

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO DE CAOLÍN COMPUESTO POR
SECADO SOLAR EN INVERNADEROS Y SECADO DIRECTO EN SECADOR
ROTATORIO**

DANIEL ENRIQUE CORTÉS BORDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO DE CAOLÍN COMPUESTO POR
SECADO SOLAR EN INVERNADEROS Y SECADO DIRECTO EN SECADOR
ROTATORIO**

DANIEL ENRIQUE CORTÉS BORDA

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Químico

Director
M.Sc. CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

DEDICATORIA

*Dedico este título a mis padres
por ser los mejores maestros.
Por haberme dado la oportunidad
de aprender
y de vivir*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ingeniero Ricardo Borda por darme la oportunidad de participar en este diseño. Por compartirme parte de su experiencia y conocimiento en diseño y montaje de plantas de procesos.

Agradezco al profesor Crisóstomo Barajas por brindarme su apoyo en la dirección de este proyecto de grado.

Agradezco a todos los maestros de la escuela de Ingeniería química quienes con su enseñanza dejaron huella en mi, contribuyendo en mi formación profesional y personal.

CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Marco teórico	3
2.1. Generalidades del caolín	3
2.2. Conceptos de secado y humedad de equilibrio	5
2.3. Velocidad de secado.....	6
2.4. Clasificación de equipos de secado.....	9
2.4.1. Según la forma de alimentar el material:.....	10
2.4.2. Según el mecanismo de transferencia de energía:	10
2.4.3. Según la naturaleza de la sustancia a secar:.....	11
2.5. Diseños de secadores	12
3. Metodología.....	13
3.1. Visita a la mina:	14
3.2. Revisión bibliográfica:	14
3.3. Identificación de las variables de diseño:.....	14
3.4. Experimentación:	15
3.5. Identificación y selección del secador:.....	16
3.6. Ecuaciones de balance:.....	16
3.6.1. Balance de masa:.....	16
3.6.2. Balance de energía:	16
3.7. Diseño del secador:	17
4. Desarrollo experimental.....	18

4.1.	Determinación de variables críticas de diseño:.....	18
4.2.	Contenido de humedad del mineral:	18
4.3.	Condiciones ambientales:.....	19
4.4.	Tiempo de secado del material:.....	20
4.5.	Planteamiento de las ecuaciones de balance:.....	21
4.5.1.	Balance de masa:.....	21
4.5.2.	Balance de energía	23
5.	Resultados y análisis	25
5.1.	Identificación y selección del secador:.....	28
5.2.	Etapa previa de secado:	28
5.3.	Etapa principal de secado:.....	30
5.3.1.	Bandejas secadoras:.....	32
5.3.2.	Transporte neumático:	32
5.3.3.	De lecho fluidizado:	33
5.3.4.	De circulación transversal	33
5.3.5.	Rotatorios:.....	34
5.4.	Diseño del secador	36
6.	Conclusiones	48
	Bibliografía	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva típica de secado	8
Figura 2. Velocidad de secado contra contenido de humedad	8
Figura 3. Velocidad de secado contra contenido de humedad	9
Figura 4. Esquema de la metodología	13
Figura 5. Esquema general del sistema de secado	21
Figura 6. Diagrama secuencial de las etapas de secado	30
Figura 7. Movimiento del sólido en los elevadores de un secador rotatorio	34
Figura 8. Curva de secado de caolín	43
Figura 9. Elevadores con 45° de inclinación.	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseños de secadores según su forma de operación	12
Tabla 2. Condiciones ambientales de la región.....	26
Tabla 3. Tiempo de secado de caolín expuesto al sol.....	29
Tabla 4. Características típicas de un secador rotatorio.....	35
Tabla 5. Cantidades conocidas de las corrientes	37

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO DE CAOLÍN COMPUESTO POR SECADO SOLAR EN INVERNADEROS Y SECADO DIRECTO EN SECADOR ROTATORIO*

AUTOR: Daniel Enrique Cortés Borda**

PALABRAS CLAVE: Secado, Secador rotatorio, arcilla de caolín, caolinita

DESCRIPCION:

En este trabajo se realizó el diseño de un sistema para secar el caolín extraído en la vereda de Barroblanco en Oiba, Santander. El mineral explotado en la región tiene un alto contenido de humedad, lo cual hace que el costo de transporte desde su lugar de extracción hasta su lugar de comercialización sea tan elevado que hace que la explotación no sea rentable.

El secado del mineral en el sitio de explotación es una alternativa que reduce el contenido de humedad del material, permitiendo transportar mayor cantidad del mineral a menor costo. Para este propósito se diseñó un sistema de secado compuesto de dos etapas. La primera etapa se realiza de forma discontinua en invernaderos plásticos aprovechando la energía solar para reducir el contenido de humedad de un 30% a un 15%. El tiempo de secado en la etapa discontinua es de 3 días.

La segunda etapa del proceso se realiza en un secador rotatorio con flujo directo de una mezcla de aire caliente y gases de combustión. El proceso se realiza con flujo en contracorriente empleando un quemador dual que puede funcionar con Diesel o gas natural dependiendo de la disponibilidad de los combustibles en la región.

La integración de estos dos procesos de secado permite reducir el contenido de humedad del material de un 30 % a un 1 % en peso.

* Tesis de Grado modalidad Investigación

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira (UIS).

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A KAOLIN CLAY DRYING SYSTEM COMPOSED BY SOLAR DRYING IN GREENHOUSES AND A DIRECT ROTARY DRYER*

AUTHOR: Daniel Enrique Cortés Borda**

KEYWORDS: Drying, Rotary dryer, kaolin clay, kaolinite

DESCRIPTION:

This work was carried out to design a system for drying kaolin clay mined in Barroblanco, Oiba, Santander. The mined kaolin from the region has high moisture content, this makes that the costs of transportation, from the mining place to the market place are so high that the operation is not profitable.

Drying the mineral in situ is an alternative that reduces the moisture content of material, allowing the transportation of more quantity of mineral at a lower cost.

For this purpose was designed a drying system consisting of two stages. The first stage is carried out discontinuously in plastic greenhouses solar to reduce the moisture content of 30% to 15%. The drying time in the discontinuous phase is 3 days.

The second stage of the process is conducted in a rotary dryer with direct flow of a mixture of hot air and combustion gases. The process is carried out in countercurrent flow using a dual burner that can run on diesel or natural gas depending on the fuel availability in the region.

The integration of these two drying processes reduces moisture content of material by 30% to 1% by weight.

* Thesis of Degree Investigation Modality

** Physical - Chemical Engineering College, School of Chemical Engineering. M.Sc.Crisóstomo Barajas Ferreira (UIS).

1. INTRODUCCIÓN

La explotación minera de caolín a cielo abierto en el departamento de Santander es una importante actividad económica que genera ingresos para la región y empleo directo e indirecto para la población de la localidad de Oiba. Sin embargo, el alto contenido de humedad que se encuentra en el mineral en su estado natural y la ubicación remota de las minas de caolín hacen que el costo de transporte del mineral desde el sitio de explotación hasta el sitio de comercialización sea un factor determinante en la rentabilidad de la explotación minera.

El alto contenido de humedad encontrado en la arcilla de caolín durante el proceso de extracción es una problemática que se ha presentado a nivel mundial desde la década de los 60, generando sobrecostos en las operaciones de transporte hasta el punto de impedir la explotación del mineral en algunas regiones remotas.

Con base en esta situación, la opción de secar el mineral en el sitio de explotación se transforma en una necesidad para el desarrollo de la actividad y apunta a la búsqueda de alternativas de diseño que sean económicamente viables y den solución al problema de una forma sencilla y eficiente, con el fin de realizar la explotación del mineral y lograr mayor desarrollo económico en la región.

Por las propiedades y características de este mineral es posible transformar el material mediante la secuencia e integración de procesos y operaciones sencillas, de modo que se retire el alto contenido de humedad y el transporte deje de ser un factor limitante de la operación y sea viable la comercialización de caolín en polvo, útil para la fabricación de materiales de construcción.¹

Este proyecto se realizó en busca de la mejor alternativa para desarrollar el secado del caolín que se extrae en la vereda de Barroblanco en Oiba, Santander.

¹ Murray, H. (2000) *Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview*. Applied Clay Science 17 (2000)207-221

Como anteriormente se mencionó, la implementación de un sistema de secado se transforma en una necesidad debido a las condiciones de explotación y transporte.

Para secar el mineral se implementará un sistema de secado compuesto por dos etapas. En la primera etapa se seca el mineral de forma natural, aprovechando la energía solar para secar el caolín por lotes en invernaderos. En la segunda etapa de secado, el material se procesa en un secador rotatorio directo con un mecanismo de combustión dual que puede funcionar con gas natural o con Diesel, según la disponibilidad del combustible.

Con la implementación de esta combinación de sistemas de secado se espera reducir el contenido de humedad del mineral hasta el punto que se haga rentable la explotación de caolín en las remotas minas de la vereda de Barroblanco, Santander.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del Caolín

Se llama caolín a las arcillas que tienen alto contenido de caolinita, sin embargo pueden contener algún porcentaje de Dickita y Nacrita² (isómeros poco comunes de la caolinita). Estas arcillas se caracterizan por su color blanco, por su suavidad al tacto y por su elevada higroscopicidad.³ Es por esto que el caolín en su estado natural se encuentra con un porcentaje de humedad promedio entre el 10% y el 18% en peso. Claro está que en algunos casos es posible encontrar caolín con porcentaje de humedad de hasta el 30%.⁴

El componente principal del caolín es el silicato de aluminio dihidratado ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) que se origina por descomposición hidrotermal de los feldespatos de algunas rocas ricas en aluminio como el granito y los pórfiros.

La caolinita sufre un importante cambio en su estructura molecular al alcanzar durante el proceso de calcinación (450°C - 600°C), dependiendo de su composición⁵. A partir de esta temperatura, se disocian las moléculas de agua estructural del silicato de aluminio, metacaolinita (silicato de aluminio).

Este mineral al igual que el caolín tiene diferentes aplicaciones industriales, sin embargo, durante el proceso de secado del caolín, la reacción de formación de metacaolín es indeseable debido a que se pierden algunas propiedades específicas del caolín. El límite de temperatura de formación de metacaolín es un parámetro que se debe tener en cuenta durante el diseño de secadores de caolín.

