL: " JOSE E. GALINDO FUENTES  
SECRETARIO " ENRICO MARTINEZ SAENZ  
1er. Suplente " LUCIA ARCINIEGA CARRILLO  
2o. Suplente " CARLOS CASTAÑEDA ESTRADA

Sitio donde se desarrolló el tema: Química Lucava, S.A.

SUSTENTANTE: JESUS ENRIQUE ORTIZ GALVEZ

ASESOR DEL TEMA: ENRICO MARTINEZ SAENZ



ESTUDIO DEL SECADO DE  
UN PRODUCTO TERMOSENSIBLE.

A MIS PADRES.

EN TESTIMONIO DE MI AGRADECIMIENTO

A OTILIA

A MIS HERMANOS

Al Lic. Luis Cano Vázquez, mi profundo agradecimiento por el estímulo y facilidades que me brindó para el desarrollo del presente trabajo. Asimismo, lo hago extensivo al Sr. Ing. Miguel Jiménez y Jiménez.

Deseo destacar mi gratitud a los Sres. Ing. J. Uriel Aréchiga Viramontes e Ing. Bernardo Gil Bailach, por sus consejos y enseñanzas, tanto en la elaboración de este estudio, como en mi formación profesional. También, de manera especial, al Dr. Enrico Martínez Saenz por su decidida colaboración en la realización y revisión del estudio objeto de esta tesis.

## I N D I C E .

## RESUMEN

- CAPITULO I.- INTRODUCCION.
- CAPITULO II.- OBJETIVOS.
- CAPITULO III.- CONSIDERACIONES TEORICAS  
Y ANTECEDENTES.
- CAPITULO IV.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.
- CAPITULO V.- DISCUSION DE RESULTADOS.
- CAPITULO VI.- SELECCION Y DISEÑO.
- CAPITULO VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

## BIBLIOGRAFIA.

## APENDICE.

## R E S U M E N

Capítulo I.- Se hace un breve esbozo del problema del secado del producto termosensible y se destaca la necesidad de realizar su estudio con pruebas a nivel semicomercial, en tres tipos de secadores, además de satisfacer cierta demanda del producto termosensible. (clo rofos)

Capítulo II.- Objetivos. Se puntualizan los objetivos que se persiguen con el presente estudio y se fija el alcance del mismo.

Capítulo III.-Consideraciones teóricas y antecedentes. Breve análisis de la teoría del secado y su aplicación a nuestro caso particular. Se da la información necesaria para la selección del equipo de secado y las características fisicoquímicas que interesan desde el punto de vista del secado, independientemente de su nombre técnico o comercial. Se clasifican los equipos de secado existentes y se evalúan para su posible aplicación.

Capítulo IV.- Procedimiento experimental. Descripción de las pruebas realizadas en los diferentes equipos de secado.

Capítulo V.- Discusión de resultados. Se realiza un análisis de los resultados obtenidos con los diferentes equipos de secado.

Capítulo VI.- Selección y Diseño. Se selecciona el equipo más apropiado para el secado del producto termosensible, se diseña y determina su costo.

Capítulo VII.-Conclusiones y recomendaciones. Se destacan los resultados más significativos del presente.-

estudio y se apuntan ciertas recomendaciones derivadas del desarrollo del mismo.

Apendice.- Concentracion de tablas,gráficas y figuras con -  
el objeto de facilitar su consulta.

Bibliografía.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

Como parte del proceso de fabricación de un producto básico, nos encontramos con la necesidad de secar un material que presenta características muy particulares, entre las que destacan; ser termosensible, con punto de fusión bajo, tóxico y corrosivo.

Puesto que en la operación de secado es necesario para obtener mejores rendimientos, utilizar temperaturas -- elevadas, nuestro producto presenta una limitación de inmediato, porque no puede someterse a temperaturas superiores de 60°C. Por otro lado el producto húmedo -- puede ser altamente corrosivo debido a que su molécula contiene Cloro y tiene gran tendencia a formar Acido - Clorhídrico en presencia de agua.

Un problema adicional se presenta debido a la facilidad con que el producto se aglomera y forma tortas, cuyo tamaño dificulta tanto el transporte como el secado del mismo.

Debido a las dificultades antes expuestas, se decidió recurrir al asesoramiento de compañías especializadas en el diseño y construcción de equipos de secado. Sin embargo, la mayoría de ellas después de analizar el -- problema y particularidades del producto, se decidieron

no atacarlo y solamente retrasaron constantemente los resultados de sus pruebas preliminares y las cotizaciones del equipo adecuado, además de que algunas estimaciones previas, resultaron con un costo sumamente elevado.

Cabe destacar que a pesar de que existe una teoría de secado como operación unitaria, es sumamente difícil aplicarla a este caso particular debido a las particularidades que presenta el producto, por lo cual resulta necesario proceder en la forma que a continuación se detalla para poder diseñar el secador, en lugar de simplemente aplicar las ecuaciones de transporte y equilibrio líquido-vapor indicadas en el caso general de la operación de secado.

Por los problemas anteriormente expuestos, se vió la necesidad de iniciar pruebas con los medios de que se disponían con el siguiente plan de trabajo:

- 1) Investigación de los diferentes procesos de secado existentes.
- 2) Investigación experimental a escala -- del laboratorio para precisar algunas de las variables del producto.
- 3) Pruebas piloto a nivel semicomercial - con secadores de charolas, rotatorio y de lecho fluidizado. Esta etapa resulta de vital importancia, ya que --- además de proporcionar datos para el - diseño del secador comercial, es necesario satisfacer, en cierta medida, la - demanda inmediata del mercado.

## CAPITULO II

### OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen con el presente trabajo son:

- 2.1.- Determinar experimentalmente las variables - y limitaciones del secado de nuestro producto en particular, tales como las siguientes:
  - 1) Puntos de fusión.- Para precisar los límites de calentamiento del producto termosensible en función de su contenido de humedad.
  - 2) Impurezas.- Interesan desde el punto de vista de secado, ya que afectan notablemente el punto de fusión.
  - 3) Contenido de humedad.- Esta variable es la más importante a determinar desde el punto de vista del secado.
  - 4) Tamaño de partícula.- Nos sirve para normar nuestro control del proceso, en las operaciones anteriores del secado, como se aprecia en el diagrama de flujo (fig.1).
  
- 2.2.- Evaluar los tipos de secadores aplicables a este caso particular y determinar el régimen de trabajo en:
  - 1) Charolas.
  - 2) Rotatorio.
  - 3) Lecho fluidizado.
  
- 2.3 Diseñar y construir el secador comercial que nos proporcione el material en condiciones - óptimas.

## CAPITULO III

Consideraciones teóricas y antecedentes.

3.1.- Aspectos teóricos del secado.

1) Teoría del secado.

3.2.- Información necesaria para la selección del -  
equipo de secado.

1) Características fisicoquímicas del producto.

2) Situación particular de la planta y servi--  
cios.

3) Capacidad del equipo de secado.

4) Especificaciones del producto seco.

3.3.- Clasificación de los equipos de secado.

3.4.- Evaluación de los tipos de secadores.

### 3.1 Aspectos teóricos del secado.

#### 3.1.1.- Teoría del secado.

Después de haber consultado la literatura existente sobre la teoría del secado, ( 3, 4, 8, 13 ), se encuentra que no --- existe una teoría unificada al respecto, y está fragmentada en libros de operaciones unitarias o en algunos resúmenes de revistas de ingeniería química.

Existen fundamentos generales derivados de las relaciones de equilibrio sólido-- líquido-gas, que solamente sirven de guía para la evaluación y selección del equipo de secado y no para el diseño cuantitativo del mismo, ya que los mecanismos--físicoquímicos involucrados lo hacen verdaderamente imposible.

Los fenómenos que ocurren durante el secado todavía no están bien determinados ni comprendidos, además de que varían --sensiblemente con cada producto. Esto --deriva en una dificultad para predecir --la curva de velocidad de secado, la de--terminación del area de transferencia de calor y de masa, la humedad de equilibrio, la mecánica de fluidos, el efecto de la--estructura del sólido y las transferen--cias mismas de calor y de masa.

Seleccionamos del aspecto teórico generalmente aceptado, los puntos más prácticos para nuestro estudio.

Se considera generalmente al secado, como - la transferencia de líquido desde un sólido a una fase gaseosa no saturada, normalmente aire.

Durante esta operación se observa un patrón general de comportamiento en el que se presenta básicamente dos períodos de secado; - un período de velocidad de secado constante y otro de velocidad de secado decreciente.

a).- Período de velocidad de secado constante.

Al iniciarse el secado, generalmente se presenta el período de velocidad de secado - - constante, para determinadas condiciones de gas a la entrada del sistema constantes.

Durante este período la temperatura del sólido húmedo alcanza la temperatura de saturación del gas.

Estas condiciones relativamente estables -- permanecerán hasta que la superficie del sólido permanezca húmeda y alcance su contenido crítico de humedad.

En este período el secado se realiza principalmente, debido a un gradiente entre la -- presión parcial del vapor de agua, en el -- sólido y la presión parcial del vapor de agua en el aire a la temperatura de secado.

El calor latente de vaporización necesario, - lo suministra el aire por transmisión de calor, por convección principalmente, entre éste y el sólido húmedo, realizándose la transferencia del agua del sólido al aire.

Los principales factores que afectan durante este período son:

- 1) Coeficiente de transferencia de calor y masa.
- 2) Área expuesta a la transferencia.
- 3) Gradiente de presiones.
- 4) Contenido crítico de humedad.

Estos factores se consideran de tipo externo y son independientes del sólido a secar.

Para este período se han desarrollado ecuaciones para calcular la velocidad de secado, con tales restricciones, que solo sirven de un modo estimativo y en donde este período controla la operación de secado a régimen intermitente. ( 1 ).

$$V_s = \frac{h_s}{\lambda} ( T_s - T_i )$$

$V_s$  = Velocidad de secado lb evaporados por hora y pie cuadrado de superficie.

$T_s$  = Temperatura del gas.

$T_i$  = Temperatura de la interfase ( bulbo - húmedo ).

El coeficiente anterior para el caso del aire se ha llegado a correlacionar obteniendo las siguientes ecuaciones empíricas: - - ( 13 ).

$$h_c = 0.016^{0.8}$$

Flujo de aire paralelo a la superficie -

$$G = 500 - 6000 \frac{\text{lb.}}{\text{hr. Ft}^2} \quad (2 \text{ a } 25 \frac{\text{Ft}}{\text{seg.}})$$

$$h_c = 0.37G^{0.37}$$

Flujo de aire perpendicular a la superficie.

$$G = 800 - 4000 \frac{\text{lb}}{\text{hr. Ft}^2}$$

2).- Período de velocidad de secado decreciente.

En este período, la superficie del sólido ya no está completamente húmeda y la transferencia se realizará desde el interior al exterior del sólido.

La velocidad de secado irá decreciendo, -- por la dificultad de transferirse la humedad desde el interior del sólido a su superficie hasta que la velocidad llega a -- ser nula.

En este punto se alcanza el contenido de humedad del sólido en equilibrio con la fase gaseosa, que es el contenido de humedad más bajo que se puede alcanzar bajo unas condiciones de secado fijas.

Durante esta etapa la influencia del sólido es tan grande que modifica la presión parcial del vapor de agua contenida en su interior, la difusión de la humedad, etc.

Por esto podemos decir que los factores -- que influyen en este período son de tipo interno específicas del sólido a secar.

Los principales factores que controlan esta etapa son:

- 1) Mecanismo de difusión.
- 2) Reducción de la presión parcial del agua contenida en su interior.
- 3) Solubilidad.
- 4) Estructura del sólido.
- 5) Area de transferencia.

Para este período de secado no se han desarrollado ecuaciones satisfactorias, aún para efecto estimativo, por los fenómenos fisicoquímicos tan complicados que tienen lugar durante el mismo.

Para casos muy particulares y sencillos se ha llegado a aplicar la ecuación de -- Fick.

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = D_L = \frac{2 \bar{x}}{x^2}$$

$\bar{x}$  = Contenido de humedad en el tiempo o libras de líquido/libras de sólido seco.

$D_L$  = Coeficiente para la difusión de la fase líquida aplicable al movimiento a través de la fase sólida.

Aún en los casos sencillos DL, es raramente constante y las ecuaciones derivadas de la ecuación de Fick no se ajustan - adecuadamente a las curvas de secado. Durante el secado, - los sólidos cambian sus características estructurales, por lo que ha sido difícil determinar la velocidad y tiempo de secado durante el período de secado decreciente.

De lo anterior, para nuestro caso particular, procederemos a seguir algunos lineamientos derivados de la experimentación que se consignan en la literatura.

Información necesaria para la selección del equipo de secado.

### 3.2.1. Características fisicoquímicas del producto.

Nombre Técnico: 0,0 Dimetil-2,2,2 Tricloro  
1-Hidroxietyl Fosfonato.

Nombre Comercial: Clorofos.

Aspecto: sólido cristalino de color blanco y olor agradable. Cristaliza en agujas monoclinicas

Punto de Fusión: 79-80°C (99.99%)

Densidad: 1.73 20°C/4°C.

Volatilidad: 0.1 mg./m<sup>3</sup> a 20°C.

2.0 mg./m<sup>3</sup> a 40°C.

Solubilidad: Es soluble en alcoholes y acetona. En agua es de - 12% a 26°C y muy poco so-

luble en solventes aromáticos.

Propiedades corrosivas : Por tener cloro libre ataca los metales y sus aleaciones.

Toxicidad : LD<sub>50</sub> aguda 450-500 mg/kg. en ratas. (DDT LD<sub>50</sub> 113 mg/kg).

3.2.2.- Situación particular de la planta y servicios.

Es importante conocer la situación de la planta, como parte de la información necesaria -- para el buen diseño del equipo de secado.

- a) Fuente de calor. Dadas las características del producto, es mínimo el consumo de vapor y se requiere 1 kg/cm<sup>2</sup> de presión -- como máximo, por lo que no existe limitación de este servicio.
- b) Energía eléctrica. Existe la disponibilidad inmediata de 100 kw. por lo que no -- existe limitación para la fuerza motriz -- que pueda requerir el equipo de secado.
- c) Aire. Por la toxicidad y volatilidad del producto y por la legislación en materia de contaminación ambiental existente, se hace necesario un lavado alcalino del -- aire a la salida del equipo de secado.
- d) Espacio disponible. Se dispone de un espacio ya previsto para esta operación.
- e) Calidad del proceso. El diseño del secador deberá conducir a un equipo que no -- requiera de mucha mano de obra.

3.2.3.- Capacidad del equipo de secado.

Requerimiento: 1500 kg/día de producto seco.

Jornada de trabajo: 24 hr./día.

Humedad inicial: 7% en peso\* en promedio.

3.2.4.- Especificaciones del producto seco.

Concentración: 95% en peso mínimo.

Humedad final: 0.3% en peso máximo.

Tamaño de partícula: no existen especificaciones.

\*En adelante se entenderá que todos los porcentajes son en peso.

3.3.- Clasificación de los equipos de secado.

Para poder llevar a cabo una correcta selección del secador, agruparemos o clasificaremos los diversos equipos de secado desarrollados en la industria, con el objeto de facilitar la tarea de selección. A continuación presentamos cuatro formas de clasificar los secadores en base a:

- a) Método de operación (Tabla 1)
- b) Forma física de alimentación (Tabla 2)
- c) Escala de operación (Tabla 3)
- d) Características del producto (Tabla 4).

Para mayores detalles sobre estas clasificaciones ver tablas 1, 2, 3 y 4 apéndice A.

3.4.- Evaluación de los tipos de secadores.

Analizando cuidadosamente los diferentes tipos de secado existentes con la ayuda de las tablas 1, 2, 3 y 4, nuestro problema se circunscribe a unos cuantos. Sintetizamos en la tabla 5 estos últimos, con el objeto de

visualizar fácilmente sus principales características.

Del análisis de la tabla 5, se presentan las siguientes alternativas.

- 1) Lecho fluidizado.
- 2) Neumático.
- 3) Rotatorio directo.

Tomando en cuenta los siguientes puntos.

- a) Velocidad alta de secado.
- b) Costos razonables de operación e inversión.
- c) Versatilidad.

