

**Universidad Del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Química
Trabajo de Graduación**



**REDISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR ROTATORIO DEL
LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**

**Oscar R. Jiménez G.
Carné: 94047**

DEDICO ESTE TRABAJO


A Dios y a la Virgen Santísima.

A mis padres Oscar Jiménez y Margarita de Jiménez.
Por su amor, enseñanza, ejemplo y comprensión.


A mi hermana Vivian.
Con Amor Fraternal.

A mi Asesor Ingeniero Roberto Palacios.
Agradecimiento Imperecedero.

Vo. Bo. :

(f) 
Ingeniero Roberto Palacios
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ingeniero Roberto Palacios

(f) 
Ingeniero Gamaliel Zamabrano

(f) 
Ingeniero Otto Alvarado

Fecha de aprobación: Guatemala, 2 de noviembre de 2000

Resumen:

En el rediseño del Secador Rotatorio, básicamente se cambió la posición del ventilador y de la fuente de calentamiento (el quemador de gas propano) además de sustituirla. Todo lo anterior se hizo, para inducir el flujo de aire y de calor en contracorriente con respecto a la alimentación.

Se obtuvo eficiencia de remoción de agua de humedad del 77 % con las modificaciones efectuadas contra un 17 % que tenía el equipo en sus condiciones originales.

Se detectaron varios problemas, además del problema a resolver, entre estos se pueden mencionar la alimentación de materiales al equipo, la capacidad del ciclón y la presión de entrada del propano que proporciona el sistema de gas de la universidad. Respecto del ciclón original, se concluyó que no tiene las dimensiones adecuadas para manejar el flujo de aire del ventilador, ya que actuaba como una resistencia para la circulación del aire, o en pocas palabras como un tapón, lo que causaba que el calor se concentrara en la zona del quemador y no se distribuyera a lo largo del cilindro, tal problema se corrigió al colocar un ciclón con las dimensiones adecuadas. En cuanto a la alimentación de materiales, se observó que el motor de la tolva no era capaz de mover el tornillo de alimentación y se atascaba aún con pequeños volúmenes de material y hasta con materiales fluidos, por lo que se sustituyó con un motor de mayor potencia. Finalmente, la presión de entrada del gas proporcionada por el sistema de propano de la universidad, no llegaba ni a una libra de presión, consecuentemente el consumo de gas estaba limitado, siendo el máximo flujo de propano 0.00015 metros cúbicos por segundo, lo anterior se corrigió colocando un regulador de presión que incrementó la presión de entrada del gas de menos de 6894.76 Pascales a 34473.79 Pascales y el flujo del mismo de 0.00015 a 0.000217 metros cúbicos por segundo.

Durante el procedimiento para la prueba del Secador Rotatorio se realizaron 10 corridas bajo las mismas condiciones para que los resultados obtenidos fueran confiables.

INDICE GENERAL

I. Introducción	1
II. Antecedentes	2
A. Secado	2
B. Sistemas y Equipos de Secado	3
C. Sistemas Continuos de Calor Directo	5
D. Sistemas Batch de Calor Directo	9
E. Cálculo y Teoría de Secado	10
III. Justificación	24
IV. Objetivos	25
V. Problema a Resolver	26
VI. Metodología	27
VII. Resultados	28
VIII. Discusión	34
IX. Conclusiones	36
X. Recomendaciones	37
XI. Bibliografía	38
XII. Apéndice	39