² Fassbender, H. W.; Bornemisza, E. (1987) *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. 1ra edición. Editorial IICA. San José.

³ Vila, T.(1936) *Recursos minerales no-metálicos de Chile* .Edición 2 Departamento de Minas y Petróleo. Chile

⁴ Avgustinik, A.I. (1983) *Cerámica*. Segunda edición. Editorial Reverté. Barcelona

⁵ Kakali, G., Perraki, T., Tsvilis, S., Badogiannis, E. (2001) *Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity*. Applied Clay Science 20 Ž2001. 73–80

La explotación de este mineral se realiza en minas a cielo abierto, donde puede llegarse a extraer hasta 150.000⁶ toneladas por año en minas a gran escala. Sin embargo en algunas regiones la explotación del mineral se realiza manualmente y a pequeña escala.

Algunas propiedades como su blancura, flexibilidad y elevada capacidad de absorción hacen de este un mineral de valor agregado pues se utiliza como materia prima para la elaboración de papel, cerámicas, materiales de construcción y otros productos elaborados.

Otra de las propiedades del caolín que lo hace atractivo es su estabilidad y alta resistencia al ataque químico, por esto se emplea como material inerte en la elaboración de pinturas, medicinas, pesticidas, abonos y alimento para animales.

En la industria química se utilizan cantidades considerables de caolín como materia prima para la elaboración de zeolitas sintéticas, catalizadores, fibra de vidrio y algunas sales de aluminio como sulfato, fosfato y cloruro de aluminio.⁷

La industria productora de papel consume la mayor parte de la producción mundial de caolín. El mineral se emplea para proporcionar el acabado superficial al papel y también como agente blanqueador y material constituyente. Sin embargo para que el caolín sea materia prima del papel debe cumplir estrictas especificaciones de pureza y tamaño de grano.

Otra de las aplicaciones industriales en la que se emplea el caolín como materia prima es en la elaboración de cerámicas y materiales refractarios. Al igual que en la industria del papel, se requiere estricto cumplimiento de determinados parámetros de calidad.

⁶ Instituto geológico y minero de España. Panorama minero caolín y arcillas caoliníticas 2005.

⁷ Murray, H. (2000) *Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview*. Applied Clay Science 17 (2000)207-221

La blancura del caolín está fuertemente relacionada con la pureza del mismo, los caolines de mejor calidad tienen un color blanco nieve. El principal contaminante del caolín es el óxido de hierro. Esta sustancia en bajas concentraciones da un indeseable tono rojizo a la arcilla. La presencia de otros elementos como el cobre, cromo y magnesio en la estructura del caolín dan tonos rojizos, amarillentos, pardos y verdosos al mineral.⁸

Las especificaciones del caolín dependen del producto que se va a elaborar y de las condiciones de la planta que la va a procesar. El caolín para la manufactura de cerámica debe tener una composición química consistente de modo que no se presenten variaciones en las características de ignición y vitrificación del cuerpo de la cerámica.⁹

2.2. Conceptos de Secado y Humedad de Equilibrio

El secado es un proceso de intercambio de masa y energía en el cual se busca retirar el contenido de humedad de una muestra mediante la aplicación de calor, con el fin de adecuar el material para su posterior proceso o comercialización. Se define al secado como el proceso de eliminación de humedad de sólidos por evaporación en una corriente gaseosa¹⁰

La presión de vapor ejercida por un líquido contenido en un sólido (humedad) depende de la naturaleza del sólido y la temperatura¹¹. Es esta presión la que establece hasta qué punto es posible secar el material.

Si se expone un sólido húmedo a una corriente gaseosa con determinado contenido de humedad, el sólido perderá humedad por evaporación o ganará humedad del gas, hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea

⁸ Chandrasekhar, S.; Ramaswamy, S. (2006) *Iron minerals and their influence on the optical properties of two Indian kaolin*. Applied Clay Science 33 (2006) 269–277

⁹ Chandrasekhar, S.; Ramaswamy, S. (2002) *Influence of mineral impurities on the properties of kaolin and its thermally treated products*. Applied Clay Science 21 (2002) 133– 142

¹⁰ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

¹¹ Ibid

igual a la presión de vapor del gas.¹² Es en este punto donde se establece equilibrio entre la humedad del sólido y las condiciones del entorno.

La presión parcial en el equilibrio para un sólido es independiente de la naturaleza del gas seco, siempre que este sea inerte frente al sólido y sea la misma presión en ausencia de gas no condensable.

En las operaciones de secado, el equilibrio se establece cuando el gas de secado alcanza la humedad de saturación. Frecuentemente se encuentra en los sistemas de secado que el gas empleado para secar el sólido es aire y el líquido a secar es agua. En este caso la humedad de saturación está dada por:

$$H_s = p_s / (P - p_s) * 18/28,9 \quad (1)$$

Donde H_s es la humedad de saturación (kg H₂O/kg aire seco), p_s es la presión de vapor del agua a la temperatura de saturación, P es la presión absoluta del sistema, y 18/28,9 es la relación de pesos moleculares del agua y el aire.

Las variables de mayor importancia en el momento de diseñar los sistemas de secado son: la temperatura del gas que se emplea para secar el sólido, el contenido de humedad de dicho gas y el tiempo en el que se encuentran en contacto el sólido y el gas. La temperatura y contenido de humedad se encuentran de forma indirecta en la ecuación 1. El tiempo de contacto se determina según la velocidad de secado del material.

2.3. Velocidad de Secado

Con el fin de establecer el tiempo de operación del secador y de determinar las dimensiones del equipo, se necesita conocer el tiempo que tarda el material en secar de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas. Poco se conoce del mecanismo de secado en general, es por esta razón que se requiere

¹² TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

de pruebas experimentales para establecer las condiciones de secado de los materiales.

Una de estas pruebas experimentales es la determinación de la velocidad de secado. Esta sencilla prueba proporciona información relevante no solo para la operación de secado por lotes, sino también para la operación de secadores continuos.

Es posible determinar la velocidad de secado de forma experimental sometiendo una muestra del material en cuestión a secado en una corriente de aire en el laboratorio. Donde se puede establecer por diferencia de peso la masa de humedad evaporada, de modo que es posible determinar la masa de humedad retirada de la muestra en función del tiempo.

Las condiciones geométricas, de temperatura, humedad y transferencia de calor de la muestra y del aire deben ser semejantes a las condiciones reales.

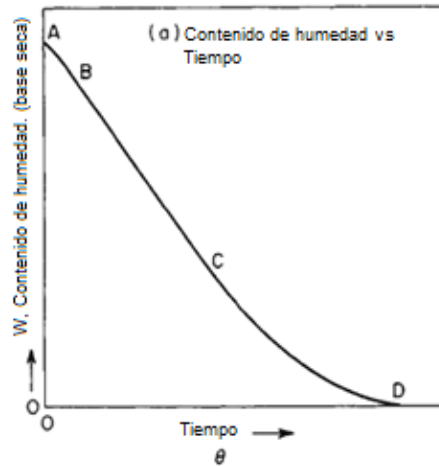
A partir de los datos obtenidos durante una prueba de este tipo es posible graficar una curva de contenido de humedad como función del tiempo. Esta función es para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes bajo las mismas condiciones de secado de la prueba.¹³

Una curva típica de secado relaciona el tiempo en las abscisas con la humedad en base seca del sólido en las ordenadas.

En las figuras 1-3 se puede observar que existen diferentes periodos de secado. El periodo AB es una etapa de precalentamiento donde la rapidez de secado incrementa con el tiempo. Esta etapa se da mientras se retira la mayor parte de la humedad contenida en la superficie del sólido.

¹³ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

Figura 1. Curva típica de secado

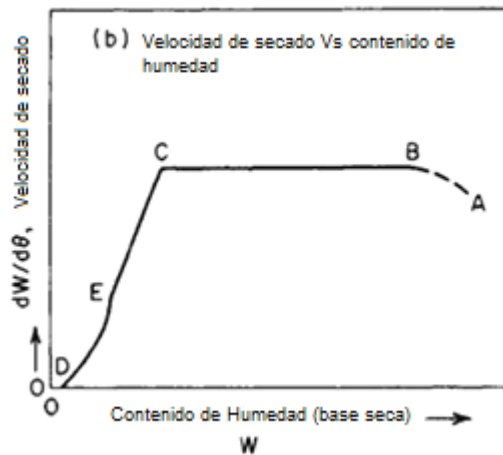


Fuente: PERRY, J. Manual del ingeniero químico.

La pendiente de la curva de secado representa la variación de la humedad en el sólido con respecto al tiempo, es decir, velocidad de secado.

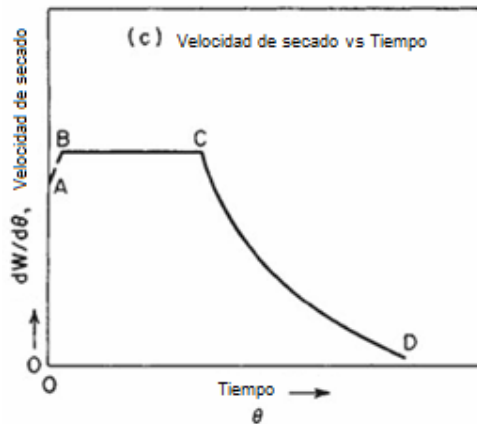
Para el diseño de equipos conviene analizar el comportamiento de la velocidad de secado con el tiempo o con la variación de humedad. Esto con el fin de utilizar eficientemente la energía y lograr que el secado del material sea rentable.

Figura 2. Velocidad de secado contra contenido de humedad



Fuente: PERRY, J. Manual del ingeniero químico.

Figura 3. Velocidad de secado contra tiempo



Fuente: PERRY, J. Manual del ingeniero químico.

El periodo de secado BC es una etapa en la que la humedad contenida dentro del sólido puede llegar a la superficie mediante el mecanismo de difusión.

El punto C en las gráficas representa el contenido de humedad crítica. A partir de este punto finaliza la etapa de secado constante y empieza a decrecer la rapidez de secado.

En las operaciones de secado es conveniente desde el punto de vista económico tener en cuenta este valor de humedad crítica. A partir de este punto se invierten grandes cantidades de energía para retirar poco humedad.