La selección final determinará experimentalmente entre las alternativas presentadas. En los siguientes capítulos se detalla el trabajo experimental.

## CAPITULO V

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 4.1) Pruebas preliminares de secado.

1) Laboratorio.

2) Secador de charolas.

#### 4.2 Secador continuo rotatorio.

#### 4.3 Secador de lecho fluidizado.

#### 4.1.- Pruebas preliminares de secado.

##### 4.1.1.- Laboratorio.

Durante el desarrollo del producto, no se apreció gran problema en el secado, ya que muestras del producto filtrado expuesta al ambiente, aparecieron secas al día siguiente, con menos del 1% de humedad. Esto nos indujo a pensar que simplemente con un secador de charolas en una planta piloto, se podría obtener una prueba definitiva y representativa del secado del producto termosensible.

##### 4.1.2.- Secador de charolas.

Para poder obtener una prueba representativa del secado del producto termosensible se propuso construir un secador de charolas a escala piloto, ya que al pasar del laboratorio a la escala comercial, pueden obtenerse grandes discrepancias en los resultados, debido a que no se llegan a apreciar algunas variables, mismas que al transportarse a escala piloto o semicomercial pueden tener gran influencia y hasta controlar la operación.

Las características de este secador de charolas así como las del producto a secar -- fueron las siguientes ( Ver fig. 2 ).

Largo total 2.60 m.  
Ancho total 1.10 m.  
Alto total 1.50 m.  
Número de charolas 15  
Altura de la torta 2.5cm.  
Peso aproximado de la torta 75 kg/charola.  
Volúmen de aire 10 / mcm.  
Humedad inicial 7%  
Temperatura del aire: 25°C.  
Temperatura de bulbo húmedo 15°C.

La variable a determinar era el tiempo de secado para obtener una humedad dentro de especificaciones, por lo que se fueron dando incrementos de tiempo de seis horas. Sin embargo, la velocidad de secado era imperceptible y se aumentaron los incrementos de tiempo hasta 24 horas.

Al cabo de esta prueba de 24 horas se apreció un mejoramiento del producto, pero exclusivamente la capa superior de la torta y se prolongó el tiempo a 48 horas. Al final, los resultados fueron los siguientes:

- 1) Humedad 1%
- 2) Humedad en capas internas 5-7%
- 3) Endurecimiento de la capa superior formando un terrón muy duro a todo lo largo de la charola.

Posteriormente se redujo el espesor de la torta y los tiempos fueron desde 8, 16, 24 horas, obteniendo siempre los resultados anteriores.

En estas condiciones se dió por finalizada la prueba, con las siguientes conclusiones:

- 1) La difusión del agua a través del producto puede llegar a controlar la operación.
- 2) No resulta conveniente usar aire sin tratamiento previo para esta operación de secado.
- 3) Se tendrá que probar con un equipo en el que el producto esté en movimiento y con aire caliente hasta donde el producto lo permita.

#### 4.2.- Secador rotatorio continuo.

De los anteriores resultados se decidió realizar pruebas más apropiadas en un secador rotatorio continuo, por su versatilidad en el manejo de materiales y su costo bajo para volúmenes razonables, (100 kg. - 200 tn/hr), aunque presenta ciertas limitaciones; con productos de secado lento, pastas, suspensiones, materiales muy adherentes y aquéllos que se arrastran fácilmente en una corriente de gas.

Para el diseño de la unidad experimental se usaron sugerencias empíricas ( 3 y 7 ), este diseño de la experimentación se fué corrigiendo hasta obtener una buena base para el diseño final, en caso de obtener buenos resultados con esta unidad.

##### 4.2.1.- Unidad experimental.

Diámetro: De 0.5 m. a 4 m.

Longitud:  $4D < L < 10D$ .

Velocidad de agitación: 5 a 35 RPM.

Flujo de aire: Tendrá velocidades comprendidas entre 2 y 5 m/s, ó aquella que evite la producción de polvos.

Pendiente: Estará comprendida entre 0 y 0.08 m por metro de longitud, pero se determina experimentalmente.

Deflectores: Para diámetro 0.6 m. el número varía de 7 a 12 D., si D está expresada en metros.

Teniendo en cuenta estas sugerencias empíricas - ( 3 ), y tomando en cuenta los materiales disponibles por razones de tiempo y economía, se construye la unidad experimental. Para mayores detalles en su diseño ver apéndice A - 1.

Las características de la unidad experimental -- son:

Diámetro : .565 m.  
 Longitud : 5.34 m.  
 Velocidad de agitación : 13 RPM.  
 Flujo de aire : 42.45  $\frac{m^3}{min}$  ( 1500 PCM ) a --  
 113.2  $\frac{m^3}{min}$  (4000 PCM).

Para detalles del secador ver fig. ( 3 ).

Deflectores:

	ARREGLO 1-	ARREGLO 2-
Número :	9 periféricos	6 periféricos.
Ancho :	5 cm.	9 cm.
Largo :	85 cm.	85 cm.

Pendiente : Variable.

#### 4.2.2.- Pruebas preliminares.

Los objetivos que se pretenden con esta - unidad experimental son los siguientes: -  
 - fijar las condiciones de operación para -  
 - secar nuestro material dentro de especificaciones, así como su modificación y ajuste, de tal modo, que sirvan de base para su diseño en el caso de tener éxito con - este tipo de secador.

## ARREGLO 1.

Para alcanzar este objetivo se realizó - una primera serie de pruebas con la unidad experimental para determinar los factores que más influyen en esta unidad y poder fijar las siguientes variables:

- 1) Gasto de aire. Puesto que se trabajó a contracorriente el gasto de aire está limitado al máximo permisible para provocar un arrastre de producto inferior a un 10% del alimentado. Este -- gasto se varió desde  $113 \frac{m^3}{min.}$  hasta --  $42.46 \frac{m^3}{min.}$  donde este último resultó el más apropiado, el cual resultó bajo respecto al recomendado de 2.5 m/s. La determinación del gasto de aire -- fué proporcionado directamente por el fabricante del ventilador usado, de -- acuerdo con sus tablas.
- 2) Pendiente. De acuerdo con el gasto de aire, la pendiente del cilindro se -- fué ajustando desde 0.0 m/m de cilindro hasta  $.13 \frac{m}{m}$  logrando ajustarla en  $.0468 \frac{m}{m}$ , como  $\frac{m}{m}$  valor más adecuado.
- 3) Capacidad y temperatura del aire. Una vez fijadas las variables anteriores se determinó la alimentación más apropiada de producto para estas condiciones.

El objetivo era obtener 50 kg. / hr.- de producto seco aproximadamente trabajando 20 horas diarias.

Para la determinación de la alimentación, en un principio solo interesaba ver la me cánica del producto en el interior del se cador. Durante estas pruebas se pudieron apreciar una serie de fenómenos que infl uyen en esta determinación:

- a) El area de caída dentro del cilindro, el producto representa solamente el - 50% del area de flujo transversal, lo que de inmediato baja la eficiencia - del equipo. Esto depende del diseño de los deflectores.
- b) El producto por sus características - se adhiere a la superficie del cilindro, formando una capa que se despre nde por sí sola cuando alcanza 2 cms.- de espesor aproximadamente. Esto se - remedió con ligeros golpes en la pared del cilindro, lo que deberá tomarse - en cuenta para el diseño del equipo.
- c) Por las variaciones en el contenido - de humedad y de impurezas en las ope raciones anteriores al secado, se lle ga a modificar la me cánica del prod uc to dentro del secador, de una manera 0 impre visible.

Por esto último, la alimentación está limitada a un mínimo, que presenta -- una cantidad variable para cada condi ción del producto, ya que algunas veces se verifica con 1 kg./min. y otras con 5 kg./min. de alimentación.

Los factores que gobiernan este fenómeno no están muy bien determinados, pueden suponerse importantes los siguientes:

- a) Las impurezas intrínsecas del proceso y el contenido de humedad inicial bajan sensiblemente el punto de fusión a tal extremo que a 25-30°C -- con 5.0% de humedad, el producto empieza a fundirse, con la consiguiente imposibilidad de manejarlo en el equipo. Con buenas condiciones, para un 7 a 5% de humedad, el producto -- empieza a fundir entre 50° y 70°C. No existe una relación directa entre el punto de fusión y el contenido de humedad por el efecto tan grande que tienen las impurezas, aún con un 1% de éstas, mismas que se presentan con frecuencia por la calidad de las materias primas, y en menor escala, -- por las operaciones anteriores del secado.
- b) Un período de secado a velocidad -- constante sumamente corto según se -- puede apreciar en las figs. ( 4 y 5 ).
- c) La dificultad para dispersar el producto dentro del equipo durante su -- caída por su facilidad para formar -- tortas, las que impiden que fluya -- adecuadamente con la correspondiente baja en la velocidad de secado.

#### 4) Análisis de humedad.

La determinación del contenido de humedad en esta unidad experimental se llevó a cabo mediante un muestreo inicial y otro constante a la salida del secador y durante un período de una hora.- Esto constituyó una muestra representativa de ese tiempo. Posteriormente, el análisis del contenido de humedad, se realizó con el reactivo de Karl Fiesher en un titulador automático "analmatic".

En la tabla No. (6) se resumen las pruebas realizadas con el arreglo 1, superando el límite de 50 kg/hr., desafortunadamente este valor no es constante por las variaciones de las impurezas que determinan la temperatura del aire a la entrada, esta varía durante el transcurso del secado según se aprecia en la tabla No. (6), lo que trae -- consigo la variación en la velocidad y la humedad final.

Por los problemas expuestos se vió la necesidad de aumentar el tiempo de residencia del producto dentro del equipo y así mismo obtener una temperatura programada a lo largo del equipo, para lo cual se realizó una segunda serie de pruebas con otro arreglo para el secador.

#### ARREGLO 2.

Con el objeto de aumentar el tiempo de residencia, se realizó una segunda serie de pruebas con un arreglo 2, en los deflectores interiores y una pendiente .028 m/m, como se puede apreciar en la fig. 3b.

## 4.2.3.- Resultados.

- 1) El arreglo uno funcionó mejor que el número dos por la disposición de los deflectores. Un aumento de estos no mejora la caída del producto por aumentar la adherencia del producto en las paredes.
- 2) La velocidad de secado se ve notablemente favorecida por el aumento de temperatura. ( Ver tabla 6 ).
- 3) La eficiencia del secador es notablemente baja.
- 4) Las impurezas afectan de un modo impredecible la operación general, haciéndola variar constantemente.
- 5) La tendencia a formar tortas representa un inconveniente muy grande -- con este tipo de secador, por la baja dispersión del producto en el aire, afectando negativamente la velocidad de secado.
- 6) Una reducción del flujo de aire no beneficia a la operación, porque baja la velocidad de secado. ( Ver prueba No. 6 ).
- 7) Se podría mejorar la velocidad de secado ( kg. agua / hr. ) si el secador tuviera un diámetro mayor, debido a que así se podría tener menor velocidad y mayor flujo de aire.

#### 4.3.- Secador de lecho fluidizado.

De los resultados obtenidos con el secador rotatorio experimental, se decidió -- en un principio, realizar una pequeña -- prueba en un secador de lecho fluidizado para tener un criterio de decisión entre este y el rotatorio.

Las ventajas que pueden presentar este -- tipo de secadores son las siguientes: -- ( 6 y 7 ).

- 1) Manejo de materiales termosensibles.
- 2) Manejo de materiales cuyo período de velocidad de secado decreciente es -- muy grande.
- 3) Operación con mayores temperaturas -- de secado.
- 4) Mayor control de la operación, especialmente a régimen intermitente.
- 5) Excelentes transferencias de calor y masa, dado el grado de contacto entre el sólido y el aire.
- 6) Unidades relativamente pequeñas.
- 7) Bajo costo de mantenimiento por las pocas piezas móviles.

Las desventajas que presentan son:

- 1) Costo de energía por concepto del ventilador.
- 2) Dificultad en la alimentación con productos difíciles de disgregar.
- 3) Incertidumbre al pasar de escala piloto a comercial.
- 4) No existe un método establecido para el diseño de estos equipos, que permita disminuir el riesgo debido a la incertidumbre en el funcionamiento al escalar de nivel piloto a industrial.

#### 4.3.1.- Unidad y pruebas experimentales.

Se realizaron inicialmente pruebas preliminares con un secador de lecho fluidizado ( fig. 7 ), con el objeto de obtener rápidamente resultados prácticos y proseguir pruebas con este tipo de equipo, en el caso de obtener resultados positivos.-

Las condiciones y resultados de estas -- pruebas fueron los siguientes:

Régimen contínuo.

Carga	15.000 kg/hr.
Humedad inicial	4.92 %
Humedad final	1.42 %
Temperatura del aire	18°C.
Temperatura de bulbo húmedo	15°C.
Temperatura del aire caliente	25°C.
Tiempo de secado:	2 horas.

De esta prueba se obtuvieron las siguientes conclusiones y posibles factores que afectan la operación de un secador de -- lecho fluidizado:

- 1) Dificultad en la alimentación con -- un producto que tiende a aglomerarse fácilmente.
- 2) La dispersión del producto en el aire es difícil con ventiladores de baja presión.
- 3) La formación de partículas esféricas aparece si no se obtiene una dispersión uniforme del producto en el aire, por la falta de un plato de distribución adecuada.

- 4) La dispersión del producto en el aire es más difícil con tamaños de cristal pequeños.
- 5) Por el aspecto del producto y su contenido de humedad después de un período de secado corto, este tipo de secadores presenta perspectivas alentadoras.
- 6) Debido a las variaciones en la calidad del producto y su contenido de humedad, se recomienda la operación a régimen intermitente para poder controlarla fácilmente.
- 7) Es necesario aumentar la temperatura del aire para obtener un menor contenido de humedad y una mayor velocidad de secado.
- 8) Se produce una fluidización llamada agregativa, esto es, burbujas de aire en el lecho, que al salir de este, se obtiene la dispersión del producto en el aire. Pero como este fenómeno no es uniforme, se favorece la formación de partículas esféricas.
- 9) Cuando se impartió cierto movimiento al lecho, se obtuvo una fluidización más uniforme. Este hecho fue de vital importancia para tener éxito con este tipo de secadores y con el producto, el cual no es fácil de fluidizar.

Posteriormente se realizó otra prueba preliminar, tratando de corregir los problemas -- surgidos anteriormente. Esta se realizó en -- un secador de lecho fluidizado con las si--- guientes características ( ver fig. 8 ) y -- condiciones de operación:

Régimen continuo con opción a intermitente.

Carga inicial del lecho:	25.00 kg.
Humedad inicial:	6.2 %
Humedad final promedio:	0.2%
Temperatura de bulbo húme do del aire a la entrada:	15°C.
Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada:	20°C.
Temperatura del aire ca-- liente a la entrada:	20°C.
Tiempo:	3 horas.

Los resultados obtenidos son:

- 1) El régimen continuo definitivamente no se recomienda por los problemas de alimentación y las características termosensibles del producto.
- 2) La dispersión del producto en el aire mejoró notablemente des apareciendo la formación de par tículas esféricas.
- 3) Se alcanzó a rebasar la especi ficación del contenido de humedad máximo de 0.3%, con temperatura - relativamente baja del aire a la entrada.

- 4) Se propone que se realicen más pruebas a régimen intermitente para poder definir las variables que afectan esta operación y que sirvan de base para el diseño del equipo industrial, en el caso de obtener buenos resultados.

Esta serie de pruebas experimentales se realizaron en un secador de lecho fluidizado similar al anterior pero modificado para trabajar a régimen intermitente, con una serie de filtros interconstruidos para la colección de polvos (fig. 8a). Esto último permite obtener lotes uniformes en su contenido de humedad final.

En la tabla 7 se resumen las pruebas realizadas con esta unidad de lecho fluidizado experimental.

#### 4.3.2. Resultados

De las diferentes pruebas realizadas en secadores de lecho fluidizado, previamente descritas, se obtuvieron los siguientes resultados y observaciones:

- 1) La calidad del producto se mejoró notablemente al rebasar la especificación, siendo inferior al 0.3% de humedad máxima requerida.
- 2) La temperatura del aire a la entrada del secador fué de 20 a 25°C durante la primera hora como precaución para productos de bajo punto de fusión y posteriormente entre 35°y 40°C.