INDICE DE TABLAS

I. Modificaciones efectuadas de acuerdo al objetivo general	28
Tabla 1	28
II. Modificaciones efectuadas de acuerdo a los objetivos específicos	28
Tabla 2	28
Tabla 3	29
Tabla 4	29
Tabla 5	29
Tabla 6	30
Tabla 7	30
III. Resultados obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas usando piedra pómez como material de secado	30
Tabla 8	30
IV. Resultados obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas usando arena de río como material de secado	31
Tabla 9	31
V. Resultados de los balances de masa y energía del equipo modificado operando con piedra pómez como material de secado	31
Tabla 10	31
Tabla 11	32
Tabla 12	32
Tabla 13	32
Tabla 14	31
VI. Datos obtenidos con el equipo en sus condiciones originales	39
Tabla 15	39
Tabla 16	39
Tabla 17	39
VII. Datos obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas	39
Tabla 18	39
Tabla 19	40
VIII. Datos obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas usando arena de río como material de secado	40
Tabla 20	40
Tabla 21	40
IX. Datos de los balances de masa y energía del equipo modificado operando con piedra pómez como material de secado	41
Tabla 22	41
Tabla 23	41

INDICE DE IMAGENES

I. Proporciones de un Separador Ciclónico	47
II. Fotografía del Secador Rotatorio en sus condiciones originales	48
II. Fotografía del Secador Rotatorio con las modificaciones efectuadas	49
III. Plano del Secador Rotatorio en sus condiciones originales	50
IV. Plano del Secador Rotatorio con las modificaciones efectuadas	51
V. Plano del Ciclón	52
VI. Diagrama eléctrico del tablero de mando del equipo	53
VII. Curva de rapidez de secado en función de la humedad absoluta de materiales como la piedra poma	54

Introducción:

En el presente trabajo se corrigieron problemas de diseño del secador rotatorio, un equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias, para su puesta en marcha y mejor utilización por los usuarios. Lo anterior con el propósito de secar materiales granulados diversos en prácticas de laboratorio y evaluar los parámetros de secado.

Se evaluó la situación inicial del secador, se hicieron las modificaciones sugeridas y se verificaron los nuevos resultados y su eficiencia.

Se cambió el flujo en paralelo por uno en contracorriente, se mejoró el diseño del hogar para una mejor utilización del calor generado y se modificó la alimentación para evitar caídas de presión muy grandes.

La necesidad de contar con una serie de prácticas de laboratorio adecuadas para el estudio de la operación de secado en la Universidad Del Valle de Guatemala motivó el rediseño y la puesta en marcha del Secador Rotatorio, un equipo con una característica importante: la versatilidad para poder apreciar los efectos que se producen al cambiar las condiciones de secado.

Los secadores rotatorios son equipos muy usados en la industria nacional y a nivel de laboratorio su simulación es muy adecuada para el estudio de los fenómenos de transferencia de masa y de calor. Es importante que esta simulación se aproxime lo más posible a los equipos industriales, cosa que no se estaba dando con el equipo en sus condiciones iniciales u originales y se espera que con las modificaciones llevadas a cabo se obtengan las mejores simulaciones posibles.

Antecedentes:

Secado:

El secado consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es generalmente la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia, el producto que se extrae de un secador pasa a un empaquetado.

El agua u otros líquidos pueden separarse de sólidos mecánicamente mediante prensas o centrifugas, o bien térmicamente mediante evaporación. Generalmente eliminar líquidos por métodos mecánicos es más barato que por métodos térmicos, y por esta razón es aconsejable reducir el contenido de líquido en lo posible antes de operar en un secador térmico. (4)

Clasificación del equipo:

Debido a la naturaleza universal de la operación de secado, el equipo involucrado toma muchas formas. Básicamente los secadores se separan en dos clasificaciones: calor directo y calor indirecto.

En los secadores de calor directo, como su nombre lo indica, el calor es aplicado directamente al sólido húmedo o al material líquido por la fuente de calentamiento, usualmente un gas caliente. El paso del gas también provee un medio para ayudar a arrastrar los vapores removidos del material. En este grupo se incluyen los secadores en los que una corriente de gas es calentada por serpentines o resortes de vapor, y la corriente resultante calentada pasa a través o por encima del material a ser secado.