2.4. Clasificación de Equipos de Secado

Los secadores pueden clasificarse según la forma de alimentar el material a secar, según el mecanismo de transferencia de energía y según la naturaleza de la sustancia a secar. Existen múltiples diseños de secadores, pero en general surgen de la combinación de estas tres características básicas. La clasificación de los secadores es de la siguiente manera:

2.4.1. Según la forma de alimentar el material:

El material puede alimentarse al secador de forma continua o por lotes.

✓ **Secadores continuos:**

Estos equipos operan en estado estacionario, generalmente el equipo necesario es pequeño en comparación con la cantidad de producto¹⁴. La operación continua es versátil pues permite integrar procesos en la cadena de producción, evitando el almacenamiento intermedio de material.

Empleando secadores continuos se obtiene producto con un contenido de humedad más uniforme que en los secadores por lotes y el costo de secado por unidad de producto es relativamente más pequeño.¹⁵

✓ **Secadores por lotes:**

La operación de estos equipos se realiza de forma cíclica y en estado no estacionario.

Se carga inicialmente el material a secar, se lleva a las condiciones de secado y finalmente se retira el material seco para repetir el proceso con un nuevo lote.

El hecho de llevar el material a las condiciones de secado una y otra vez hace que la operación sea relativamente costosa, por esta razón el diseño de este tipo de secadores se limita a operaciones a pequeña escala, de investigación o al proceso de materiales valiosos cuyo costo sea levemente afectado por las operaciones de secado.

El secado por lotes aprovechando la energía solar es un proceso lento que se hace viable económicamente si se dispone de gran área para realizar el secado.

2.4.2. Según el mecanismo de transferencia de energía:

El calor que emplea el equipo para retirar la humedad del material puede ser obtenido de forma directa o indirecta.

¹⁴ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

¹⁵ Ibid.

✓ **Secadores directos:**

En estos equipos la transferencia de calor se realiza por el mecanismo de convección, esto sucede al exponer el material a secar con un gas caliente que retira el contenido de humedad de la muestra.

Generalmente el gas empleado es aire, pero cuando el material a secar es resistente a las altas temperaturas se pueden emplear gases de combustión para realizar el secado.

✓ **Secadores indirectos:**

En los secadores indirectos se proporciona el calor para evaporar la humedad de forma independiente al gas que va a retirar dicha humedad. En estos tipos de secadores predominan los mecanismos de transferencia de calor por radiación y conducción. Es por esto que en algunos secadores de este tipo se proporciona el calor a través de paredes metálicas en contacto con la sustancia a secar.

Este tipo de secadores se emplean generalmente cuando las propiedades del material a secar se afectan con la exposición directa al gas de secado.

2.4.3. Según la naturaleza de la sustancia a secar:

En este caso el diseño de los secadores no se limita a dos opciones, pues la forma en que se encuentran los materiales a secar resulta ser muy variada.

Algunas de las formas de encontrar los materiales a secar son: sólidos granulares, pastas o lodos, hojuelas de materiales previamente tratados, grandes piezas de materiales rígidos, etc.

Algunos factores como la fragilidad del material o la necesidad de algún tratamiento especial del material a secar son de gran influencia en el momento de seleccionar el tipo de secador a utilizar.

2.5. Diseños de secadores

A continuación se presenta una matriz donde se mencionan algunos diseños de secadores y se caracterizan según la forma de suministrar la energía y el alimento.

Tabla 1. Diseños de secadores según su forma de operación

Secadores	Directos	Indirectos
Continuos	-Bandejas Secadoras -Transporte Neumático -Rotatorios -De lecho fluidizado -Circulación transversal	-Cilíndricos -Tambores -Transporte por tornillo -Bandejas Vibradoras
Por lotes	-Circulación a través del material -Bandejas y compartimiento	-Al vacío con anaqueles -Infrarrojo -Exposición solar

Fuente: El autor

Existe gran variedad de diseños de secadores. Al decidir si este es continuo o por lotes se logra acotar el número de posibles diseños, sin embargo sigue siendo amplio el número de opciones. Es entonces necesario decidir sobre la forma de suministrar el calor, si de forma directa o indirecta.

Una vez fijadas estas dos características de diseño, se limitan significativamente las opciones de diseño del secador.

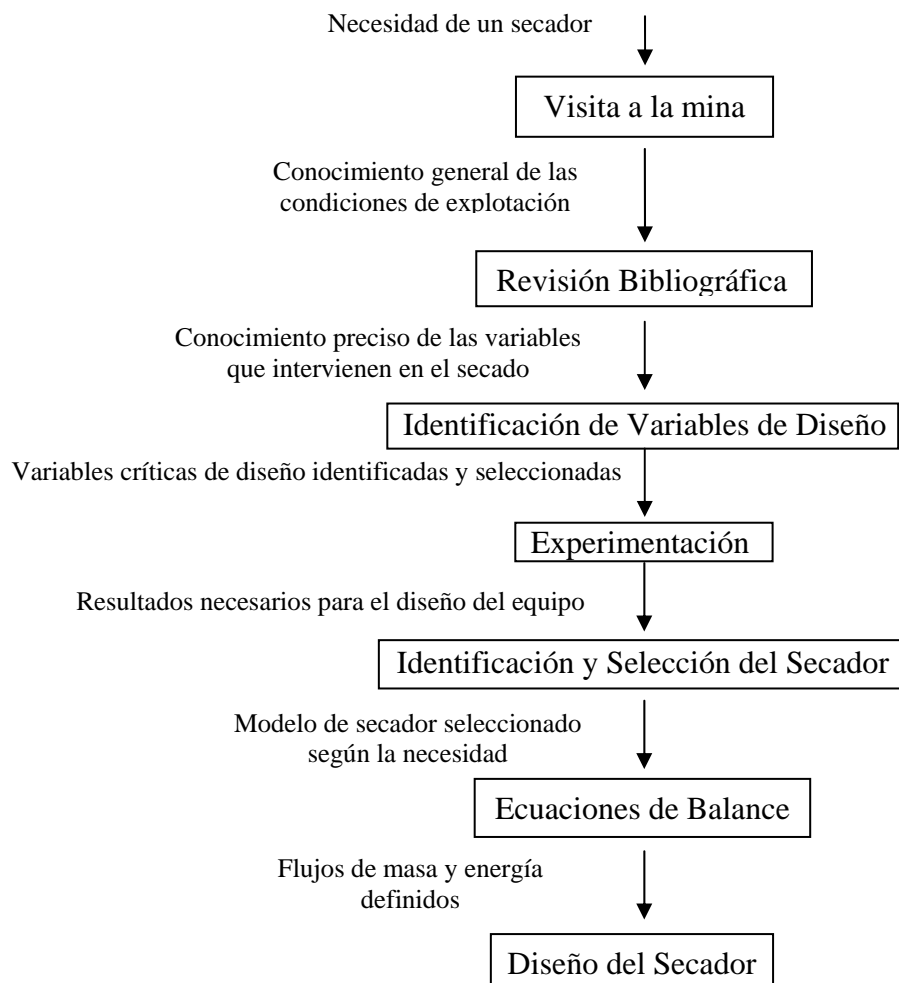
La selección final del diseño del secador se hace teniendo en cuenta las propiedades, características y limitaciones del material a secar.

3. METODOLOGÍA

En el siguiente diagrama de flujo se esquematiza la metodología que se siguió para diseñar el sistema de secado. Cada uno de los bloques representa un proceso individual con sus respectivas entradas y salidas.

En los siguientes capítulos se describe con detalle cada proceso.

Figura 4. Esquema de la metodología



Fuente: El autor

3.1. Visita a la mina:

Se realizó una visita a las minas de la vereda Barroblanco en Oiba, Santander, con el fin de conocer las condiciones in situ de la explotación de caolín. Durante la visita se tomaron muestras del mineral para su posterior análisis.

La toma de muestras se realizó de forma aleatoria, seleccionando bloques del material extraído al azar para garantizar que se tiene una muestra representativa del mineral.

3.2. Revisión bibliográfica:

Para el diseño y desarrollo del sistema de secado de caolín, fue necesaria la identificación de variables críticas que orientan el proceso hacia unas condiciones específicas.

Con base en la observación de las condiciones de explotación de caolín, se realizó la revisión de los conceptos generales de secado, logrando identificar las variables que intervienen en la operación.

De dicha revisión se busca identificar algunas variables relacionadas con la operación de secado y que podrían ser variables críticas de diseño, tales como: la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco del ambiente, la presión atmosférica, la naturaleza del líquido a retirar y del gas de secado y las características geométricas del material a secar.

3.3. Identificación de las variables de diseño:

Una vez identificadas todas las variables que intervienen en la operación de secado, se realizó la selección de las variables críticas que definen las dimensiones del equipo y sus condiciones de operación. Ya identificadas las variables críticas de diseño se tiene idea general del tipo de equipo que se debe implementar.

Claramente se identificó que la temperatura ambiente, la humedad del aire, la humedad de la muestra, la presión atmosférica y la naturaleza del líquido y el gas de secado son variables críticas para el diseño del secador.

Las anteriores variables se ven relacionadas de forma directa e indirecta en la ecuación de humedad absoluta. Esta representa la masa de vapor que contiene determinada unidad másica del gas de secado. Esta se expresa así:

$$Y' = \frac{p_a}{p_t - p_a} * \frac{M_a}{M_b} \quad (2)$$

Donde Y es la humedad absoluta de una mezcla gas/vapor, p_a es la presión parcial del vapor, p_t es la presión total del sistema (en este caso la presión atmosférica), M_a la masa molar del líquido y M_b la masa molar del gas. Esta ecuación corresponde a la ecuación 1 expresada en términos generales, dejando la opción de modificar las sustancias en la operación.

3.4. Experimentación:

Después de tener claramente identificadas las variables que establecen las dimensiones y condiciones de operación del equipo, se realizaron algunas pruebas experimentales en el laboratorio, con el fin de proporcionar algunas relaciones adicionales particulares del material que se desea secar. Estas pruebas preliminares permiten obtener resultados característicos del caolín de esta región en particular, como el contenido de humedad inicial del mineral mediante una relación sencilla (Ec. 3) y el tiempo y la velocidad de secado de esta sustancia en particular.

$$\% \text{ Humedad Inicial} = \frac{\text{Masa inicial del material} - \text{Masa del material seco}}{\text{Masa inicial del material}} * 100 \quad (3)$$

3.5. Identificación y selección del secador:

De la identificación de las variables de diseño se tenía una idea del tipo de secador que se debe implementar. Esta idea se materializa al obtener los resultados de las pruebas experimentales, al relacionar los resultados de estas dos etapas de la metodología es posible identificar exactamente el tipo de secador que se debe utilizar.