- 3) La formación de partículas esféricas desapareció.
- 4) Se pudo controlar la operación aún con variaciones en la calidad del producto, al programar adecuadamente la temperatura del aire junto con el tiempo total de secado.
- 5) La caída de presión en el lecho - fué de 38.1 mm de agua.
- 6) La altura adecuada del lecho se terminó variándola hasta obtener - la caída de presión máxima para el ventilador, que fué de 5 cm! No - se recomiendan alturas pequeñas - puesto que se obtiene una dispersión deficiente con formación de - partículas esféricas.
- 7) La tendencia a fluidizar en forma de burbujas de aire se evita por - el movimiento de agitación que se le da al lecho, esto aunado a la - centrifugación del aire antes de - que entre al plato de distribución y durante su paso por el lecho, - permite obtener una mayor dispersión de las partículas y un mayor tiempo de contacto por la trayectoria en espiral ascendente que - observan las partículas fluidizadas.

- 8) El tipo de filtros usado es altamente eficiente y se recomienda por su gran área de flujo que evita grandes caídas de presión.
  
- 9) De estas pruebas resultaron significativas las siguientes variables:  
Gasto y presión de aire, Temperatura del aire a la entrada del secador, - Tamaño del lote y contenido de humedad del aire a la entrada del secador.

## CAPITULO V

### DISCUSION DE RESULTADOS

- 5.1 Secador de charolas.
- 5.2 Secador rotatorio.
- 5.3 Secador de lecho fluidizado.

## DISCUSION DE RESULTADOS

Un análisis de las pruebas realizadas con los diferentes equipos de secado nos determinará el equipo más - apropiado para el secado del producto termosensible en óptimas condiciones.

### 5.1 Secador de charolas.

De inmediato se pudo comprobar que este tipo de secador no es apropiado para el secado del producto termosensible. Sin embargo, nos proporcionó una idea del comportamiento del mismo, haciendo patente desde un principio, los problemas que nos presentaría, los cuales no se habían manifestado en el laboratorio durante el desarrollo del producto.

Actualmente, con los secadores de tipo dispersante como el rotatorio, lecho fluidizado, neumático y por aspersión, se ha desplazado prácticamente al de charolas debido a las grandes eficiencias que se obtienen con aquellos.

### 5.2 Secador rotatorio.

De los resultados obtenidos con esta unidad que se sintetizan en la tabla 6 y las figuras 4, 5 y 6 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- 1) Las condiciones de operación que dieron mejores resultados se obtuvieron con el arreglo 1, previamente descrito en la sección 4.2.2. Esto se puede apreciar comparando las figuras 4 y 5, en donde los tiempos de secado más cor

tos fueron para el arreglo 1.

- 2) La temperatura del aire es determinante en la velocidad de secado, las pruebas 2 y 4 que trabajaron con temperaturas mayores de 35°C, dieron .074 kg. agua/hr. kg. y .075 kg. agua/hr. kg. respectivamente, en contraste la prueba 6, que trabajó a 30°C, dió .026 kg. agua/hr. kg.
- 3) El contenido final de humedad, también está determinado por la temperatura del aire, según se ve las pruebas 2 y 4 alcanzaron .60% B.S. entre 50° y 60°C, y en las demás difícilmente alcanzaron el 1% B.S. trabajando entre 30° y 40°C.
- 4) Por lo anteriormente expresado se pone de manifiesto la influencia del punto de fusión - que varió desde 30° hasta 70°C, sobre el comportamiento general del secado, originando - fluctuaciones en la velocidad y contenido final de humedad. Asimismo, esto trae consigo una falta de control de la operación que se ve reflejada en la tabla 6 y figura 6.
- 5) La falta de control de la operación por fluctuaciones en la calidad del producto húmedo se aprecia en la figura 6. Las pruebas 1 y 4 contrastan en este sentido con las N°2 y 3. Cada aumento de la temperatura del aire se refleja en la velocidad de secado.
- 6) De las gráficas de la figura 6 se puede ver que el período de velocidad de secado cons-

tante prácticamente es muy pequeño, pero el período de velocidad de secado decreciente es el que predomina, presentándose varios períodos decrecientes dependiendo de la temperatura del aire caliente y condición del producto húmedo. Este último período controla la operación de secado.

- 7) Es necesario aumentar el grado de dispersión del producto en el aire, para modificar favorablemente el tiempo de secado, dada las características del mismo, y que no es posible con un simple arreglo en los reflectores.
- 8) De las observaciones y resultados previamente descritos podemos concluir lo siguiente:
  - a) El secador rotatorio es un equipo muy versátil, pero por la naturaleza del producto a secar, es difícil aislar la influencia de cada variable.
  - b) No se alcanzó el contenido de humedad máximo requerido de 0.3% , siempre se lograron contenidos de humedad muy por encima de éste.
  - c) La toxicidad del producto (LD aguda 450 -500 mg/kg. en ratas) exige buenos sistemas de sello entre las partes fijas y la parte móvil del secador rotatorio.
  - d) Por las propiedades corrosivas del producto, resulta elevado el costo inicial

del equipo. No es posible usar acero al carbón ni se recomienda recubrimiento con alguna resina, debido al trabajo mecánico al que está sujeto.

### 5.3 Secador de lecho fluidizado.

- 1) La operación a régimen intermitente es necesaria por los resultados obtenidos y que se describen en la sección 4.3.2.
- 2) Las velocidades de secado que se obtuvieron en las pruebas Nos. 1, 2 y 3 de .073, .078 y .084 kg. agua/hr' kg. respectivamente, son una muestra de los buenos resultados obtenidos los que se aprecian en la tabla 7 y figura 9.
- 3) La influencia de la temperatura del aire se manifiesta por la diferencia en los resultados entre las pruebas 3 y 4, en cuanto a su velocidad de secado.
- 4) El contenido de humedad final logrado fácilmente, resultó inferior al 0.3% como máximo requerido, ver tabla 7.
- 5) Los resultados anteriores se obtuvieron con una temperatura del aire relativamente baja (35°C) lo cual ofrece grandes ventajas para el secado del producto termosensible, ver tabla 7.
- 6) La influencia del punto de fusión fué reducida en este tipo de secador.

## CAPITULO VI

### SELECCION Y DISEÑO.

6.1 Selección de la unidad industrial.

6.2 Diseño.

6.3 Costos.

## SELECCION Y DISEÑO

## 6.1 Selección de la unidad industrial.

A partir de los resultados obtenidos en los diferentes equipos de secado experimentales, se seleccionó el secador de lecho fluidizado intermitente por las siguientes características y ventajas:

- 1) Obtención de lotes homogéneos dentro de especificaciones.
- 2) Capacidad para manejar productos termosensibles a régimen intermitente y poder programar adecuadamente la temperatura del aire.
- 3) Mayor velocidad de secado que las obtenidas con los otros tipos de secadores estudiados.
- 4) Menor número de variables.
- 5) Poco número de partes móviles.
- 6) Versatilidad en el manejo de productos con diferente composición de impurezas.
- 7) Sistema de operación simple.
- 8) El producto tiene muy poco contacto directo con el material de construcción.
- 9) Posibilidad de manejar materiales de construcción de bajo costo y gran duración, co-

mo poliéster fibra de vidrio, fibras poliéster, resinas poliéster amida etc.

## 6.2 Diseño.

### 6.2.1 Bases.

Las bases de diseño serán básicamente las encontradas con la unidad experimental de lecho fluidizado para satisfacer racionalmente las especificaciones de la sección 3.2.

Capacidad: 1500 kg/día de producto con -  
0.3% en peso de agua como máximo.

Caida de presión para un lecho de 5 cm.:  
38.1 mm. de agua.

Agitador: 13 RPM máximo.

Lote: 350 kg. de producto seco como mínimo.

Temperatura del aire a la entrada: 40°C  
máximo.

### 6.2.2 Procedimiento.

La determinación de las variables y dimensiones del secador se realizaran en base a la experimentación, producto de este estudio, asimismo mediante algunas simplificaciones y ajustes para su rápido

da construcción. Esta se llevó a cabo en un tiempo de 15 días.

En ausencia de un método de diseño establecido, se buscó ciertas relaciones como; diámetro del secador a altura del lecho y densidad aparente del lecho, como bases para el escalamiento entre la unidad piloto e industrial.

Cabe destacar que este tipo de secador puede presentar cierta simplicidad en su diseño, - por las pocas variables significativas a determinar, y la flexibilidad que da el régimen intermitente, en la exactitud de éstas.

Tamaño de lote.- El mínimo de 350 kg. determinado por la operación de filtración previa al secado, puede aumentar hasta - 500 kg. cada 8 horas, por lo tanto, la capacidad - del equipo tendrá que ser de 500 kg. de producto seco cada 8 horas, 1500 kg./ día que es lo especificado.

Cámara de fluidización.- Base 500 kg. de producto con humedad del 10% máximo.

$$R = \frac{D}{H}$$

R = Factor de escalamiento.

D = Diámetro del secador.

H = Altura del secador.

Unidad piloto:

$D = 56.5 \text{ cm.}$

$H = 8 \text{ cm.}$

$R = 56.5 \text{ cm.} / 8 \text{ cm.} = 7.09$

$d = m/v$

$d = \text{densidad aparente del lecho.}$

$m = \text{masa del lecho.}$

$v = \text{volumen del lecho.}$

$d = 15 \text{ kg.} / 20.5 \text{ l} = 0.75 \text{ kg/l}$

Unidad industrial:

Se basará para dimensionarlo en el factor de escalamiento y se comprobará con la densidad aparente del lecho, limitándose a los tamaños de lámina existentes en el mercado, para facilitar su construcción.

Después de ciertos tanteos - el diámetro de 190 cm. resultó la indicada como sigue:

$D = 190 \text{ cm.} \quad R = 7.09$

$H = D/R = 190 \text{ cm.} / 7.09 =$   
 $= 26.79 \text{ cm.}$

$d = 550 \text{ kg.} / 759.5 \text{ l} = 0.75 \text{ kg/l}$

Posteriormente se realizó un ajuste por el tamaño de lámina disponible en el mercado quedando en 170 cm. de diámetro y 90 cm. de altura. Dada la base de diseño, este ajuste po--

### Cámara de centrifugación.-

El objeto de esta cámara es impartirle al aire un movimiento centrífugo para que entre al lecho por la región cercana a la pared, sobre la cual, en otros tipos de secadores fluidizados tiende a depositarse el producto, además la trayectoria del aire permite un mayor tiempo de contacto con el producto dispersado.

Se decidió darle un tamaño adecuado para facilitar la descarga y limpieza de la misma:

Altura; 80 cm.

Diámetro: 170 cm.

Puerta: 40 x 50 cm.

Entrada del ducto de aire: 40 x 40 cm.

Para mayores detalles ver figura 11 en donde se incluye la puerta de descargue, en la parte inferior de la cámara de centrifugación, el fondo es cónico invertido para facilitar la descarga y dirigir el movimiento de aire, y un brazo recogedor para la descarga como se detalla en la mencionada figura.

### Plato de distribución.-

La finalidad del plato de distribución es la de distribuir uniformemente el aire en la sección transversal del lecho, deberá permitir que el aire conserve el movimiento centrífugo que tiene en la cámara inferior al lecho, lo cual se consigue con una serie de aberturas que se detallan en la figura 11, y cuya área total deberá ser, equivalente a la del ducto de entrada de -

aire del secador para evitar caídas de presión - excesivas si el área es menor, o por el contrario evitar una desigual distribución del aire en el lecho si el área es mayor.

#### Agitador.-

Para obtener un lote uniforme y aumentar la transferencia de calor y de masa, se dispone un sistema de agitación que también evita la formación de partículas esféricas como se vió en el secador de lecho fluidizado experimental.

Para la determinación de la velocidad del agitador se tomó la misma velocidad periférica de la unidad experimental en relación a su diámetro ésta es la que recorre el extremo del brazo del agitador como sigue:

#### Unidad piloto.-

Diámetro = .565 m.  
 Circunferencia = 1.77 m.  
 Velocidad del  
 agitador = 13 R.P.M.  
 Velocidad pe-  
 riférica <sub>1</sub> = 23.01 m./min.

#### Unidad industrial.-

Diámetro = 1.70 m.  
 Circunferencia<sub>2</sub> = 5.33 m.  
 Velocidad pe-  
 riférica <sub>2</sub> =  $\frac{\text{Velocidad periférica } 1}{\text{Circunferencia } 2}$   
 =  $\frac{23.01 \text{ m/min.}}{5.33 \text{ m}}$   
 = 4.3 R.P.M.

Con un arreglo con 2 motoreductores de línea existentes en el mercado se consiguió darle una velocidad de agitación de 5 revoluciones por minuto, para seguir con la similitud con la unidad piloto. En la práctica se podrá definir si esta velocidad es la correcta, y en caso contrario con pequeños ajustes en el agitador se podrá conseguir.

#### Colector de polvos.-

De acuerdo con las pruebas realizadas, el tipo de lona poliéster empleado es el adecuado, ya que la eficiencia con este tipo de filtros es mayor del 99%. El diámetro y número de cada elemento filtrante depende exclusivamente de su arreglo geométrico en la superficie superior de la cámara de centrifugación, ver figura 11.

$$\begin{aligned} \text{Area de flujo de cada elemento} &= 1.570 \text{ m}^2. \\ \text{Area total en 16 elementos} &= 1.57 \text{ m}^2. \times 16 = \\ &= 25 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Se tienen de esta manera  $7.0 \times 10^{-4}$  P.C.M/in<sup>2</sup>, que con esta área se satisface grandemente los 3 P.C.M/in<sup>2</sup>.

#### Capacidad del ventilador.-

Bases: Condiciones del aire a la entrada de 25°C y 40% de humedad relativa.  
Condiciones del aire a la salida 20°C y 85% de humedad relativa, suponiendo éstas últimas por la gran eficiencia en la transferencia de calor y de masa.  
Para la velocidad de secado se extrapola la obtenida en la unidad experimental en la prueba número 3, tabla 7 para

500 kg. de producto seco. El resultado de este cálculo se ajustará con los tamaños de ventiladores disponibles en el mercado.