En los secadores de calor indirecto, el calor es aplicado al sólido húmedo o material líquido por la conducción desde el medio de calentamiento a través de una pared de retención de sólidos, usualmente metálica. El flujo de aire o gas, de ser usado, provee ninguna o únicamente una pequeña parte del calor requerido, y sirve únicamente para arrastrar los vapores separados del material.

Un tercer tipo de calentamiento es de calor infrarrojo. En este tipo, el calor es aplicado por transferencia de energía radiante de calentadores incandescentes, usualmente refractores calientes o elementos de resistencias eléctricamente calentados.

También los secadores pueden agruparse según operen en forma de lotes o continua.

Los anteriores tipos y grupos proveen no sólo un método de clasificar el equipo sino que se usan también en los cálculos para el dimensionamiento del equipo.

(2)

Dimensionamiento del equipo:

El propósito de todo equipo de secado es incrementar la tasa a la que simultáneamente tiene lugar la transferencia de masa y de calor, para que el secado pueda llevarse a cabo en equipo dimensionado razonablemente.

En algunas unidades como las de tipo flash, en spray y de lecho fluidizado, la distancia de conducción de calor es mínima porque sólo es de la superficie al centro de la partícula. En polvos finos especialmente, esta distancia es muy corta. También, el área expuesta al gas de calentamiento es muy alta, y la agitación es violenta. Estos factores dan como resultado una transferencia de calor extremadamente rápida (en la mayoría de los casos, tan rápida que no puede medirse). El período de rapidez decreciente usualmente no puede detectarse.

En otros tipos de secadores, como los rotatorios, de camión y de lecho movable, la operación de secado ocurre bajo condiciones muy diferentes. El material permanece inmóvil en un lecho o capa, y el calor es transferido al material por gases calientes que pasan por la superficie o a través de ella. Este tipo de secado generalmente requiere largos períodos de secado (medidos en horas, debido en gran parte al período de rapidez decreciente). Este período ocurre cuando la humedad en la superficie del lecho es evaporada a una tasa más rápida de la que la humedad es capaz de difundir desde adentro del lecho a la superficie. Como resultado, el plano de vaporización se aleja desde la superficie hacia el interior del lecho. Mientras más profundo sea el plano de vaporización, más lenta es la tasa de transferencia de calor y, por ende, la tasa de secado. (1)

Sistemas y Equipos de Secado:

Los dos mecanismos principalmente involucrados en el secado son las transferencias de masa y de calor. El calor debe suministrarse al material para vaporizar el líquido, y el vapor resultante debe arrastrarse por algún medio, como una corriente de aire o vacío.

Además, el calor debe ser transferido del gas de secado o superficie caliente hacia el centro del material, o al punto en el material que está lo más lejos de la fuente de calentamiento. La tasa a la cual esta transferencia de calor ocurre varía inversamente con la distancia entre la fuente de calentamiento y el material. La tasa también varía con el área expuesta a la fuente de calor, la cantidad de agitación en el material, y turbulencia en el gas de calentamiento.

Los principales factores que gobiernan la velocidad de secado son:

1. Dispersión de humedad: El secado rápido requiere la máxima exposición posible de superficie húmeda. Una torta de material tiene características de secado desfavorable, mientras que partículas individuales suspendidas en una corriente de aire tiene características de secado favorables.
2. Diferencial de temperatura: La tasa de secado es duramente proporcional a la diferencia entre la temperatura del medio de calentamiento y la temperatura del material que está siendo secado.

3. Agitación: Movimiento rápido de material y del medio de calentamiento promueve un secado rápido.
4. Tamaño de partícula: El secado se logra por la evaporación de humedad de la superficie de la partícula. Para poder remover humedad interna, es necesario que la humedad alcance la superficie por difusión. Esta transferencia tomará lugar más rápidamente con partículas pequeñas.
5. Estructura de la partícula: Ya que la humedad debe alcanzar la superficie de una partícula para ser evaporada, los materiales con capilaridades o intersticios se secan más rápidamente. Las partículas densas, que no tienen cavidades, que contienen humedad ocluida son difíciles de secar. (1)

Secadores de Calor Directo:

En la transferencia de calor por convección, el control de la temperatura se logra fácilmente al medir y controlar la temperatura del aire calentado. La temperatura del material siendo secado no puede, en ningún momento, exceder la temperatura del aire de los alrededores. Una precisa regulación de la temperatura asegurará así que el material no sea sometido a temperaturas por encima de un máximo especificado.