Sin embargo, el alcance de esta etapa permite identificar el secador de forma cualitativa. Para establecer las dimensiones del equipo y condiciones de operación se requiere de las siguientes etapas de la metodología.

3.6. Ecuaciones de balance:

3.6.1. Balance de masa:

Es posible plantear el balance de masa particular del secador después de tener claro el tipo de equipo de secado que se va a diseñar, ya sabido el tipo de diseño, se conocen las entradas y salidas del equipo y el modo de operación del mismo (continuo o discontinuo).

El balance de masa permite cuantificar las cantidades de alimento y producto del secador. Estos son factores que influyen de forma importante en las dimensiones del equipo.

El balance de masa general puede plantearse de la siguiente manera:

$$\frac{dm}{dt} = \sum m \text{ entra} - \sum m \text{ sale} \quad (4)$$

3.6.2. Balance de energía:

Ya sabidas las cantidades de alimento y producto que entran y salen del secador, es posible realizar el balance de energía del equipo, esto con el fin de determinar el flujo de energía que se requiere para secar el mineral hasta las condiciones del producto terminado.

Considerando que algunas variables como la energía interna, la energía potencial y la energía cinética no alteran drásticamente los resultados de esta operación, el balance de energía general se plantea de la siguiente forma:

$$\frac{dE}{dt} = \int_{T_1}^{T_2} m \dot{t} * C_p \cdot dT + Q - W \quad (5)$$

3.7. Diseño del secador:

Esta es la etapa final del proceso. Partiendo de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la metodología, se realiza el diseño del equipo.

El diseño del secador debe hacerse con algunas ecuaciones específicas para el tipo de secador y su modo de operación. Debido a que estas ecuaciones son específicas para cada diseño de secador, generalmente se acude a la literatura para encontrar correlaciones empíricas y heurísticas para establecer las dimensiones del equipo.

Una vez se ha diseñado el equipo, se tienen definidas las siguientes variables:

- Tipo del secador
- Condiciones de operación
- Dimensiones del equipo
- Cantidades de alimento y producto
- Tipo de combustible
- Cantidad de combustible a utilizar

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Determinación de variables críticas de diseño:

Mediante la observación directa, mediciones sencillas y muestreo del mineral, se determinaron algunas variables relevantes propias del material a secar y del ambiente en el sitio de explotación.

4.2. Contenido de humedad del mineral:

Durante la visita a la mina se realizó el muestreo del mineral, tomando muestras de forma aleatoria en diferentes ubicaciones del terreno y a diferentes profundidades. Esto con el fin de obtener una muestra representativa del caolín de la vereda Barroblanco y poder establecer el contenido de humedad promedio del mineral. El contenido de humedad del mineral no es homogéneo, varía con la profundidad de la muestra, la exposición a la intemperie y la ubicación y naturaleza del terreno.

Para la determinación del contenido de humedad del mineral explotado, se prepararon 6 muestras de aproximadamente 1 gramo de la arcilla y se registró la masa inicial de cada una de las muestras.

Las muestras de caolín se sometieron a un proceso de secado a temperatura constante (110° C) en la estufa. Las muestras fueron pesadas con frecuencia de 2 horas para observar si se había presentado variación en la masa de las muestras.

Se detuvo el proceso al observar que no se presentaba ninguna variación en la masa de las muestras después de 8 horas continuas de secado.

El porcentaje de humedad del mineral se determina estableciendo una relación entre la masa inicial de la muestra y la diferencia entre la masa inicial y la masa final (ver ecuación 3). De las seis corridas del experimento es posible determinar un valor promedio de humedad del mineral para efectos de cálculo para el diseño del secador.

4.3. Condiciones ambientales:

De las condiciones ambientales, la variable directamente relacionada con el proceso de secado es el contenido de humedad del aire. Este valor determina la cantidad de agua que puede retirar el aire al mineral.

La humedad del ambiente convencionalmente se expresa como humedad absoluta (Ec. 2) o como humedad relativa, representada en la siguiente expresión (Ec. 6).

$$\phi = \frac{P_a}{P_a^*} * 100 \quad (6)$$

Donde el numerador de la relación es la presión parcial del vapor y el denominador es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bulbo seco del gas. Esta última puede determinarse mediante alguna correlación como por ejemplo la ecuación de Antoine a un valor determinado de presión.

$$\log P = A - \frac{B}{T + C} \quad (7)$$

Donde los valores de A, B y C son constantes propias de la sustancia, T la temperatura de bulbo seco del gas y P la presión de vapor del líquido.

La humedad del gas, bien sea saturación relativa o absoluta, se encuentra en función de variables medibles del ambiente tales como la temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco y presión.

Para el diseño del equipo se realizó una medición simple de las temperaturas de bulbo húmedo y seco en el sitio utilizando un termómetro de vidrio y un algodón humedecido con agua (para la T húmeda).

En cuanto a la presión atmosférica se asumió que es aproximadamente una atmósfera. Ya que para efectos de cálculo, la temperatura del ambiente prima sobre la presión.

4.4. Tiempo de secado del material:

Teniendo en cuenta algunos factores observados durante la visita a la mina, se plantea la posibilidad de desarrollar el proceso de secado en dos etapas. La primera es una etapa previa de secado en donde se aprovecha la energía solar para retirarle humedad al mineral hasta establecer un equilibrio con la humedad del ambiente. La segunda etapa se realiza mediante un secador hasta ajustar el contenido de humedad del mineral a las condiciones requeridas para su venta.

Partiendo de este punto, el tiempo total de secado está compuesto por la suma del tiempo de secado de cada una de las etapas. Esto es:

$$t_{\text{total secado}} = t_{\text{etapa previa}} + t_{\text{etapa principal}} \quad (8)$$

Para determinar el tiempo de secado de la etapa previa se realizó el siguiente procedimiento:

Se pesaron 5 muestras de de aproximadamente 10 gramos de caolín. Estas se moldearon en forma de hojuelas de media pulgada de espesor y se sometieron a la exposición directa del sol.

Las muestras se pesaron cada 2 horas hasta observar que la masa de las muestras permanecía constante. Esto con el fin de determinar el tiempo de secado del mineral en condiciones ambientales.

También se determinó el tiempo que tarda en secar un ladrillo de caolín, expuesto a la luz solar, de las mismas dimensiones en que se extrae de la mina (20 cm x 15 cm x 35 cm).

Para determinar el tiempo de secado de la etapa principal de secado, se pesaron las 5 muestras en forma de hojuelas de la anterior prueba y se sometieron a secado en la estufa a temperatura constante de 110° C y se pesaron cada 10 minutos hasta no observar variación significativa en la masa de las muestras.

4.5. Planteamiento de las ecuaciones de balance:

Las ecuaciones de balance de masa y de energía proveen información primordial para el diseño básico de un equipo de secado. Estas ecuaciones permiten establecer los flujos másicos y energéticos del equipo.

Sin embargo, para realizar el planteamiento de las ecuaciones de balance se debe tener claridad sobre el tipo de secador que se va a diseñar, pues factores como el modo de operación o la forma de suministrar la energía hacen que algunos términos de la ecuación difieran según el caso.

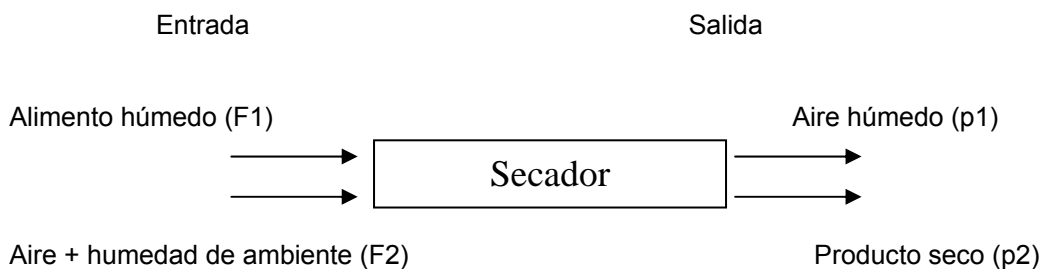
Por esta razón se plantean las ecuaciones de balance de masa y energía de forma general.

4.5.1. Balance de masa:

En el siguiente diagrama se representan las entradas y salidas al equipo de secado.

El balance de masa total se planteó de forma general anteriormente (Ec. 4). Hasta el momento no es posible eliminar ningún término de la ecuación pues no se conoce el modo de operación del equipo. Es por esto que inicialmente no se descarta el término de acumulación pues aún no se ha definido el tipo de secador ni su modo de operación.

Figura 5. Esquema general del sistema de secado



Fuente: El autor

Dado que no se conoce exactamente cuáles serán los flujos de este secador, se plantea un balance de masa incluyendo la mayor cantidad de flujos que pueden intervenir en una operación de este tipo. Esto con el fin de eliminar términos de la ecuación en caso de que no existan en el equipo a diseñar.

Reemplazando los flujos de entrada y salida de la figura uno, se reemplazan los términos correspondientes de la Ec. 4 y se obtiene el siguiente balance de masa total:

$$F_1 + F_2 - P_1 - P_2 = \frac{dm}{dt} \quad (9)$$

Donde el término diferencial representa la variación de la masa dentro del secador con respecto al tiempo.

✓ Balance de humedad:

De forma semejante al planteamiento del balance de masa total, se genera el balance de masa de humedad, considerando que pueden existir todas las corrientes de la figura 1 y que el agua puede estar presente en cada una de ellas. Además, no se descarta el término de acumulación.

También se puede observar que no se incluye ningún término de reacción química, pues bien si en algunos secadores existen reacciones de combustión, estas se desarrollan en una cámara de combustión diferente al equipo en sí. Entonces el balance de humedad es:

$$F_1 * X_{A1} + F_2 * X_{H_2O} - P_1 * X_{H_2O} - P_2 * X_{A2} = \frac{\partial m_{H_2O}}{\partial t} \quad (10)$$

Los términos X son fracciones másicas. La derivada parcial representa la variación de la masa de agua en el secador con respecto al tiempo.