Velocidad experimental promedio :=  $\frac{.0211 \text{ kg. de agua}}{\text{kg. producto seco hr.}}$

Condiciones de entrada:

Ta. de aire = 25°C

Humedad relativa = 40%

Condiciones de salida:

Ta. de aire = 20°C

Humedad relativa = 85%

Presión de vapor del agua:

17.53 mm Hg. a 20°C

23.75 mm Hg. a 25°C

1) Presión parcial del agua inicial =  $23.75 \times .40 = 9.5 \text{ mm Hg.}$   
 Humedad molal inicial =  $9.5/586 - 9.5 = .0164$

2) Presión parcial del agua final  $17.53 \times .85 = 14.9 \text{ mm Hg.}$   
 Humedad molal final =  $14.9/586 - 14.9 = .026.$

3) Agua unitaria evaporada =  $.026 - .0164 = .0096.$

4) Agua total a evaporar

Base = 1100 lb P.S. (Producto seco)

$$\begin{aligned} 1100 \text{ lb P.S.} \times \frac{.0211 \text{ lb agua}}{\text{lb P.S. hr.}} \times \frac{1 \text{ lb mol.}}{18 \text{ lb agua}} &= \\ &= 1.289 \frac{\text{lb mol.}}{\text{hr.}} \end{aligned}$$

5) Aire necesario.

$$\frac{1.289 \text{ lb mol.}}{\text{hr.}} \cdot \frac{.0096 \text{ lb mol agua}}{\text{lb mol A.S. (aire seco)}} = \frac{134.27 \text{ lb mol A.S.}}{\text{hr.}}$$

## 6) Gasto de aire húmedo inicial

$$134.27 \frac{\text{lb mol A.S.}}{\text{hr.}} + .026 = 137.76 \frac{\text{lb mol}}{\text{hr.}}$$

## 7) Volumen de aire húmedo inicial

$$137.76 \times 359 \times \frac{760}{586} \times \frac{298}{273} \times \frac{1}{60} = 1983 \text{ m}^3 \quad (1166.9 \text{ P.C.M.})$$

## Presión mínima.-

La presión del aire tendrá que ser superior al peso del producto que esta directamente sobre - la abertura del orificio del plato de distribución, más las pérdidas producidas por el colector de polvos y demás accesorios.

$$\text{Peso unitario del lecho} = \frac{550 \text{ kg.}}{22600 \text{ cm}^2} = .022 \frac{\text{kg.}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Peso máximo unitario} = .022 \frac{\text{kg.}}{\text{cm}^2} = 220.98 \text{ mm agua} \quad (8.7" \text{ agua})$$

Las pérdidas de presión por concepto del colector de polvos interconstruido, depende del área expuesta y de la naturaleza del polvo, pero varía - desde 2" a 6" de agua (8). Este valor puede ser conservador para las características adherentes - del producto, por lo que tomamos 10" de agua como caída de presión por este concepto para mayor seguridad.

$$\begin{aligned} \text{Caída de presión total} &= \text{peso del producto} + \\ &+ \text{colector de polvos} + \\ &+ \text{placa de distribución} + \\ &+ \text{ductos.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Caída de presión total} &= 221 \text{ mm agua} + 254 \text{ mm agua} + \\ &+ 50.8 \text{ mm agua} + 50.8 \text{ mm agua} \pm \\ &+ 576.6 \text{ mm agua.} \end{aligned}$$

## Condensador.-

Base:  $66.30 \frac{\text{lb a.s.}}{\text{min.}}$

aire:

$$T_1 = 25^\circ \text{C}$$

$$\text{Hr} = 40 \%$$

$$T_2 = 5^\circ \text{C}$$

Salmuera:

$$t_1 = -5^\circ \text{C}$$

$$t_2 = 0^\circ \text{C}$$

Siguiendo el mecanismo propuesto por ( 9a) para la condensación de vapor de agua en el aire, a partir de las condiciones de entrada del aire y suponiendo la temperatura de la superficie del radiador,-- obtenemos las condiciones de salida del aire. De la carta psicométrica para 586 mm Hg. de presión -- obtenemos los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{humedad inicial} &= .01 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb A.S.}} \times \frac{66.3 \text{ lb A.S.}}{\text{min.}} = \\ &= .066 \frac{\text{lb agua}}{\text{min.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{humedad final} &= .007 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb A.S.}} \times \frac{66.3 \text{ lb A.S.}}{\text{min.}} = \\ &= 0.464 \frac{\text{lb agua}}{\text{min.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{agua a condensar} &= 0.66 - 0.464 = 0.1959 \frac{\text{lb agua}}{\text{min.}} \\ &= 11.75 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr.}} \end{aligned}$$

calor a eliminar:

$$\begin{aligned} \text{sensible: } wcpDt &= \frac{66.9 \text{ lb A.H.} \times 0.24 \text{ Btu}}{\text{min.}} \frac{(77-41)^\circ \text{F}}{\text{lb ft}^2 \text{ff}} \times \\ &\times \frac{60 \text{ min}}{\text{hr.}} = \frac{34680 \text{ Btu}}{\text{hr.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{latente} &= 0.195 \frac{\text{lb agua}}{\text{min.}} \times \frac{1060 \text{ Btu}}{\text{lb agua}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{hr.}} \\ &= \frac{12459 \text{ Btu}}{\text{hr.}} \end{aligned}$$

$$\text{calor total} = 34880 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} + 12459 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} + 47139 \frac{\text{BTU}}{\text{hr.}}$$

area del condensador:

$$\text{LMTD} + 19.47 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Q = 47139 \frac{\text{Btu}}{\text{hr.}}$$

$$U = 44.8 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \quad (\text{dato del fabricante})$$

$$A = \frac{47139}{19.47 \times 44.8} = 53.94 \text{ ft}^2$$

$$\text{Area del condensador} = 5.01 \text{ m}^2$$

Cada radiador tiene un área de  $36 \text{ ft}^2$ , base de éstos cálculos, por los que se seleccionó 2 unidades, las cuales se disponen de inmediato en el mercado, y que por ser de línea, tiene un costo razonable.

Calentador.-

$$\text{Base: } 66.90 \frac{\text{lb A.S.}}{\text{min.}}$$

aire:

$$T_1 = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 0.24$$

Vapor:

$$t_1 = 162.24 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (5 \text{ psi})$$

$$t_2 = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (72 \text{ } ^\circ\text{C})$$

calor necesario:

$$Q = 66.90 \frac{\text{lb}}{\text{min.}} \times 0.24 \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}} \times (104 - 41) \text{ } ^\circ\text{F} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr.}}$$

$$= 60147.3 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

$$\text{LMTD} = 46 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$U = 44.8 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \quad (\text{dato del fabricante})$$

$$A = \frac{60147 \text{ Btu/hr}}{44.8 \times 46 \text{ } ^\circ\text{F}} = 29.18 \text{ ft}^2 = 2.71 \text{ m}^2$$

Cada radiador tiene un área de  $36 \text{ ft}^2$  por lo que se seleccionó una unidad para calentamiento del aire del secador de lecho fluidizado.

## 6.3 COSTOS

## 6.3.1 Inversión total del secador.

## Costos directos.

a.- Cuerpo del secador	\$ 75,000.00	
b.- Colector de polvos	1,400.00	
c.- Ventilador	7,550.00	
d.- Motor del ventilador	3,620.00	
e.- Motoreductor primario del agitador	6,525.00	
f.- Reductor secundario del agitador	5,200.00	
g.- Motoreductor del sacudidor	2,300.00	
	<hr/>	
Costo del equipo	\$ 101,595.00	
h.- Radiadores de acondi- cionamiento de aire	4,800.00	
i.- Ciclón de acondiciona- miento de aire	1,000.00	
j.- Instrumentación	2,369.00	
k.- Instalaciones eléctricas	4,490.00	
l.- Estructuras	2,500.00	
m.- Tuberías	1,500.00	
	<hr/>	
Total de costos directos	118,254.00	\$ 118,254.00

## Costos indirectos

a.- Ingeniería y supervisión	35,000.00	
b.- Instalación y montaje	10,000.00	
c.- Imprevistos 9% del costo del equipo	9,200.00	
	<hr/>	
Total de costos indirectos	\$ 54,200.00	54,200.00
	<hr/>	

Inversión Total del Secador	\$ 172,454.00
-----------------------------	---------------

#### COSTO DE LAS PRUEBAS PILOTO

Secador Rotatorio y de Charolas	\$ 14,000.00
Secador de Lecho Fluidizado	5,000.00
Supervisión y mano de obra	10,000.00
	<hr/>
	\$ 29,000.00

#### 6.3.2. COSTOS DE OPERACION

Base: 350 toneladas de producto técnico al primer año

##### a.- Depreciación.

Se tomó la depreciación en base a la siguiente relación ( 13 ):

$$d = \frac{V_o - V_s}{n V_o} \times 100$$

d= depreciación % anual

V<sub>o</sub>= Valor inicial del equipo a depreciar

V<sub>s</sub>= Valor de deshecho

n= Vida del Equipo

$$d = \frac{172,454 - 50,000}{10 (172,454)} = 7.1\%$$

De 13 se tiene un valor de 9% para este tipo de equipo, - por lo que el valor calculado resulta conservador si tomamos en cuenta las características del proceso, de manera que tomamos el 9% señalado sobre el valor del equipo ya - que es el máximo que se permite según (14).

$$172,454 \times .09 = \$ 15,520.00$$

##### b.- Amortización de pruebas piloto.

De acuerdo con 14 se tomó el 5% anual sobre el monto de - las pruebas.

$$29,000.00 \times .05 = 1,450.00$$

c.- Mantenimiento.	
10% del costo del equipo	10,159.00
d.- Servicios	
Luz, agua, calefacción, etc.	51,303.00
e.- Mano de obra.	
Un operador	29,200.00
f.- Supervisión.	
15% de la mano de obra	4,380.00
Costo total de Operación de secado.	<u>\$ 112,012.00</u>

Costo unitario de la operación de  
secado al primer año:

Costo de operación de secado=

Producción anual

$$= \frac{\$ 112,012.00}{350,000.00 \text{ kg.}} = \frac{\$ 0.32/\text{kg}}{\underline{\underline{\hspace{1.5cm}}}}$$

Este valor resulta el más alto, ya que conforme la producción aumente, este valor irá disminuyendo.

Hay que hacer notar que puede existir cierta variación de este valor estimado con el real, este último que sería objeto de otro estudio no discreparía en forma sensible con aquél, y resulta satisfactorio el valor determinado para este estudio

## C A P I T U L O VII

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Es imprescindible la experimentación para poder diseñar un secador industrial, y dependiendo de las características del producto a secar, resulta la facilidad de poderlas llevar a cabo en las instalaciones existentes en el país.
- 2.- El secador de charolas tiene en la actualidad una aplicación muy limitada, y en nuestro caso particular sólo proporcionó una idea de la magnitud de nuestro problema.
- 3.- El secador rotatorio es un equipo muy versátil en la industria, capaz de manejar grandes volúmenes de producción; tiene buena velocidad de secado, con limitaciones en el manejo de productos adherentes y con aquellos de fácil transporte neumático y cuyas condiciones de secado son muy restringidas. Por el número de variables que tiene, sus relaciones son muy complicadas y poco explicadas, por lo que su diseño se basa, en gran medida, en la experimentación. El funcionamiento de este equipo no fué satisfactorio para el secado del producto termosensible estudiado.  
No se alcanzó la especificación del contenido de humedad final máxima del 0.3%  
La operación continua no es recomendable por la variación en la calidad del producto, antes de someterlo a la operación de secado.

Se cumplió con el secador rotatorio, en buena medida con los compromisos inmediatos que se tenían, -- además de satisfacer este objetivo, se realizó el estudio de las variables que intervienen en el secado.

- 4.- El secador de lecho fluidizado tiene altas velocidades de secado, por sus excelentes eficiencias en la transferencia de calor y de masa, además presenta las siguientes ventajas:

Reducido número de variables de operación.

Simplicidad en su operación.

Las variaciones en la calidad del producto que se alimenta, no afectan en la operación de manera sensible.

A régimen intermitente se pueden programar adecuadamente las temperaturas del secado.

Se alcanzó fácilmente la especificación del contenido de humedad máxima del 0.3% .

- 5.- Por lo anterior, el funcionamiento del secador de lecho fluidizado funcionó satisfactoriamente para el secado del producto termosensible.
- 6.- Resulta sumamente difícil predecir el funcionamiento de un secador a escala industrial, en base a los resultados de pruebas a escala piloto, puesto que no existe un método confiable para su diseño.
- 7.- En la figura 11 se puede apreciar la diferencia entre el funcionamiento del secador rotatorio, la mejor prueba, y el secador de lecho fluidizado.

- 8.- El costo del equipo de \$ 172,000.00 resultó ser más bajo que las estimaciones preliminares que presentaron las Compañías a las que se les solicitó sus servicios, y que fueron del orden de \$ 200,000.00 a -- 250,000.00 . Esta diferencia resulta del costo de la ingeniería e investigación que se desarrolla, especialmente en los secadores de lecho fluidizado, - por parte de las compañías especializadas en el diseño y construcción de secadores, y el costo de ingeniería y desarrollo que resultó de el secador propuesto en este estudio.
- 9.- En la tabla 8 y figura 13, se resumen las pruebas - de arranque del secador de lecho fluidizado a nivel industrial
- 10.- La capacidad del equipo se puede aumentar conforme se afinen las condiciones de operación y se realice un estudio, a fin de optimizar esta operación.

APENDICE A.

A.1 Secador rotatorio experimental.

Diámetro: Fijamos arbitrariamente la velocidad - del aire entre los límites sugeridos de 2 a 5 m/s con un ventilador de línea que nos permita cubrir este rango para un diámetro fijado. Por disponer de inmediato de cilindros de 56.5 cm. de diámetro comprobaremos si la velocidad está dentro de los límites propuestos en (3).

Gasto mínimo del ventilador: 42.45 MCM (1500 PCM)  
 contra una presión  
 estática de 38.1 mm  
 de agua (1.5")

$$\text{Area transversal} = .0798 \text{ m}^2.$$

$$\begin{aligned} \text{Area de flujo} &= 80\% \text{ del área transversal} = \\ &= .063 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocidad} &= \frac{42.45 \text{ MCM}}{0.63 \text{ m}^2 \times 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}}} = 3.53 \frac{\text{m}}{\text{seg.}} \end{aligned}$$

Con este diámetro se puede variar adecuadamente la velocidad puesto que no está muy restringida respecto de los límites propuestos.

Longitud: (3) 4 a 6D 10D  
 Mínimo 2.56 m.  
 Máximo 5.56 m.

Escogemos 5.56 m. y dependiendo de la experiencia se corregirá el diámetro o la longitud.

Revoluciones por minuto: (3).

5 a 35 R.P.M. para ND entre 7 y 11

$N = R.P.M.$

$D = \text{diámetro en metros.}$

Máximo =  $.565 \times 21 \text{ R.P.M.} = 11.86$

Mínimo =  $56.5 \times 13 \text{ R.P.M.} = 7.34$

Velocidad de agitación permitida será de 13 a 21 R.P.M., por lo tanto escogemos 13 R.P.M. con la posibilidad de aumentarla cambiando engranes en el mecanismo de transmisión del motoreductor al cilindro rotatorio.

Flujo de aire: De acuerdo con el diámetro y velocidades sugeridas, se seleccionó un ventilador de línea que nos permitiera variar el flujo de aire de 42.45 a 113.2 MCM contra una presión estática máxima de 38.1 mm. de agua.

Deflectores: Para diámetro 0.6 el número de éstos varía de 7 a  $12D$ , si  $D$  está en metros. (3).

Se escogió el menor para evitar problemas de adhesión del producto por su naturaleza misma y por ser una limitación en este tipo de secadores.

Arreglo 1:

Ancho: 5 cm.

largo: 85 cm.

pendiente: 3 cm. por metro.

número: 9 periféricos.

Arreglo 2:

Ancho: 9 cm.

largo: 85 cm.

pendiente: 6 cm. por metro.

número : 6 periféricos

TABLA NO. 1

CLASIFICACION POR METODO DE OPERACION.

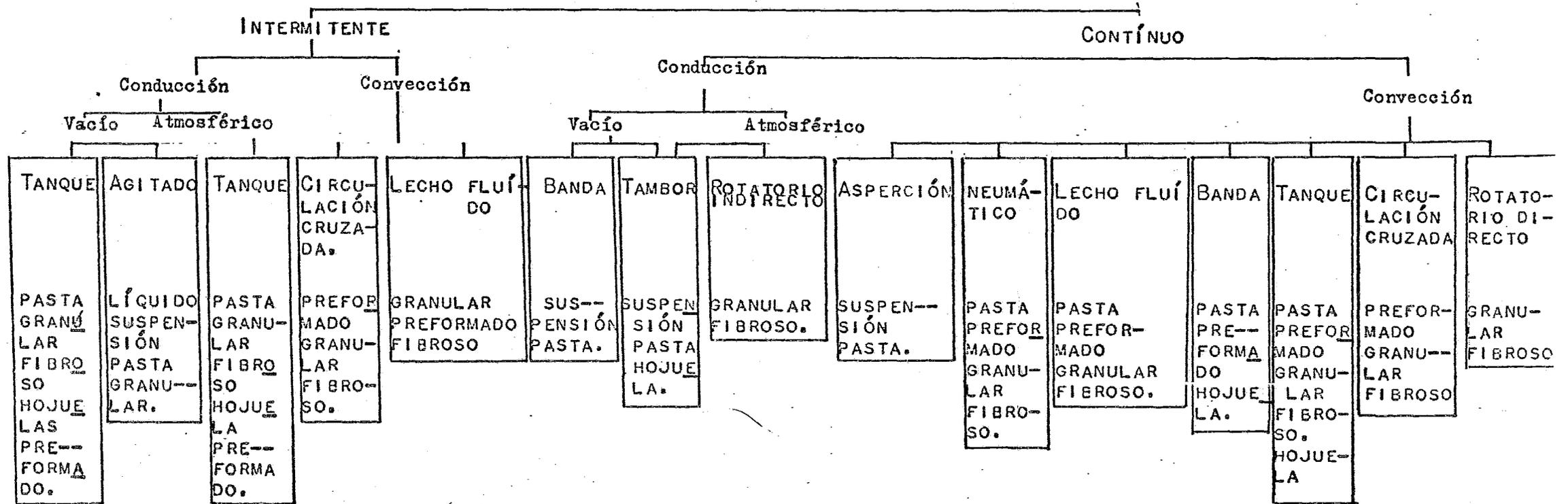


TABLA No. 2

CLASIFICACION POR FORMA FISICA DEL PRODUCTO.