✓ Balance de aire:

De forma semejante se plantea el balance de aire a través del equipo. Esto considerando que el gas de secado es únicamente aire. El balance es:

$$F_2 * (1 - X_{H_2O}) - F_1 * (1 - X_{H_2O}) = \frac{\partial m \text{ Aire}}{\partial t} \quad (11)$$

✓ Balance de sólido:

De forma semejante se plantea el balance de caolín a través del secador. El balance es:

$$F_1 * (1 - X_{A1}) - F_2 * (1 - X_{A2}) = \frac{\partial m \text{ Sólido}}{\partial t} \quad (12)$$

4.5.2. Balance de Energía

Anteriormente se planteó la ecuación de balance de energía de forma general, en esta sección se plantea la misma ecuación de forma más detallada. También se hacen algunas consideraciones propias de la operación de secado.

El término que representa la variación de la entalpía se puede aproximar de ser una integral a ser una simple variación lineal. Esto es:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_p \cdot dT \quad (13)$$

Por tratarse de una operación de secado, no se considera que haya una fuerte relación entre el trabajo y el secado del mineral, por esta razón se puede retirar de la ecuación de balance este término (W). Entonces el balance de energía puede expresarse como:

$$\frac{dE}{dt} = \Delta H + Q \quad (14)$$

La diferencial representa la variación de la energía en el tiempo. La variación de la entalpía (ΔH) depende de la temperatura y de la naturaleza de la sustancia. El término Q representa el flujo de energía que debe ser suministrado al mineral para retirar cierta cantidad de agua. De la integración del balance de masa y el balance de energía junto con algunas relaciones adicionales y ecuaciones empíricas se puede determinar exactamente el tipo de secador, el modo de operación y las dimensiones del equipo más adecuado para esta aplicación.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Partiendo de la observación de las condiciones de explotación de caolín en la mina y las mediciones experimentales de temperatura y humedad se hizo una revisión bibliográfica para determinar cuáles de estas variables observadas son críticas para el diseño de un equipo de secado.

Se encontró que para el diseño de un equipo de secado se debe tener claridad sobre el mecanismo de flujo al interior del material (gradiente de concentración) y las condiciones externas (para la transferencia desde la superficie de contacto).¹⁶

Con base en lo anterior, se determinaron las siguientes variables:

- Contenido de humedad del material a secar
- Contenido de humedad del aire (o temperatura húmeda del aire)
- Temperatura del aire
- Presión atmosférica
- Tiempo de secado del material
- Cantidad de material seco que se debe producir por unidad de tiempo
- Contenido de humedad del producto

Del análisis gravimétrico realizado a las muestras de caolín según el procedimiento descrito en la metodología, se determinó que el contenido de humedad promedio del mineral extraído en la vereda de Barroblanco es 30% en peso. Este cálculo se realizó empleado la ecuación 3.

Adicionalmente, la velocidad de alimentación al equipo de secado fue determinada durante la visita también. Este dato fue proporcionado por el usuario. Este determinó que el objetivo del secador es procesar 5 toneladas de caolín por hora.

¹⁶ PERRY, J. (1966). *Manual del ingeniero químico*. Tercera edición. McGraw Hill

Este valor proporciona información importante para la resolución del balance de masa y para la selección y dimensionamiento del secador.

Después de revisar diferentes autores^{17,18,19} se encontró que la temperatura, presión y humedad del ambiente son las principales variables para el diseño de secadores estas se determinaron experimentalmente como se describió en la metodología. Con tal de obtener resultados que se aproximen a la realidad, las mediciones se realizaron en un día típico donde no hubo lluvia ni tampoco fue un día demasiado soleado.

Los resultados de las condiciones atmosféricas de la región son los siguientes:

Tabla 2. Condiciones ambientales de la región

Variable	Valor	Unidades
Temperatura de bulbo seco	15	° C
Temperatura de bulbo húmedo	11	° C
Presión	101.325	Pa

Fuente: El autor

Con la anterior información es posible determinar la presión de saturación de la mezcla mediante la ecuación de Antoine (Ec. 7). La presión de saturación es:

$$P_{sat} = 1,312 \text{ kPa}$$

¹⁷ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

¹⁸ FOUST, A. S. et al (1972). *Principios de operaciones unitarias*. 5a edición. Continental S.A.

¹⁹ McCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

Reemplazando este valor en la ecuación 2 es posible determinar la humedad absoluta, este valor proporciona información crítica para resolver el balance de masa. La humedad absoluta del ambiente es:

$$Y' = 0,0082 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg Aire Seco}$$

Es posible expresar este valor de humedad en base total aplicando la siguiente expresión:

$$X_h = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de agua} + \text{masa de aire}} \quad (15)$$

El valor de la humedad en la corriente de aire de alimento al secador en base total es:

$$X_{h0} = 8,133 \times 10^{-3} \text{ kg agua} / \text{kg mezcla}$$

Para efectos de cálculo es conveniente determinar la humedad relativa del ambiente, esto con el propósito de acudir a la carta psicrométrica bien sea empleando la humedad relativa o la humedad absoluta de la mezcla. De la ecuación 6 se tiene que la humedad relativa es:

$$\text{Humedad Relativa } (\varphi): 80\%$$

Teniendo claramente definidas las anteriores variables es posible continuar con el proceso de selección y diseño de un secador adecuado para este propósito específico.

5.1. Identificación y selección del secador:

Del previo análisis de las muestras se encontró que el porcentaje de humedad del caolín explotado es bastante elevado. Desde el punto de vista económico no es viable retirar la humedad del material hasta un 1 % empleando un secador que requiera cualquier tipo de combustible o energía eléctrica. En la literatura se encontró que algunos autores han empleado la radiación solar como la principal fuente de energía para secar diversos materiales²⁰. Esta puede ser una alternativa para una etapa previa de secado del mineral antes de alimentar el caolín al secador.

5.2. Etapa previa de secado:

Teniendo en cuenta que se desea aprovechar la radiación solar como fuente de energía, se determinó que el secador de esta etapa previa debe operar por lotes. Dado que el mecanismo de transferencia de energía que prima en este proceso es el de radiación, se dice que este es un secador de tipo indirecto (ver tabla 1).

Anteriormente se describió el procedimiento experimental para determinar el tiempo que tarda en secar el material al exponerse directamente al sol.

Las pruebas de secado fueron realizadas en dos formas geométricas diferentes por las siguientes razones:

- Ladrillo: Esta es la forma en la que se extrae el mineral y no requiere ningún proceso de transformación.
- Láminas: Existe la posibilidad de implementar el uso de una máquina laminadora para aumentar la superficie de contacto.

Los resultados del tiempo de secado del caolín en estas dos figuras geométricas son:

²⁰ Bennamoun, L., Belhamri, A. (2002) *Design and simulation of a solar dryer for agriculture products*. Journal of Food Engineering 59 (2003) 259–266

Tabla 3. Tiempo de secado de caolín expuesto al sol.

Geometría del material	Tiempo de Secado (d)
Lámina	3
Bloque	30

Fuente: El autor

Se considera como tiempo de secado el tiempo en días que tarda el material en establecer el equilibrio con el ambiente. A partir de este momento las muestras no presentaron reducción significativa en la masa.

Después de un tratamiento del material para aumentar su superficie de contacto, se secaron completamente las muestras en la estufa y se determinó por gravimetría (Ec. 3) el porcentaje de humedad en donde se estableció el equilibrio con el ambiente, este es 15% en peso.

Se nota que el secado del material en forma de láminas es 10 veces más rápido que en forma de ladrillos, esta es una condición favorable que justifica el proceso de laminado del caolín, de no ser así sería necesario tener disponible una gran extensión de terreno para este propósito.

Mediante el equipo laminador se pueden obtener hojuelas de caolín de aproximadamente media pulgada de espesor.

Es posible aumentar la temperatura del entorno, proteger el mineral de las eventuales lluvias y por ende reducir el tiempo de secado forma sencilla mediante la instalación de invernaderos plásticos.

De este modo es posible adecuar el material para la siguiente etapa de secado, reduciendo el porcentaje de humedad del 30% al 15% en un periodo de 3 días.

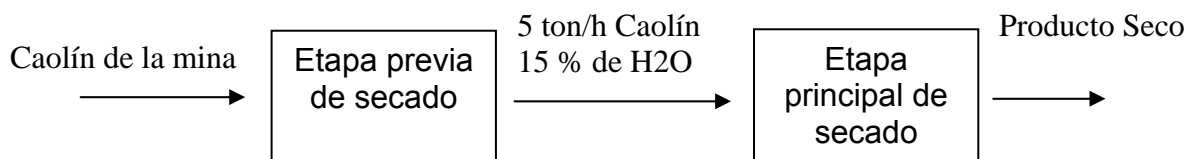
Para la construcción de los invernaderos existe un terreno disponible de 4000 m², el cual se debe distribuir en tres secciones de aproximadamente 66 metros de largo por 20 metros de ancho.

De la observación en campo se sabe que por cada 100 kg de láminas de caolín se ocupa un área de aproximadamente 1m² de terreno. Esto quiere decir que por cada invernadero se obtiene una cochada de 132 toneladas por cada tres días de exposición al sol.

5.3. Etapa principal de secado:

Las hojuelas de caolín de media pulgada de espesor con un contenido de humedad del 15% son el alimento al equipo que se debe diseñar. De esta corriente se conoce su composición y flujo, por lo que se sabe que la corriente está completamente especificada.

Figura 6. Diagrama secuencial de las etapas de secado



Fuente: El autor

En esta caso no es suficiente tener las algunas corrientes especificadas para resolver el balance de masa, antes de eso es necesario determinar qué tipo de secador es el que se empleará con tal de desarrollar una ecuación de balance particular del sistema.

Los secadores de operación discontinua son empleados ampliamente para realizar pruebas piloto y en modelos a escala, pruebas de laboratorio o para secar

materiales de alto valor agregado, de modo que el precio del producto justifique los altos costos de operación de un secador de este tipo.

Dado que el caolín es un mineral bastante económico en relación con algunos otros, se descarta completamente la posibilidad de diseñar e implementar un secador discontinuo para este propósito. Un secador discontinuo para secar la cantidad que el mercado requiere debe ser de enormes dimensiones, lo que hace que la implementación del equipo no sea rentable.

En los secadores directos, se expone el sólido a secar a una corriente de gas o vapor para retirar el contenido de humedad del material. Sin embargo, en este tipo de operación se debe tener presente que el sólido puede alcanzar altas temperaturas en las que puede descomponerse o deteriorarse²¹ al encontrarse en contacto directo con el gas. Es por esto que el gas empleado debe ser inerte con el material a secar.