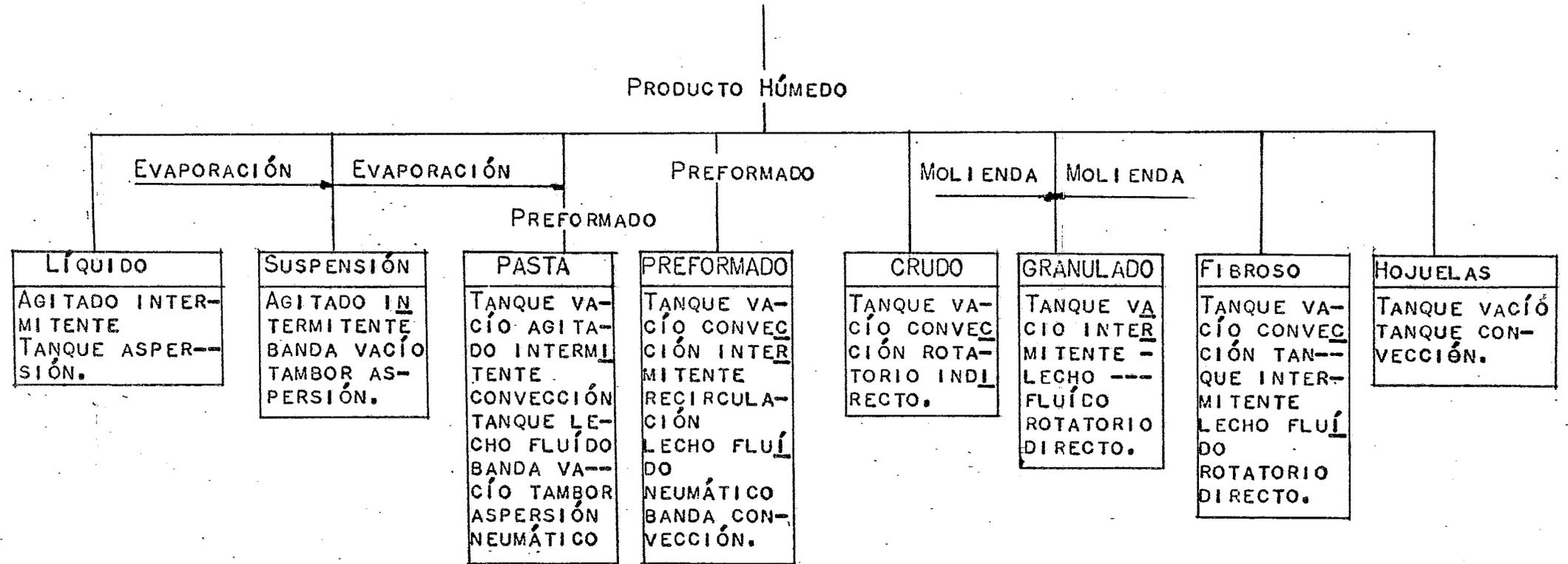


TABLA No. 3

CLASIFICACION POR CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO

PROCESO

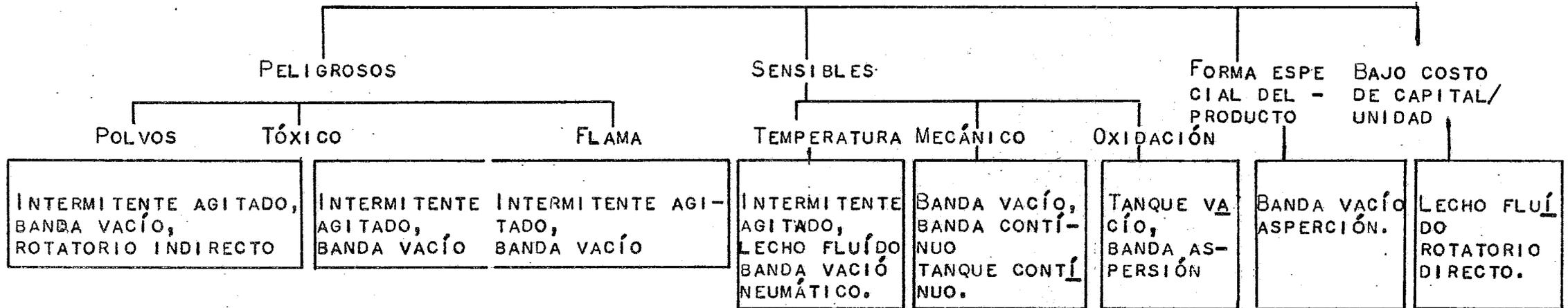


TABLA No. 4

CLASIFICACION POR ESCALA DE PRODUCCION

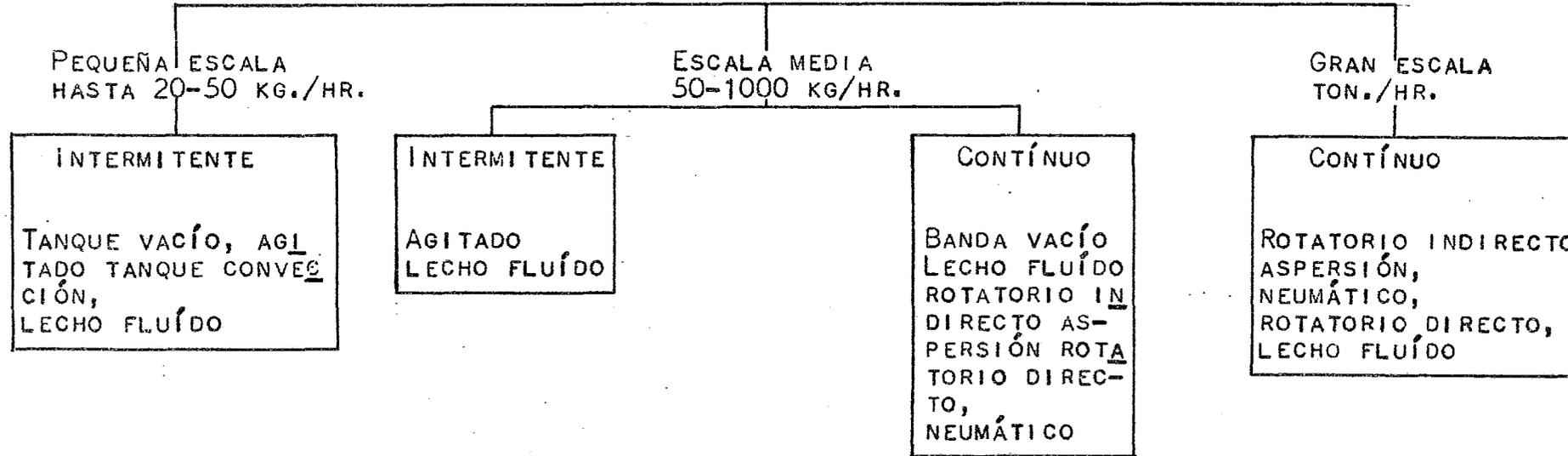
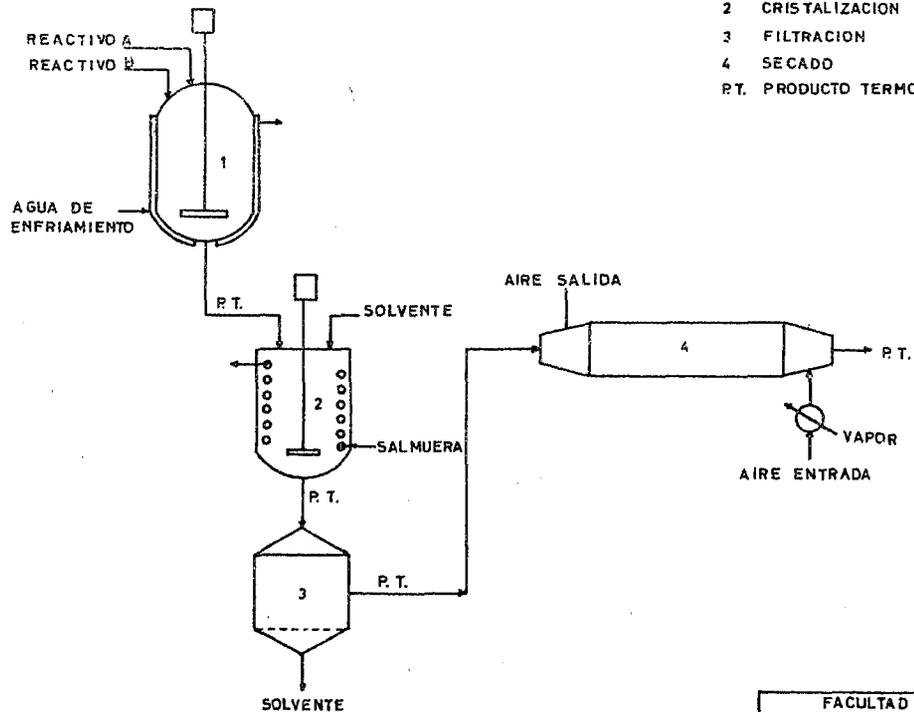


FIGURA No. 1

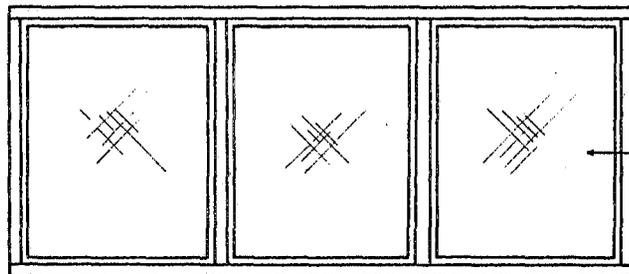
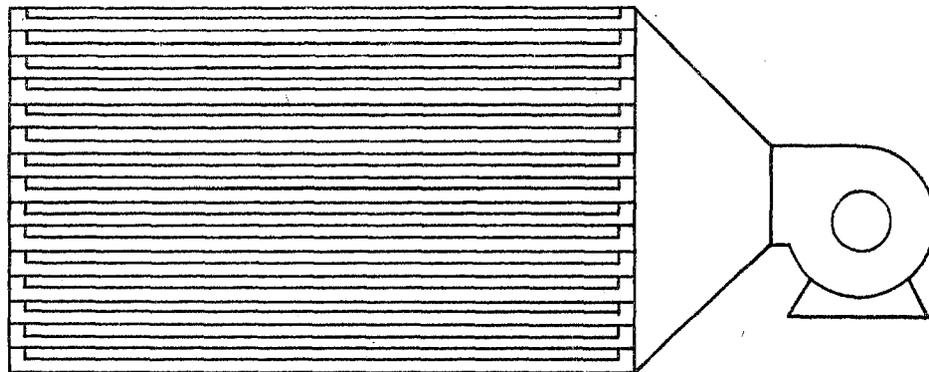
CODIFICACION

- 1 SINTESIS
- 2 CRISTALIZACION
- 3 FILTRACION
- 4 SECADO
- P.T. PRODUCTO TERMOSENSIBLE



FACULTAD DE QUIMICA	
U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
OBTENCION DEL PROD. TERMOSEN.	
J. ENRIQUE ORTIZ GALVEZ	
ESCALA : NO	FECHA: VIII-73

FIGURA No. 2



CORTE TRANSVERSAL

MALLA DE POLIETILENO  
BASE DEL LECHO

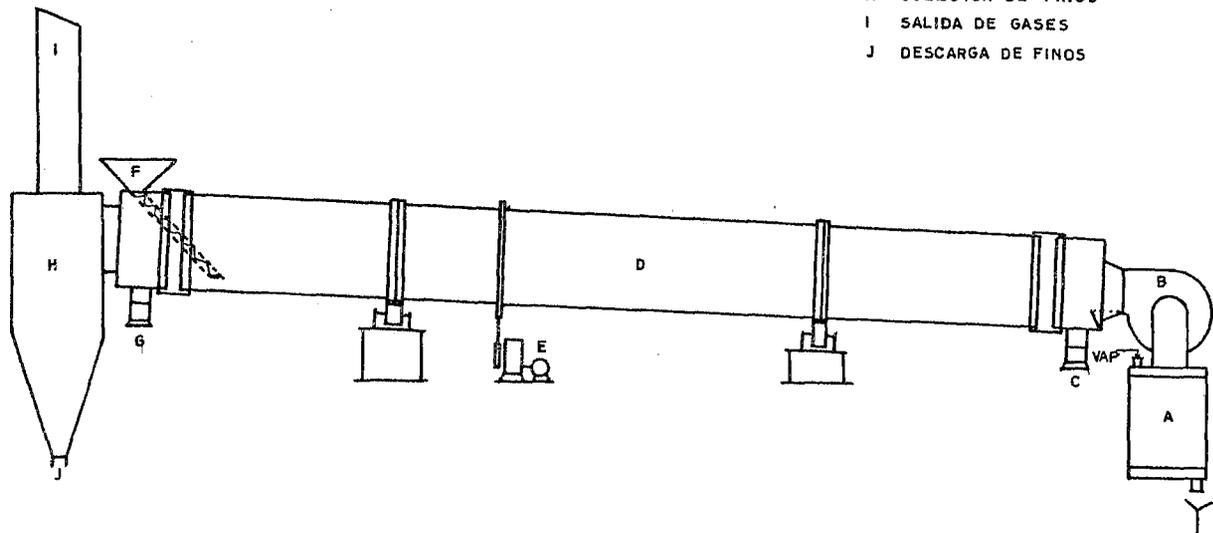
VISTA EN PLANTA DE UNA CHAROLA

FACULTAD DE QUIMICA	
U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
SECADOR DE CHAROLAS	
J. ENRIQUE ORTIZ GALVEZ	
ESCALA: 1:20	FECHA VIII-73

FIGURA No. 3

CODIFICACION

- A CALENTADOR DE AIRE
- B VENTILADOR
- C DESCARGA SALIDA
- D CUERPO DEL SECADOR
- E REDUCTOR
- F TOLVA DE ALIMENTACION
- G DESCARGA DE FINOS
- H COLECTOR DE FINOS
- I SALIDA DE GASES
- J DESCARGA DE FINOS



FACULTA DE QUIMICA	
U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
SECADOR ROTATORIO	
J. ENRIQUE ORTIZ GALVEZ	
ESCALA: 1:30	FECHA VIII-73

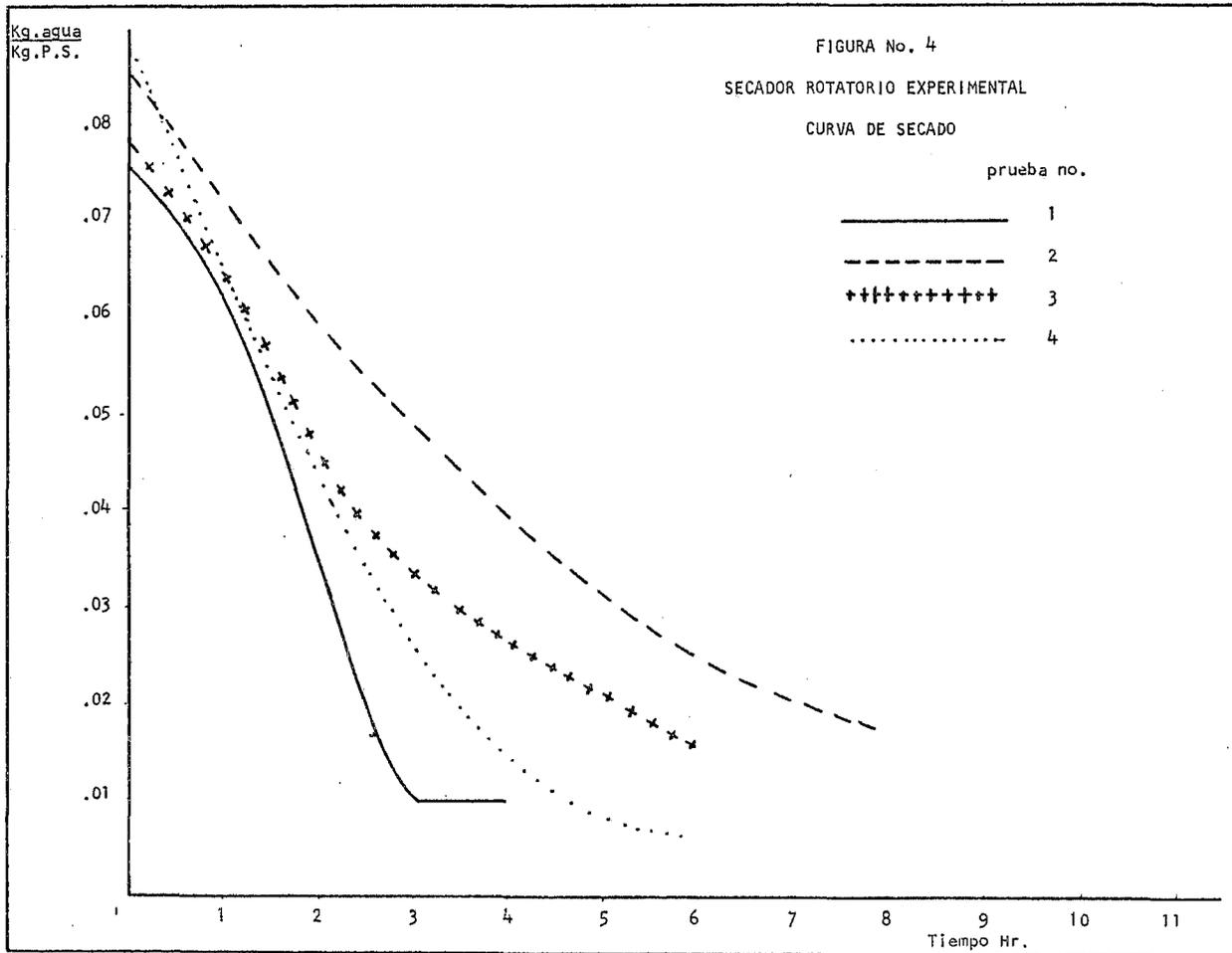


TABLA DE SELECCION

Nº 5

Tipo de secador	Velocidad de secado lb/ft <sup>2</sup> hr	Suspensiones	Pastas tortas	Polvo cris- tales	Granular prefer- mado.	Opera- ción	Costo capital	Costo ope- ración
Tambor agitado	1-5	**	**	**	*	Inter- miten- te.	\$	\$
Banda continua	2-10	-	**	-	***	conti- nuo	\$\$\$	\$\$
Película	3-6	***	**	-	-	"	\$\$	\$
Lecho fluido	2-50	-	-	***	***	" Inter- miten- te.	\$\$\$	\$\$
Neumático	50-250	-	**	***	**	Conti- nuo.	\$\$\$	\$\$
Rotatorio	5-6	-	**	**	***	"	\$\$	\$\$
Aspersión	7-33	***	-	**	-	"	\$\$\$\$	\$\$
Vacío	1-3	-	*	**	***	Inter- miten- te.	\$\$	\$\$

TABLA N° 6

SECADOR ROTATORIO EXPERIMENTAL

RESUMEN DE PRUEBAS.

1	2	3	4	5	6	7	8
PRUEBA N°	CARGA INICIAL KGS.	% AGUA BASE SECA	AGUA KGS.	AGUA EVAPORADA KG. HR.	TIEMPO HR.	TEMPERATURA AIRE °C.	VELOCIDAD DE EVAPORACION KG. AGUA × 10 <sup>-4</sup> KG. PS. HR.
1	430.0	7.61	30.44	0.0	0	25	0
1		6.34	25.36	5.07	1	40	120
1		3.62	14.49	10.86	2	40	270
1		1.04	4.19	10.29	3	40	250
1		1.01	4.07	0.11	4	40	2
2	629.0	8.69	50.32	0.0	0	20	0
2		7.29	42.22	8.09	1	25	139
2		5.48	31.74	10.47	2	30	181
2		5.26	30.45	1.28	3	25	22
2		4.68	26.63	3.81	4	35	65
2		2.77	16.05	10.57	5	35	182
2		2.56	14.83	1.21	6	35	20
2		2.45	14.22	0.61	7	35	10
2		1.72	10.00	4.21	8	50	72
2		1.62	9.40	0.60	9	50	10
2		0.90	5.25	4.14	10	60	74
2		0.70	4.07	1.17	11	60	20
2		0.60	3.49	0.57	12	60	9
3	580.0	7.88	42.39	0.0	0	20	0
3		6.70	36.20	6.18	1	25	115
3		4.73	25.44	10.75	2	30	200
3		3.28	17.65	7.78	3	35	144
3		2.80	15.08	2.56	4	40	47
3		2.03	10.95	4.16	5	40	77
3		1.52	8.18	2.76	6	40	51

TABLA N° 6  
CONTINUACION.

1	2	3	4	5	6	7	8
4	650	8.81	52.65	0	0	25	0
4		6.38	38.12	14.52	1	45	243
4		4.82	28.80	9.31	2	50	155
4		2.98	17.84	10.96	3	50	176
4		1.31	7.86	9.97	4	50	167
4		1.00	6.03	1.82	5	50	30
4		0.60	3.60	2.42	6	50	40
5	750	7.55	52.65	0	0	25	0
5		4.30	30.04	22.60	2	25	320
5		3.16	22.08	7.95	4	30	110
5		2.99	20.90	1.17	5	33	16
5		2.80	19.57	1.32	7	35	18
5		2.27	15.83	3.73	11	38	53
5		1.30	9.11	6.71	19	20	96
5		1.20	8.39	0.71	20	20	10
5		1.08	7.54	0.84	24	25	12
6	450	3.95	17.10	0	0	25	0
6		3.73	16.16	0.93	1	35	21
6		3.30	14.31	1.84	2	25	42
6		1.72	7.48	6.82	3	35	157
6		1.62	7.03	0.45	4	30	10
6		1.52	6.59	0.43	5	30	10
6		1.41	6.14	0.45	6	30	10
6		1.41	6.14	0	7	30	0
6		1.21	5.25	0.88	8	30	20
6		1.31	5.70	0.45	9	30	10
6		1.31	5.25	0	10	30	0
7	520	7.62	36.86	0	0	20	0
7		2.18	10.56	26.29	3	50	544
7		1.93	9.35	1.20	4	35	26
7		1.85	8.95	0.39	5	35	8
7		0.87	4.24	4.70	9	40	97
9	690	5.75	49.68	0	0	20	0
9		5.51	35.33	14.34	1	25	224
9		5.22	33.48	1.84	2	30	28

TABLA N°6  
CONTINUACION

1	2	3	4	5	6	7	8
9		4.90	31.43	2.04	4	30	31
9		4.13	26.47	4.95	5	30	77
9		3.86	24.74	1.73	6	30	22
9		3.74	23.98	0.75	7	30	11
9		3.71	23.91	0.07	8	30	1
9		3.71	23.77	0.14	10	30	2
9		3.69	23.63	13.13	11	30	2
9		3.63	23.29	0.33	12	35	5
9		1.83	11.73	11.55	13	40	180
9		0.82	5.29	6.43	14	40	100
10	475	5.75	34.20	0	0	20	0
10		6.73	29.68	4.51	1	30	102
10		5.19	22.90	6.77	2	30	153
10		3.81	16.88	6.01	3	35	136
10		2.93	12.93	3.94	4	35	89
10		2.35	10.37	2.55	5	35	57
10		2.08	9.17	1.19	6	40	27
10		1.88	8.30	0.87	7	40	19
11	600	7.75	43.26	0	0	24	0
11		7.29	40.62	2.57	1	30	46
11		7.29	40.62	0	2	34	0
11		3.50	19.59	21.02	3	40	378
11		3.19	17.81	1.77	4	40	31
11		2.87	16.03	1.77	5	40	31
11		2.66	14.86	1.16	6	40	20
11		1.52	8.47	6.38	7	48	114

TABLA N° 7  
 SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO EXPERIMENTAL  
 RESUMEN DE PRUEBAS.

PRUEBA N°	TOTAL INICIAL KGS.	TIEMPO HR.	% AGUA B. SECA	AGUA KG.	AGUA EVAPORADA KG. HR.	TEMPERATURA AIRE °C.	VELOCIDAD EVAPO RACION KG. AGUA KG. PS. HR. x 10 <sup>-4</sup>
1	15.00	0	7.50	1.05	0	11	0
1		1	4.60	0.65	0.39	25	279
1		2	0.50	0.07	0.57	30	408
1		3	0.16	0.02	0.04	30	28
2	15.00	0	8.00	1.12	0	25	0
2		1	3.20	.45	0.66	35	475
2		2	0.57	0.08	0.36	35	259
2		3	0.20	0.02	0.05	38	36
2		4	0.08	0.01	0.01	38	11
3	15.00	0	8.60	1.20	0	25	0
3		1	4.20	0.58	0.62	35	449
3		2	0.76	0.09	0.48	35	348
3		3	0.46	0.05	0.03	35	28
3		4	0.20	0.03	0.02	35	19
4	15.00	0	4.30	0.62	0	30	0
4		1	0.29	0.03	0.59	30	402
4		2	0.29	0.03	0.001	35	0.6
4		3	0.20	0.02	0.005	35	3.4
5	15.00	0	2.50	0.36	0	24	0
5		1	0.70	0.10	0.26	25	180
5		2	0.62	0.09	0.01	26	7
5		3	0.58	0.08	0.006	33	3
5		4	0.35	0.05	0.03	33	22
5		5	0.32	0.048	0.004	33	2
5		6	0.32	0.048	0.00	25	0
5		7	0.20	0.042	0.005	25	3

TABLA N° 8  
SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO INDUSTRIAL.  
RESUMEN DE PRUEBAS.

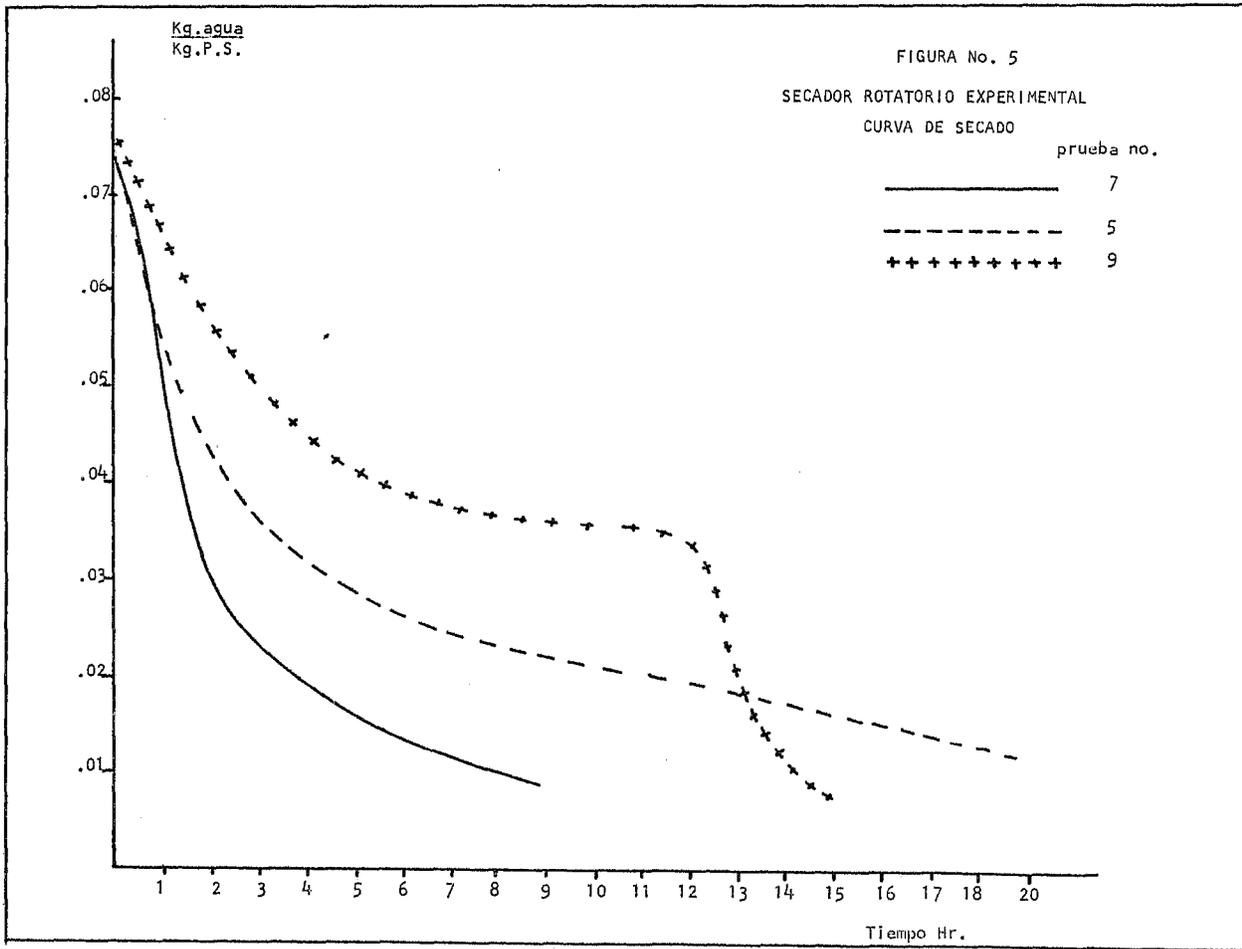
1	2	3	4	5	6	7	8
PRUEBA N°	TOTAL INICIAL KGS.	TIEMPO HR.	% AGUA B. SECA	AGUA KG.	AGUA EVAPORADA KG. HR.	TEMPERATURA AIRE °C.	VELOCIDAD EVAPORACION KG. AGUA x 10 <sup>-4</sup> KG. PS. HR.
2-29	360	0	2.39	8.42	0	27	0
		1	0.40	1.44	6.97	30	198
		2	0.23	0.84	0.59	31	16
2E-29	350	3	0.11	0.42	0.42	32	11
		0	4.02	13.54	0	30	0
		1	0.63	2.13	11.40	30	339
9-29	430	2	0.32	1.08	1.04	30	30
		0	9.80	38.48	0	21	0
		1	8.80	33.90	4.57	32	126
10-29	500	2	4.80	18.92	14.97	33	382
		3	0.50	2.00	16.92	34	432
		4	0.19	0.78	1.26	33	30
		5	0.17	0.70	0.08	33	2
		0	10.10	48.09	0	15	0
D-30	337	1	8.80	39.95	6.13	20	105
		2	7.50	34.43	4.91	25	108
		3	5.40	24.59	9.91	25	220
		4	4.60	21.19	3.39	25	74
		5	2.0	4.12	12.06	35	266
		6	0.40	2.05	7.06	35	155
		7	0.20	1.09	0.95	35	20
D-30	337	0	6.70	21.23	0	23	0
		1	5.50	17.56	3.66	23	116
		2	3.30	10.43	7.12	23	226
		4	1.70	5.55	4.87	23	154

TABLA N° 8  
CONTINUACION.