En este caso el sólido a secar es una arcilla que no sufre alteración en sus propiedades al estar en contacto directo con el aire. Esta es una característica del sólido que debe aprovecharse, es posible someter el caolín a secado directo y aprovechar el mecanismo de transferencia de calor por convección.

En la tabla 1 se pueden observar algunos de los secadores más comunes. Se puede observar que algunos de los secadores directos y continuos más comunes son:

- Bandejas Secadoras
- Transporte Neumático
- De lecho fluidizado
- Circulación transversal

²¹ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

- Rotatorios

La decisión final acerca del tipo de secador a implementar debe tomarse teniendo en cuenta las propiedades y características del sólido a secar tales como si este puede ser fluidizado, si hay formación de polvos, si puede haber circulación transversal, etc.

A continuación se realiza un breve análisis de la posibilidad de emplear alguno de los cinco modelos de secador anteriormente mencionados para secar las hojuelas de caolín.

5.3.1. Bandejas secadoras:

Los secadores de bandejas o tamices transportadores se emplean en el secado de materiales pastosos o rígidos que no se dejan agitar ni fluidizar²².

Los costos del sistema de transporte de estas bandejas secadoras hacen que un diseño de este tipo sea rentable únicamente para pequeñas capacidades de producción y para materiales valiosos tales como colorantes o productos farmacéuticos²³.

Desde el punto de vista operativo, este equipo puede secar cualquier tipo de material, entonces las hojuelas de caolín podrían ser tratadas en uno de estos equipos. Sin embargo, la producción de caolín requerida se considera alta para uno de estos equipos, adicionalmente el caolín no es un mineral valioso que sustente el costo de un equipo de este tipo. Por estas razones se descarta este tipo de secador.

5.3.2. Transporte neumático:

Estos equipos se emplean cuando la velocidad del gas de secado que pasa a través de un lecho de fluido es suficientemente grande como para arrastrar el

²² McCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

²³ Ibid

sólido.²⁴ Estos equipos se porque el secado del sólido se da de forma casi instantánea debido al contacto directo del gas de secado con el sólido. Sin embargo, se emplea generalmente en operaciones de secado de sólidos pequeños, bien sea granos o extrusión de tortas.

En este caso las hojuelas de caolín son bastante pesadas y no pueden ser fluidizadas fácilmente. Además este material por ser una arcilla presenta problemas de erosión y formación de polvos.

Por estas razones se descarta el uso de este tipo de secadores para este propósito.

5.3.3. De lecho fluidizado:

Estos equipos funcionan de forma semejante a los secadores de transporte neumático. La diferencia radica en que los secadores de transporte neumático desplazan el sólido de un lugar a otro, mientras que los secadores de lecho fluidizado logran suspender al lecho del sólido sin provocar desplazamiento.

Debido a la similitud con los secadores de transporte neumático, este tipo de secadores presenta los mismos inconvenientes que impiden la implementación de un secador de estas características.

5.3.4. De circulación transversal

Se emplea para secar tortas o pastas de filtración y algunos materiales rígidos de espesor de aproximadamente $\frac{1}{4}$ de pulgada y de varias pulgadas de longitud²⁵. El material se dispone en bandas transportadoras que circulan a través de una corriente de aire caliente.

Las características del material se adecúan a los requisitos del secador. Sin embargo, se requiere de un complejo sistema de bandas transportadoras que se

²⁴ McCABE, W. SMITH, J. HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

²⁵ McCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

deteriora fácilmente al encontrarse permanentemente en contacto con vapor de agua a altas temperaturas. Esta es una buena opción para realizar el diseño del secador, sin embargo se debe buscar si existe algún otro diseño más económico pues los costos de construcción y mantenimiento de este equipo suelen ser más elevados que los de algunos otros diseños.

5.3.5. Rotatorios:

Estos equipos son generalmente usados para secar materiales granulares o algunos otros que pueden ser golpeados sin importar que se rompan.

El sólido se introduce continuamente por un extremo del tambor rotatorio. Mientras que el gas de secado puede ser alimentado en contracorriente o en corriente directa.

Para lograr el desplazamiento horizontal del sólido desde un extremo a otro del cilindro, este puede inclinarse un pequeño ángulo o puede tener cierta inclinación en los elevadores para lograr este tipo de desplazamiento²⁶.

Figura 7. Movimiento del sólido en los elevadores de un secador rotatorio



Fuente: Revol, D., Briens, C., Chabagno, J. *The design of flights in rotary dryers*.

Dichos elevadores son aletas que se extienden desde la superficie interna del cilindro. Estos cumplen la función de levantar el sólido regarlo desde la parte superior del equipo para exponerlo completamente a la acción secadora del gas.

²⁶ P.F. Britton, M.E. Sheehan □, P.A. Schneider A physical description of solids transport in f lighted rotary dryers

Este equipo no es apropiado para secar sólidos pastosos que puedan adherirse a la superficie interna del equipo, lo cual causaría obstrucción y acumulación de sólido en el interior del secador.

En este tipo de secadores existe la posibilidad de utilizar como gas de secado los gases de combustión de algún combustible en lugar de aire. Para controlar el flujo de gas de secado a través del equipo se emplea un ventilador que puede ubicarse a la entrada o a la salida del tambor. Por esto, el caudal del ventilador es una de las variables de diseño del equipo.

Una relación adicional que permite establecer este flujo másico es la velocidad másica permitida para el gas. Esta variable depende de la tendencia del material a formar polvo. Los valores típicos se encuentran entre 1950 kg/m²-h y 24000 kg/m²-h ²⁷.

Algunos otros valores típicos de los secadores rotatorios se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Características típicas de un secador rotatorio

Variable	Valor máximo	Valor mínimo	Unidades
Temperatura a la entrada (aire caliente)	120	175	°C
Temperatura a la entrada (gases de combustión)	540	815	°C
Diámetro del tambor	1	3	m
Velocidad periférica de la carcasa	20	25	m / min

Fuente: El autor

²⁷ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

Las características del sólido a secar son semejantes a las de los sólidos que pueden secarse en un secador rotatorio. Siendo este uno de los modelos más sencillos y económicos de fabricar y operar, se selecciona como el secador más adecuado para desarrollar la operación. Ahora se procede a hacer el diseño básico del equipo y sus condiciones de operación.

5.4. Diseño del secador

Ya se tiene claramente determinado que el secador a emplear debe operar de forma continua, que el sólido debe estar en contacto directo con un gas de secado y que el diseño más adecuado para realizar la operación de secado en este caso es un secador de tambor rotatorio.

Las corrientes de sólido y gas de secado pueden fluir a través del equipo en corriente paralela o en contracorriente.

El secado en contracorriente se recomienda para materiales que pueden calentarse a temperaturas elevadas, como minerales, arena, piedra caliza, arcillas, etc. Además, se puede utilizar un gas de combustible como gas de secado²⁸. En este caso, debido a la disponibilidad de recursos energéticos de la región, el combustible debe ser Diesel o gas natural. Se recomienda el uso de un quemador dual que pueda emplear cualquiera de estos dos combustibles.

Para establecer las dimensiones del equipo se debe partir de las ecuaciones de balance de masa y energía planteadas anteriormente.

Las variables conocidas del sistema son:

²⁸ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

Tabla 5. Cantidades conocidas de las corrientes

Corriente	Cantidad	Unidades
Alimento de Caolín	4,25	Ton/h
Humedad Contenida en el Alimento	0,15	Kg H ₂ O/kg Caolín
Humedad del Ambiente (H absoluta)	0,0082	Kg H ₂ O/kg aire
Humedad Contenida en el Producto	0,01	Kg H ₂ O/kg Caolín

Fuente: El autor

Con el fin de aprovechar la energía en la operación de secado, el aire a la salida del equipo debe estar completamente saturado. Este sale a una temperatura de aproximadamente 50° C. Esta es una relación adicional que facilita la resolución del balance de masa. Este dato fue suministrado por el fabricante de la experiencia en la fabricación de otros secadores rotatorios.

Considerando que la mezcla se encuentra completamente saturada, se determina la presión de saturación a 50° C mediante la ecuación 7. La presión de saturación es:

$$P_{sat} = 12,370 \text{ kPa}$$

Con este valor se puede determinar la humedad de saturación mediante la ecuación 1. El resultado es:

$$H_s = 0,086 \text{ kg Vapor / kg aire seco}$$

Este valor puede expresarse en base total acudiendo a la ecuación 15. Entonces la humedad del aire a la salida del equipo en base total es:

$$X_{nf} = 7,919 \times 10^{-2} \text{ kg agua / kg mezcla}$$

El secador rotatorio se caracteriza por operar de forma continua, de modo que el término de acumulación de los balances de masa son iguales a cero.

Reemplazado los valores conocidos (tabla 5) y este valor de humedad que se ha determinado en las ecuaciones 10, 11 y 12 se obtiene un sistema de 3 ecuaciones con cero grados de libertad. Por lo tanto es posible resolver el sistema y determinar los flujos másicos de las corrientes del equipo. Estos son:

$$F_2 = 9,16 \text{ ton/h}$$

$$P_1 = 9,87 \text{ ton/h}$$

$$P_2 = 4,29 \text{ ton/h}$$

El flujo de aire a través del equipo (F_2) permite determinar las dimensiones del ventilador, sin embargo el diseño de este equipo no se encuentra dentro del alcance de este proyecto. Para detalles del diseño de estos equipos se sugiere consultar a otros autores.²⁹

Considerando que el gas dentro del equipo se comporta como un gas ideal, es posible calcular el flujo volumétrico. Es posible expresar la ecuación de los gases ideales en términos de flujos (másico y volumétrico) de la siguiente forma.

$$P * Q = \frac{F}{M_g} * R * T \quad (16)$$

²⁹ Borda, R. (1985). *Diseño y construcción del transportador neumático para cascarilla de arroz con sistema de filtración renovable.*

Donde P representa la presión del sistema, Q el flujo volumétrico del gas de secado a través del equipo, F el flujo másico, Ma la masa molar del gas de secado, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

En este el gas de secado es aire y entra al secador a temperatura ambiente. Entonces se puede resolver la ecuación 16 para determinar el caudal de aire que circula a través del equipo. La ecuación 16 puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q = \frac{F * R * T}{P * M_a} \quad (17)$$

Al reemplazar todas las variables conocidas en la ecuación 17 se obtiene el siguiente resultado:

$$Q = 7474 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este es el flujo de aire que debe alimentarse al secador. Este resultado es crítico en el diseño del equipo pues permite determinar el diámetro del equipo.