1	2	3	4	5	6	7	8
D-30	337	5	0.80	2.67	2.87	22	91
		6	0.70	2.32	0.34	22	10
E-30	514	0	11.00	50.98	0	24	0.0
		1	4.70	22.22	28.76	35	621
		2	0.60	2.88	19.33	35	417
		3	0.50	2.46	0.41	37	8
		4	0.40	1.99	0.46	38	9
		5	0.30	1.62	0.36	39	7
		6	0.30	1.62	0.0	39	0
G-30	477	0	11.00	47.41	0	29	0
		1	6.20	26.93	20.47	31	477
		2	3.40	14.98	11.94	35	278
		3	0.70	3.41	11.51	34	268
		4	0.60	2.68	0.72	34	16
		5	0.60	2.59	0.08	34	1
		6	0.58	2.50	0.09	34	2
		7	0.48	2.07	0.42	35	9
H-30	280	8	0.45	1.94	0.12	35	2
		0	17.20	41.16	0	32	0.0
		1	14.10	33.85	7.30	30	306
		2	12.30	29.42	4.42	30	185
		3	9.70	23.24	6.17	30	259
		4	6.40	15.43	7.75	30	325
		5	0.80	1.97	13.50	35	597
		6	0.40	1.07	0.89	35	37
J-30	206	7	0.40	1.03	0.04	35	1
		8	0.40	1.03	0.0	35	0
		0	17.30	30.46	0.0	21	0
		1	13.30	23.48	6.97	21	397
		2	12.30	21.67	1.80	21	102
		3	11.90	21.01	0.65	21	37
		4	11.90	19.65	1.35	25	77
		5	8.90	15.63	4.01	26	229
6	0.50	8.86	6.76	36	386		
7	0.29	0.51	8.34	36	476		

TABLA N° 8  
CONTINUACION.

1	2	3	4	5	6	7	8
I-30	428	0	6.80	22.47	0	29	0
		1	5.50	22.41	5.05	34	126
		2	3.80	15.40	7.00	35	175
		3	0.54	2.17	13.22	37	330
		4	0.39	1.40	0.76	37	19
		5	0.27	1.12	0.27	39	6
		6	0.26	1.08	0.03	37	0
L-30	561	0	7.10	37.58	0	21	0
		1	4.60	24.49	13.08	36	250
		2	3.10	16.46	8.02	36	153
		3	0.49	2.57	13.08	39	255
		4	0.34	1.82	0.73	39	13
		5	0.29	1.51	0.30	39	5
		6	0.25	1.31	0.20	39	3



Velocidad de secado  
 $\text{Kg.H}_2\text{O evap.} \times 10^{-4}$   
 $\text{Kg.P.S. Hr.}$

FIGURA No. 6

CURVA DE SECADO DEL SECADOR ROTATORIO EXPERIMENTAL

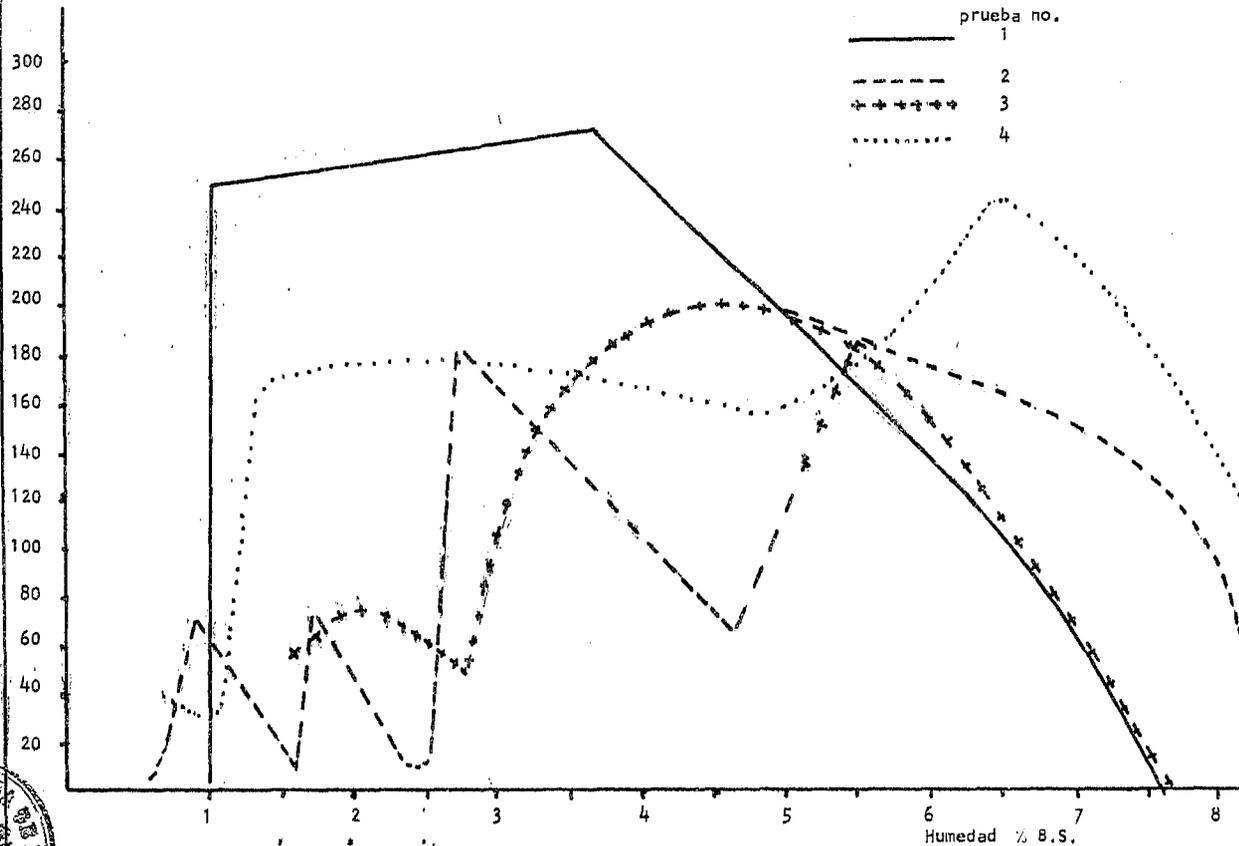


FIGURA No. 6a  
PRUEBA PILOTO

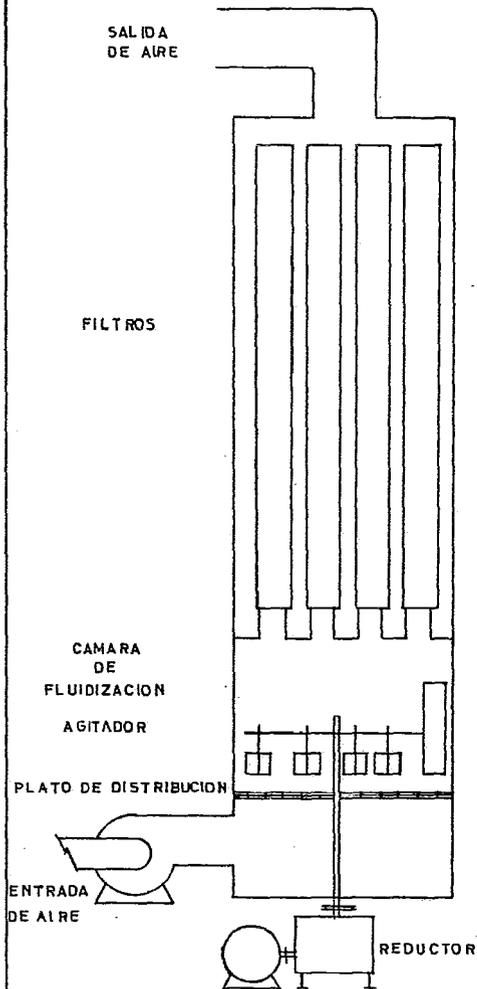
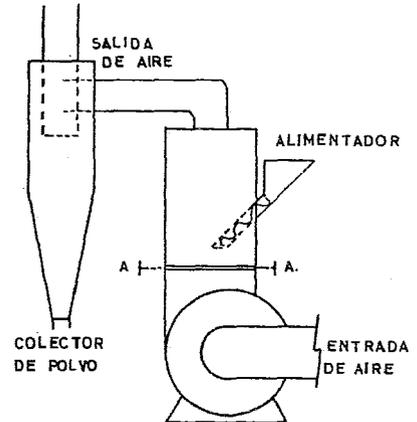
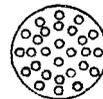


FIGURA No. 7  
PRUEBA PRELIMINAR



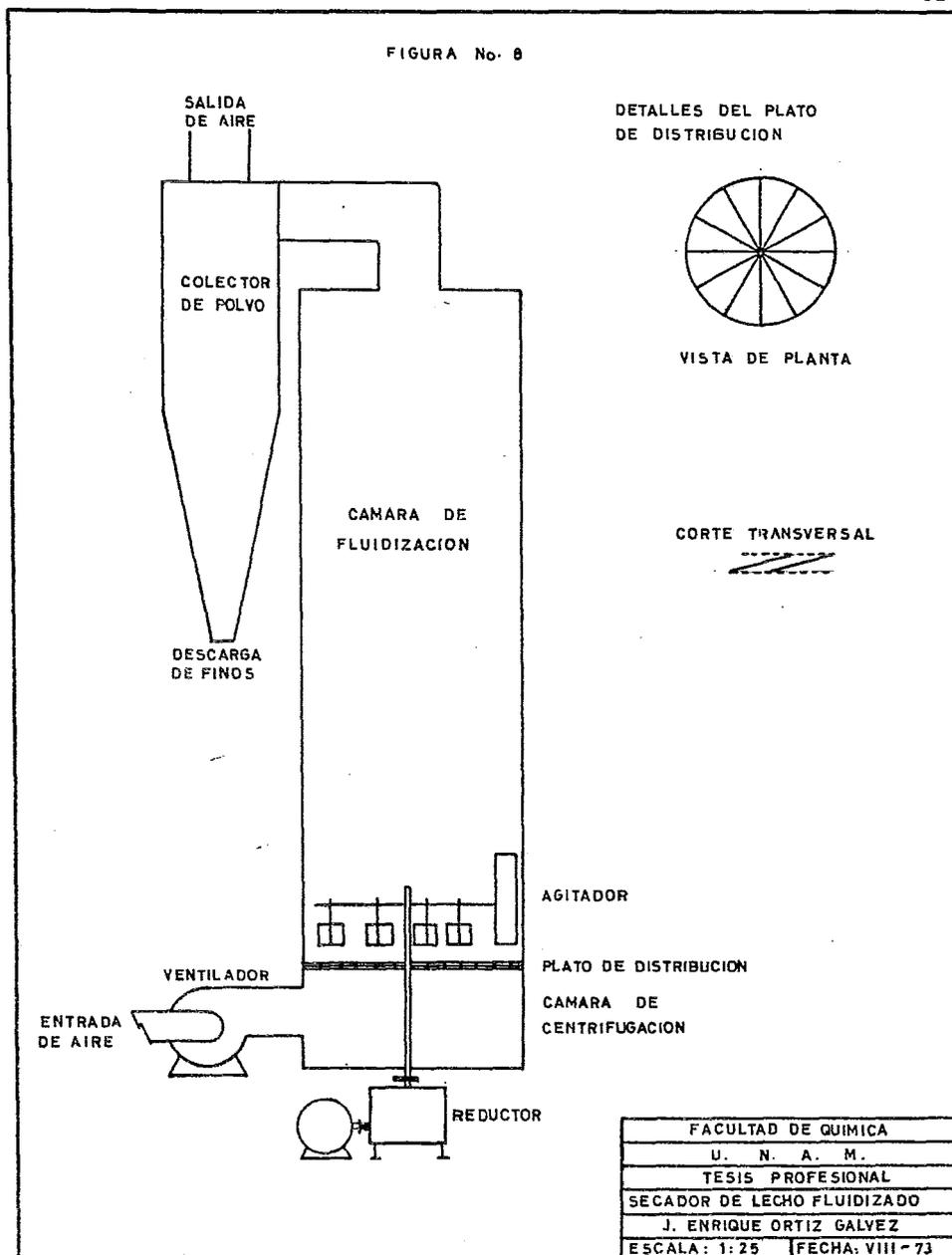
ESC.: 1:30



CORTE A-A.

FACULTAD DE QUIMICA	
U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO	
J. ENRIQUE ORTIZ GALVEZ	
ESCALA: 1:25	FECHA: VIII -73

FIGURA No. 8



kg. de agua  
kg. P.S.