El flujo volumétrico puede expresarse como el producto de la velocidad del flujo por el área transversal del tambor. Esto es:

$$Q = V * A \quad (18)$$

En este caso se tiene una relación adicional que permite establecer el diámetro del tambor, esta es que la velocidad del gas. En la literatura se encontró que para desarrollar correctamente la operación, la velocidad del gas dentro del equipo debe ser de **500 ft/min (9144 m/h)**³⁰.

Para efectos de cálculo se ha considerado que el gas que seca el material es aire, sin embargo esta es una mezcla de gases de combustión. Además, uno de los

³⁰ KNEULE, F. (1976). *El secado*. Tomo I. Urmo S.A

productos de la reacción de combustión es agua, esta no se ha tenido en cuenta hasta el momento.

Estas aproximaciones deben corregirse para calcular las dimensiones correctas de un equipo que cumpla la función para la que fue diseñado. La solución que plantea el fabricante para corregir estas desviaciones consiste en introducir al equipo aire en exceso. Esta opción es planteada según la experiencia en la fabricación de otros secadores de este tipo. En este caso se consideró que el exceso debe ser del 90%. Entonces el caudal de aire corregido es:

$$\text{Caudal de aire seco (corregido)} = 14201 \text{ m}^3/\text{h}$$

Reemplazando este valor junto con la relación adicional de la velocidad del gas dentro del equipo en la ecuación 18 se tiene:

$$\text{Área} = 1,55 \text{ m}^2$$

Teniendo en cuenta que el tambor es de forma cilíndrica, su sección transversal es una circunferencia. Luego el área transversal del tambor rotatorio se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (19)$$

Reemplazando el área en la ecuación 19 es posible despejar el diámetro del equipo. Este es:

$$d = 1,4 \text{ m}$$

Ya se conoce una de las dimensiones del equipo, ahora es necesario determinar la longitud del tambor rotatorio. Esta se obtiene del balance de energía como se muestra a continuación.

Del balance de energía general planteado en la ecuación 14 es posible desarrollar la siguiente expresión. Esta incluye todos los flujos de energía involucrados en la operación de secado en un secador rotatorio.

$$\frac{q_T}{m_s} = C_{pS}(T_{Sb} - T_{Sa}) + X_a C_{pL}(T_V - T_{Sa}) + (X_a - X_b)\lambda + X_b C_{pL}(T_{Sb} - T_V) + (X_a - X_b)C_{pV}(T_{Vb} - T_V) \quad (20)$$

Los términos con el subíndice a se refieren a la entrada del equipo, el subíndice b a la salida del equipo. El subíndice v quiere decir vaporización. T se refiere a la temperatura, X a la fracción másica, λ al calor de vaporización y C_p a la capacidad calorífica. El término T_{vb} representa la temperatura final del vapor.

Reemplazando los valores conocidos (propiedades de las sustancias y temperaturas del sistema) es posible determinar el flujo de calor que se debe suministrar al equipo.

Resolviendo los términos de forma individual se encontró que los valores realmente significativos de la ecuación son el primer y tercer término de la ecuación. Estos son respectivamente la energía que se requiere para calentar el sólido y la energía para vaporizar el líquido contenido en el sólido. Siendo este último el más importante.

Por esta razón se toma la decisión de considerar despreciables los términos restantes. Entonces el flujo de energía que requiere el secador es de:

$$q_T = 1'230.618 \text{ kJ}$$

Existen ecuaciones empíricas para el dimensionamiento de secadores rotatorios teniendo en cuenta el coeficiente volumétrico de transmisión de calor³¹. Una de estas ecuaciones se presenta a continuación:

$$U_a = \frac{0,5 * G^{0,67}}{D} \quad (21)$$

Donde U_a es el coeficiente volumétrico de transmisión de calor, G la velocidad másica del gas a través de la sección transversal del tambor y D el diámetro del equipo.

La anterior correlación empírica puede escribirse en términos del requerimiento de calor del secador y las dimensiones del equipo de la siguiente forma:

$$L = \frac{q_T}{0,125\pi D G^{0,67} \Delta T} \quad (22)$$

El término ΔT es la diferencia media (logarítmica) de la temperatura, tomando los valores de la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura del gas a la entrada y a la salida del equipo.

Entonces se tienen completamente especificadas todas las variables de la ecuación 22, de modo que al reemplazar los valores en la expresión se determina la longitud del equipo. Esta es:

$$L = 12,4 \text{ m}$$

En este momento se tiene las dos dimensiones críticas del diseño y el flujo de energía que se debe suministrar al equipo.

En la literatura se encontró que la relación longitud diámetro de los secadores rotatorios debe encontrarse entre 4 y 10^{32} . Para este diseño la relación es:

³¹ McCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

³² McCABE, W. SMITH, J. HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

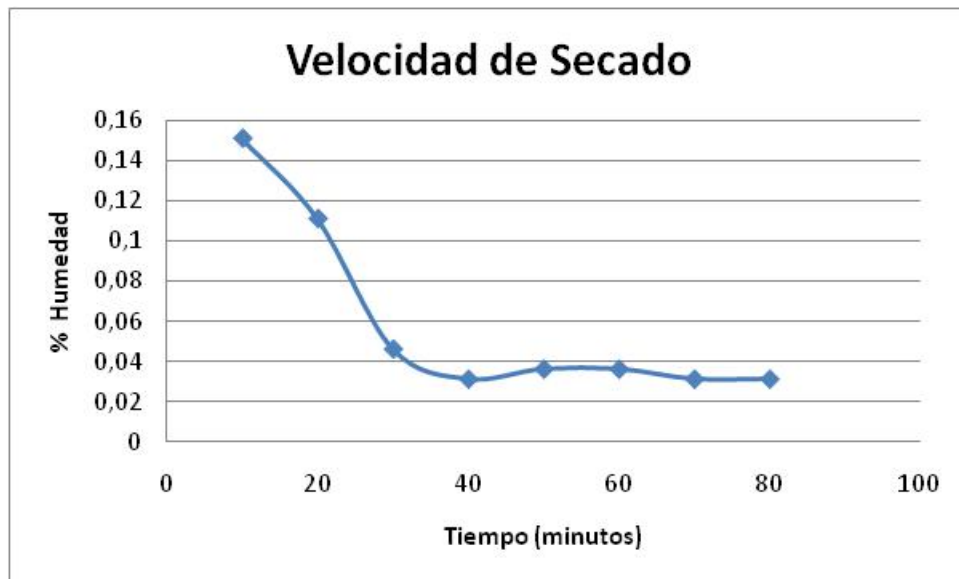
$$L/D = 8,6$$

Este es un valor que se encuentra dentro del rango típico en que se encuentran los diseños de secadores rotatorios en general. Esta es una forma de comprobar que el diseño se encuentra dentro de los valores normales.

Ya sabidas las dimensiones del tambor rotatorio, es indispensable determinar el tiempo de residencia del sólido dentro del equipo. Esta es otra de las variables de diseño críticas.

El tiempo que tarda el material en alcanzar el equilibrio con el gas de secado fue determinado experimentalmente como se describió en la metodología. Los valores obtenidos se graficaron y se obtuvo la siguiente curva de secado:

Figura 8. Curva de secado de caolín



Fuente: El autor

Se puede observar que a partir de 30 minutos de someter el material a secado, la humedad no varía considerablemente, por lo que se recomienda diseñar un secador cuyo tiempo de residencia del sólido no sea mayor a 30 minutos. A partir

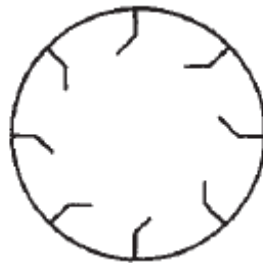
de este periodo de tiempo se puede decir que la transferencia de masa se ha detenido y se estaría desperdiciando energía.

Los secadores rotatorios pueden tener o no elevadores para dispersar el sólido sobre la corriente de gas y a su vez para contribuir en el desplazamiento horizontal del sólido desde un extremo a otro del equipo. Estos elevadores pueden extenderse desde las paredes internas del tambor hacia el centro en una longitud de entre el 8% y el 12% del diámetro del secador.³³

Debido a que en este caso no se trata de un sólido granular, sino de grandes hojuelas de caolín, el fabricante sugirió el uso de elevadores ligeramente más grandes a los convencionales para garantizar que la totalidad del material pueda ser levantado por los elevadores.

El fabricante propone el uso de elevadores de 25 cm de longitud de dos secciones, donde la segunda sección del elevador se tiene una inclinación de 45°. Después de doblar la lámina metálica, el elevador se encuentra entre los límites previamente mencionados.

Figura 9. Elevadores con 45° de inclinación.



Fuente: PERRY, J. Manual del ingeniero químico.

Una correlación empírica encontrada en la literatura muestra indica que el número de elevadores a instalar en el equipo varía desde 6D hasta 10D, donde D es el

³³ TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.

diámetro del equipo en metros³⁴. En este caso, para permitir que las hojuelas de caolín puedan entrar en el elevador, se seleccionó el límite inferior de la correlación. Esto es:

$$N = 6 * (1,4) = 8,4$$

Donde N es el número de elevadores a utilizar.

Entonces, se considera que el número de elevadores es de 8. Estos se distribuyen de la misma forma en que se muestran los elevadores de la figura 9.

Para garantizar el desplazamiento del sólido de un extremo a otro debería inclinarse el secador rotatorio en un pequeño ángulo, esto para crear una pendiente que haga que se desplace el sólido de forma natural a través del secador. Sin embargo el fabricante no recomienda inclinar el tambor rotatorio, pues de su experiencia en fabricación de equipos de este tipo ha encontrado que algunas piezas que soportan el cilindro tales como los cojinetes o los engranajes de rotación sufren extremo desgaste al soportar la estructura al estar inclinada. De modo que este tipo de secadores requieren una gran inversión en mantenimiento y adicionalmente debe detenerse la producción periódicamente para realizar operaciones de mantenimiento.