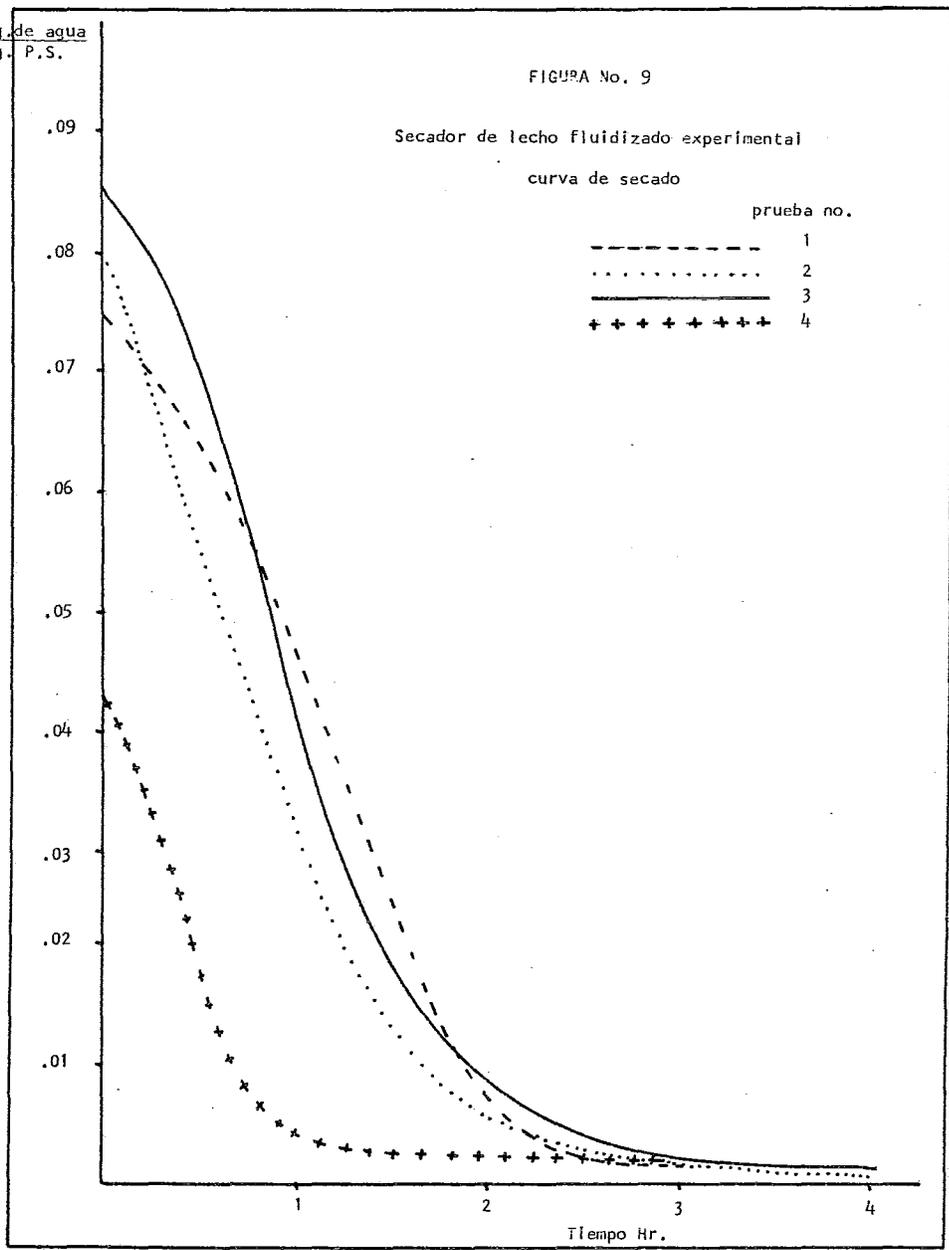
FIGURA No. 9

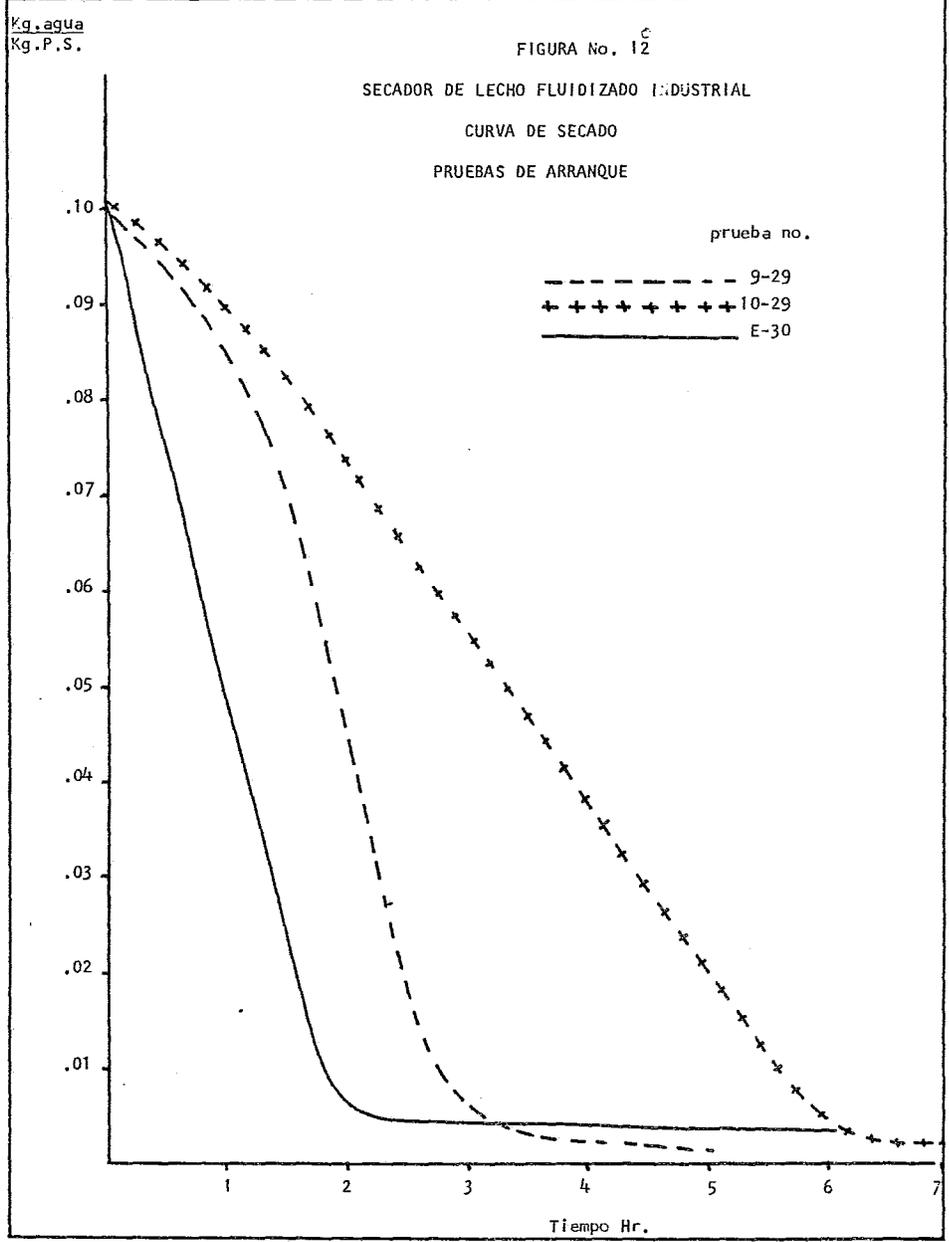
Secador de lecho Fluidizado experimental

curva de secado

prueba no.

- 1
- ..... 2
- 3
- + + + + + 4

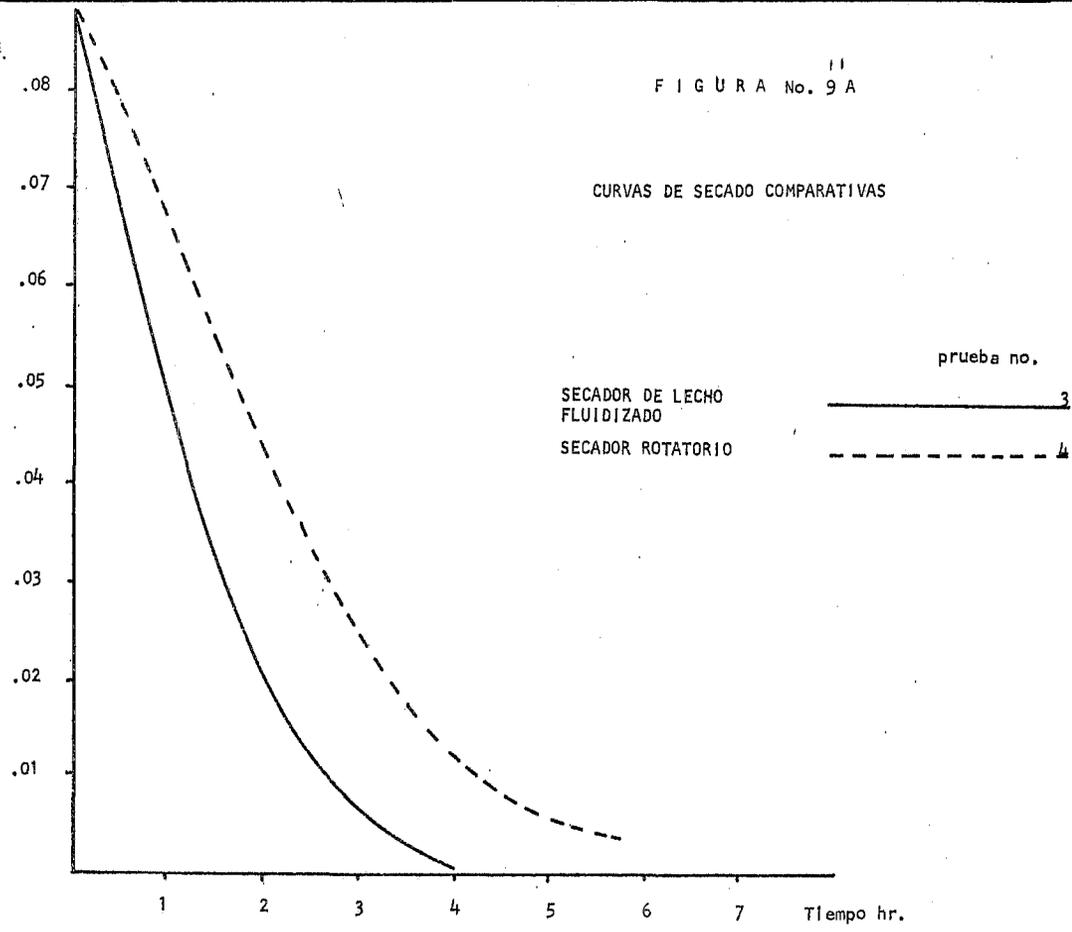




$\frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg. P.S.}}$

FIGURA No. 9 A

CURVAS DE SECADO COMPARATIVAS



prueba no.

SECADOR DE LECHO  
FLUIDIZADO  
SECADOR ROTATORIO

\_\_\_\_\_ 3  
----- 4

Tiempo hr.

FIGURA No. 13

SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO INDUSTRIAL

CURVA DE SECADO

PRUEBAS DE ARRANQUE

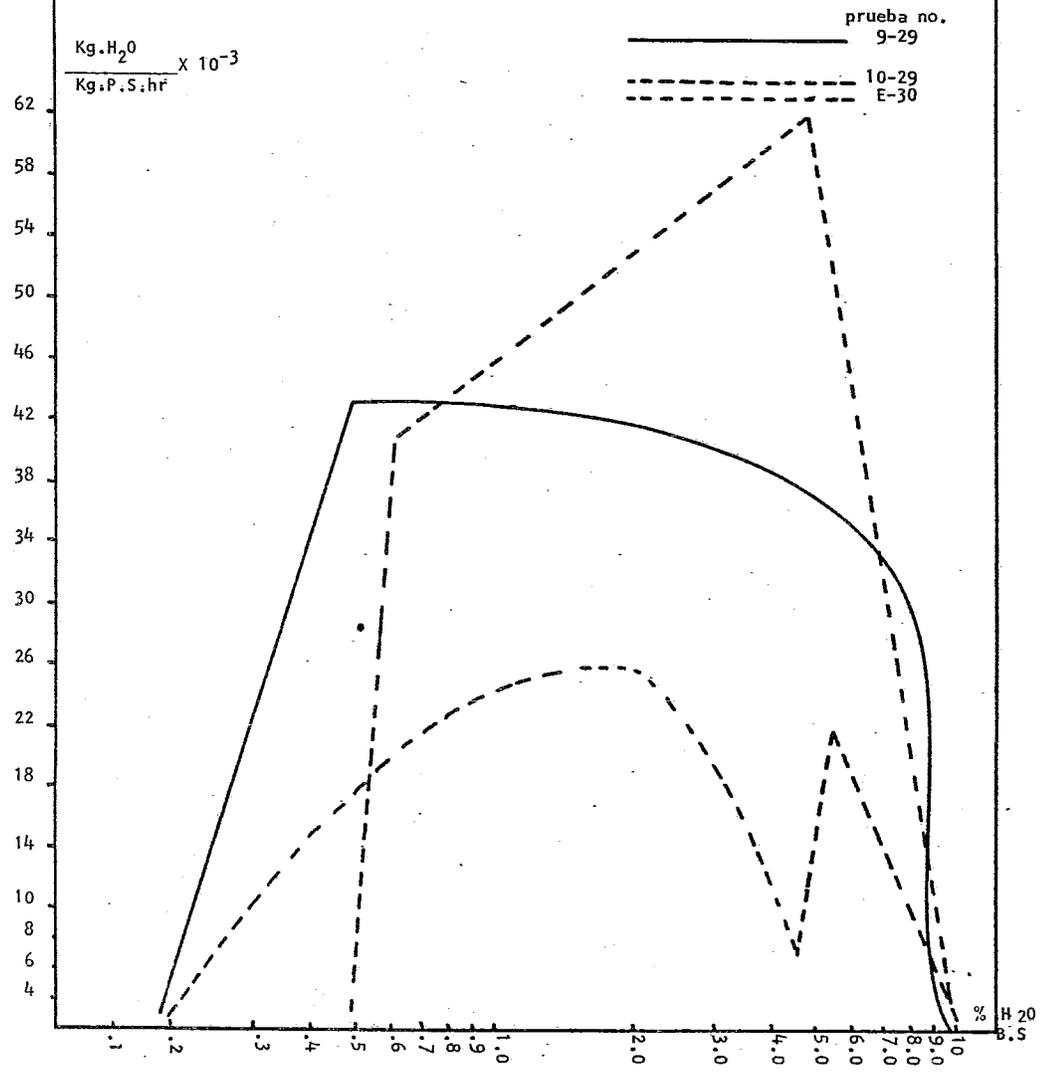
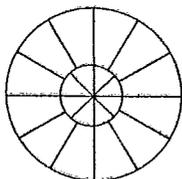
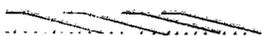


FIGURA No.12

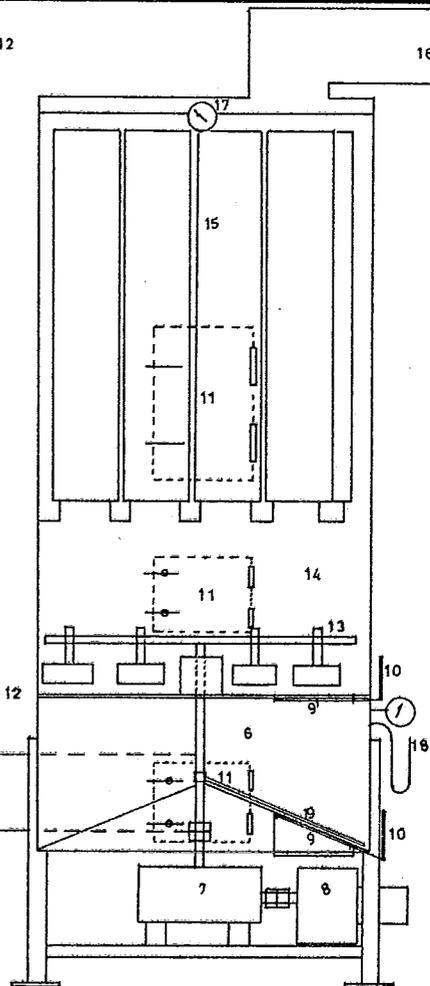
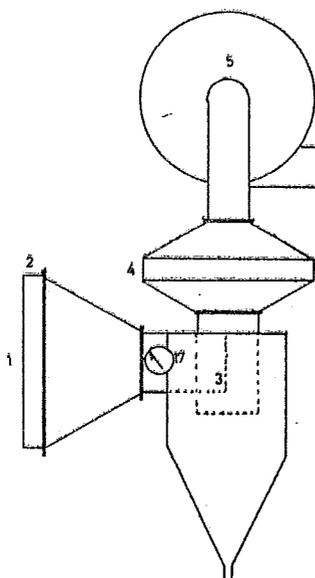
DETALLES DEL PLATO DE DISTRIBUCIÓN



VISTA EN PLANTA



CORTE TRANSVERSAL



FACULTAD DE QUÍMICA	
U. N. A. M.	
TESIS PROFESIONAL	
SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO	
J. ENRIQUE ORTIZ GALVEZ	
ESCALA . 1:25	FECHA: VIII - 73

## CODIFICACION FIGURA No. 12.

## SECADOR DE LECHO FLUIDO.

## UNIDAD INDUSTRIAL.

- 1.- ENTRADA DE AIRE.
- 2.- RADIADOR CONDENSADOR.
- 3.- SEPARADOR DE CONDENSADOS.
- 4.- RADIADOR CALENTADOR.
- 5.- VENTILADOR.
- 6.- CAMARA DE CENTRIFUGACION.
- 7.- REDUCTOR SECUNDARIO.
- 8.- MOTOREDUCTOR PRIMARIO.
- 9.- PUERTAS DE DESCARGA.
- 10.- MANERAL DE DESCARGA.
- 11.- PUERTAS DE ACCESO.
- 12.- PLATO DE DISTRIBUCION.
- 13.- AGITADOR.
- 14.- CAMARA DE FLUIDIZACION.
- 15.- FILTRO COLECTOR DE POLVOS.
- 16.- SALIDA DE AIRE.
- 17.- TERMOMETROS.
- 18.- MANOMETRO DIFERENCIAL.
- 19.- AGITADOR DE DESCARGA.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Foust A.  
Principios de Operaciones Unitarias.  
Cía. Ed. Continental 1969 México, cap. 18.
- 2.- Harmathy T. S.  
Industrial And Engineering Chemistry 8, 1, 92-95  
(1969)
- 3a- Kern D.  
Process Heat Transfer  
Mc. Graw Hill Kogakusha. Tokio. 1960.
- 3.- Knewle F.  
El Secado.  
Enciclopedia de la Tecnología Química, Tomo 1,  
Ed. Urmo, Bilbao (1966)
- 4.- MC. Cabe-Smith.  
Operaciones Básicas de Ingeniería Química,  
Ed. Reverté, México, 1968, cap. 29.
- 5.- Mc.Cormick B. Y.  
Industrial and Engineering Chemistry 62, 12, 84-86  
(1970).
- 6.- Noden D.  
Chemical Process Engineering 53, 4, 48-52  
(1972).
- 7.- NONHEBEL G.  
Drying Solids in the Chemical Industry.  
Butterworth London 1972.
- 8.- Perry J. H.  
Chemical Engineers' Handbook.  
Mc. Graw Hill Kogakisha, Tokio 4a. Ed.

- 9.- Process Engineering Sept., 95, 96 (1950).
- 9a.- Sherwood And Pigford.  
Absorption and Extraction.  
Mc. Graw Hill 2 Ed. N. Y. (1950)
- 10.- Schmidt And List.  
Material and Energy Balances.  
Prentice Hall N. Y. (1962) cap. 3
- 11.- Sloan Wheelock and Tsao.  
Chemical Engineering Junio 19,  
Drying reprint 1967
- 12.- Spraul R. J.  
Industrial And Engineering Chemistry 47 3, 368-374  
(1955).
- 13.- Vildebrant and Dry Den.  
Chemical Engineering Plant Design.  
Mc. Graw Hill-Kogakisha-Tokio 4a Ed. Cap. 6
- 14.- Ley del Impuesto Sobre la Renta  
Artículo 21, Fracción I  
Ed. Sistema Sd. 1970