Una solución que ha encontrado el fabricante para resolver este tipo de situaciones consiste en dar una inclinación adicional a los elevadores en forma de espiral, esto para lograr que el sólido se desplace sin necesidad de inclinar el

³⁴ McCABE, W. SMITH, J. HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

equipo. Dando una inclinación lateral a los elevadores de 15° es posible lograr el espiral que logra el desplazamiento horizontal del sólido.

El secador debe rotar a una velocidad tal que haga que el material permanezca 30 minutos dentro del secador. Este sería el tiempo que tarda una partícula de caolín en ingresar por uno de los extremos del tambor y salir por el extremo opuesto.

Existen ecuaciones empíricas para determinar el tiempo de residencia del sólido que son función de las dimensiones del equipo, del flujo de alimento y de algunas variables propias del material tales como la densidad aparente, el diámetro de la partícula o algunas constantes propias de cada sólido³⁵.

En este caso, debido a que el material se encuentra en forma de hojuelas, algunas de estas variables propias del material no han sido determinadas. Además, se cree que probablemente la ecuación empírica encontrada en la literatura no se ajuste a las dimensiones de este tipo de partícula.

De la experiencia del fabricante en la fabricación y puesta en marcha de otros secadores semejantes se toma la decisión de operar el secador a una velocidad de 3 revoluciones por minuto. Sin embargo, el fabricante recomienda instalar al equipo un regulador de velocidad, con el fin de ajustar la rotación del tambor con el fin de conseguir un tiempo de residencia del material de 30 minutos.

Con la especificación de todas estas variables se concluye el diseño del equipo de secado requerido para cubrir la necesidad de la producción a mediana escala de caolín en la vereda de Barroblanco, Santander.

A continuación se presenta una tabla con el resumen de las especificaciones del equipo.

³⁵ McCABE, W. SMITH, J. HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.

Tabla 6. Resumen del diseño del secador rotatorio

Equipo	Secador rotatorio
Modo de operación	Continuo
Suministro de energía	Directo
Alimento de sólido húmedo	5 (ton/h)
Caudal del ventilador	14064 (m ³ /h)
Ubicación del ventilador	Succión a la salida del secador
Tipo de quemador	Quemador con boquillas regulables para combustible líquido o gaseoso
Combustible	ACPM o Gas natural
Flujo de energía	1'230.618 kJ
Longitud del tambor	12,4 m
Diámetro del tambor	1,4 m
Tipo de elevadores	Elevadores de dos segmentos tipo espiral (15°)
Número de elevadores	8
Ángulo de los elevadores	45°
Velocidad de rotación	3 (rpm)

Fuente: El autor

6. CONCLUSIONES

- Una alternativa para lograr que la explotación de caolín en Oiba, Santander, se haga económicamente consiste en el secado del material en el sitio de explotación. Esto se hace con el propósito de retirar peso al producto y así evitar que la rentabilidad de la explotación minera se vea afectada por los costos de transporte.
- Las operaciones industriales en ocasiones requieren de etapas previas de acondicionamiento de los materiales. En este caso, la etapa de secado en el secador rotatorio requiere de una etapa previa de secado en invernaderos. En esta etapa de acondicionamiento del mineral se logra retirar hasta un 50 % de la humedad contenida en la arcilla.
- El sistema recomendado para realizar el secado del mineral de forma eficiente y relativamente económica es una secuencia de dos etapas de secado, la primera, es una etapa de secado por lotes en invernaderos empleando energía solar. La segunda etapa se realiza en un secador rotatorio en contra corriente que emplea los gases de combustión de Diesel o gas natural, según la disponibilidad del combustible.

7. RECOMENDACIONES

- Estudiar la posibilidad de emplear algún combustible más económico, como por ejemplo aceite usado, teniendo en cuenta criterios como la rentabilidad de la operación, la disponibilidad del combustible y el impacto ambiental.
- Implementar un sistema de control automático al proceso con el fin de aumentar la eficiencia del equipo, reducir los costos de operación y minimizar la exposición de los operadores a los riesgos propios de la operación. Logrando controlar la velocidad de rotación del equipo sin necesidad de acudir a la regulación manual.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Murray, H. (2000) *Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview*. Applied Clay Science 17 (2000) 207–221
- [2] Kakali, G., Perraki, T., Tsvilis, S., Badogiannis, E. (2001) *Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity*. Applied Clay Science 20 Ž2001. 73–80
- [3] Toya, T., Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K. (2004) *Preparation and properties of glass-ceramics from wastes (Kira) of silica sand and kaolin clay refining*. Journal of the European Ceramic Society 24 (2004) 2367–2372
- [4] Toya, T., Kameshima, Y., Nakajima, A., Okada, K. (2006) *Preparation and properties of glass-ceramics from kaolin clay refining waste (Kira) and paper sludge ash*. Ceramics International 32 (2006) 789–796
- [5] Chandrasekhar, S.; Ramaswamy, S. (2006) *Iron minerals and their influence on the optical properties of two Indian kaolin*. Applied Clay Science 33 (2006) 269–277
- [6] Chandrasekhar, S.; Ramaswamy, S. (2002) *Influence of mineral impurities on the properties of kaolin and its thermally treated products*. Applied Clay Science 21 (2002) 133–142
- [7] Siddiqui, M., Ahmed, Z. (2008) *Geochemistry of the kaolin deposits of Swat (Pakistan)*. Chemie der Erde 68 (2008) 207–219
- [8] Fentaw, H., Mengistu, T. (1998) *Comparison of Kombelcha and Bombowha kaolins of Ethiopia*. Applied Clay Science 13 _1998. 149–164

- [9] Goldstein, R. et al (2002) *Heat transfer – a review of 2000 literature*. International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 2853–2957
- [10] Zomorodian, A., Zare, D., Ghasemkhani, H. (2007) *Optimization and evaluation of a semi-continuous solar dryer for cereals (Rice, etc)* Desalination 209 (2007) 129–135
- [11] Bennamoun, L., Belhamri, A. (2002) *Design and simulation of a solar dryer for agriculture products*. Journal of Food Engineering 59 (2003) 259–266
- [12] Kiranoudis, C., Maroulis, Z., Marinos-kouris, D. (1996) *Drying of solids: Selection of some continuous operation dryer types*. Computers chem. Engng Vol. 20, Suppl., pp. S177-S182, 1996
- [13] Iguaz, A., Esnoz, A., Martínez, G., López, A., Vírveda, P.(2003) *Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer*. Journal of Food Engineering 59 (2003) 151–160
- [14] Togrul, T., Pehlivan, D. (2002) *Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers*. Journal of Food Engineering 55 (2002) 209–216
- [15] Didriksen, H. (2002) *Model based predictive control of a rotary dryer*. Chemical Engineering Journal 86 (2002) 53–60
- [16] Rastikian, K., Capart, R., Benchimol, J.(1999) *Modelling of sugar drying in a countercurrent cascading rotary dryer from stationary profiles of temperature and moisture*. Journal of Food Engineering 41 (1999) 193-201
- [17] Van Puyvelde, D., (2009) *Modelling the hold up of lifters in rotary dryers*. Chemical engineering research and design 87 (2009) 226–232
- [18] Geng, F., Yuan, Z., Yan, Y., Luo, D., Wang, H., Li, B., Xu, D. (2009) *Numerical simulation on mixing kinetics of slender particles in a rotary dryer*. Powder Technology 193 (2009) 50–58

- [19] Britton, P., Sheehan, M., Schneider, P. (2006) *A physical description of solids transport in a lighted rotary dryer* Powder Technology 165 (2006) 153–160
- [20] Arjona, R., Ollero, P., Vidal, F. (2005) *Automation of an olive waste industrial rotary dryer*. Journal of Food Engineering 68 (2005) 239–247
- [21] Li, S., Yan, J., Li, R., Chi, Y., Cen, K. (2002) *Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns Part I. Experimental*. Powder Technology 126 (2002) 217–227
- [22] Li, S., Yan, J., Li, R., Chi, Y., Cen, K. (2002) *Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns: Part II. Theoretical and optimal analyses* Powder Technology 126 (2002) 228–240
- [23] Arruda, E., Facanha, J., Pires, L., Assis, A., Barrozo, M. (2009) *Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying* Chemical Engineering and Processing 48 (2009) 1414–1418
- [24] Iguaz, A., López, A., Vírseda, P. (2002) *Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products* Journal of Food Engineering 54 (2002) 289–297
- [25] Tallon, S., Davies, C. (2008) *In-situ monitoring of axial particle mixing in a rotating drum using bulk density measurements* Powder Technology 186 (2008) 22–30

- [26] Pelegrina, A., Elustondo, M., Urbicain, M. (2002) *Setting the operating conditions of a vegetables rotary drier by the response surface method* Journal of Food Engineering 54 (2002) 59–62
- [27] Revol, D., Briens, C., Chabagno, J. (2001) *The design of flights in rotary dryers* Powder Technology 121 (2001) 230–238
- [28] Rodriguez, G., Vasseur, J., Courtois, F. (1996) *Design and Control of Drum Dryers for the Food Industry. Part 1. Set-Up of a Moisture Sensor and an Inductive Heater* Journal of Food Engineering 28 (1996) 271 -282
- [29] Pelegrina, A., Elustondo, M., Urbicain, M. (1998) *Design of a Semi-continuous Rotary Drier for Vegetables*. Journal of Food Engineering 37 (1998) 203-304
- [30] McCABE, W. SMITH, J. HARRIOT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. McGraw Hill.
- [31] TREYBAL, R. (1991). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición. McGraw Hill.
- [32] KEEY, R. (1972). *Drying principles and practice*. Volume 13. Pergamon press.
- [33] KNEULE, F. (1976). *El secado*. Tomo I. Urmo S.A
- [34] KEEY, R. (1978). *Introduction to industrial drying operations*. Pergamon press
- [35] FOUST, A. S. et al (1972). *Principios de operaciones unitarias*. 5a edición. Continental S.A.
- [36] PERRY, J. (1966). *Manual del ingeniero químico*. Tercera edición. McGraw Hill

[37] Borda, R. (1985). *Diseño y construcción del transportador neumático para cascarilla de arroz con sistema de filtración renovable.*

[38] Vila, T.(1936) *Recursos minerales no-metálicos de Chile* .Edición 2
Departamento de Minas y Petróleo. Chile

[39] Fassbender, H. W.; Bornemisza, E. (1987) *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina.* 1ra edición. Editorial IICA. San José.

[40] Avgustinik, A.I. (1983) *Cerámica.* Segunda edición. Editorial Reverté.
Barcelona