En general, el secador de convección debe considerarse primero porque el costo inicial para una capacidad dada es menor que en secadores de otros tipos. Además, si la corrosión es un problema, un secador por convección puede ser fácilmente protegido. Si se requiere una temperatura de secado bajo, un secador de convección puede ser operado de manera que la temperatura del material al ser secado no se eleve muy por encima de la temperatura de bulbo húmedo del aire de calentamiento. Esta temperatura es usualmente menos de 71.11 °C.

Sin embargo, los secadores de convección tienen varias desventajas. Por ejemplo, tienden a ser termalmente ineficientes en muchos casos, debido a las pérdidas altas de calor sensible en los gases de pila. Los solventes son difíciles de recuperar. La dispersión de polvos y la resultante pérdida de productos puede ser un problema serio con materiales finos. El producto puede ser contaminado por sustancias en el medio de secado. Oxígeno u otros gases en la atmósfera de secado pueden reaccionar con el material siendo secado, o con el solvente siendo evaporado.

Estas desventajas pueden ser eliminadas en gran parte a través del uso de auxiliares especiales y técnicas de operación. La eficiencia termal de un secador de convección puede mejorarse si se recircula una porción del aire de escape (exhaust).

Los solventes pueden removerse de la corriente de aire de salida por reacción química, absorción o adsorción, o por enfriamiento del aire por debajo del punto de rocío.

La dispersión de polvo puede ser reducida si se usa una velocidad de aire más baja o por pre-secado o pre-formado de la carga en forma de palos que estarán relativamente libres de polvos. El polvo que se arrastra en el aire de escape puede ser recuperado ordinariamente en scrubbers, ciclones o filtros de bolsa.

La contaminación puede evitarse por filtrado, lavado o al pretratar el medio de secado para remover componentes indeseables. Oxígeno u otros gases reactivos pueden excluirse un gas inerte apropiado o vapor sobrecalentado como el medio de secado.

De cualquier modo, los medios involucrados en las operaciones auxiliares previamente descritas pueden elevar el costo de un secador convectivo hasta el punto donde otros tipos de secadores se vuelven competitivos o, en algunos casos, más económicos. (2)

Secadores de Calor Indirecto:

Debido a que las temperaturas extremas que pueden estar involucradas cuando se lleva a cabo la transferencia de calor únicamente por conducción, este método de aplicar calor para secar tiene sus inconvenientes si las precauciones o controles adecuados no se ejecutan. Aun así, si una temperatura de secado igual al punto de ebullición del líquido evaporado puede tolerarse, un secador por conducción debe ser considerado cuando la eficiencia termal, recuperación de solvente, dispersión de polvos mínima, contaminación mínima y exclusión de gases indeseables es de importancia. Sin embargo, el costo inicial de un secador por conducción es más alto que el de uno de convección porque un encamisado o doble coraza debe proveerse para contener el medio de calentamiento.

Una desventaja de los secadores de calor indirecto es que requieren algún medio para proveer la fuente de calentamiento.

Este es usualmente vapor o aceite caliente. Si se usa vapor y el cuarto de calderas existente opera a capacidad, se necesitaran nuevos aditamentos de generación de vapor. Por ello, puede ser necesario agregar el costo de estos aditamentos al costo de la instalación del secador. (2)

Sistemas Continuos de Calor Directo:

En los tres tipos de secadores discutidos, las partículas a ser secadas son suspendidas y agitadas violentamente en una corriente de gas de secado caliente. En contraste, el grupo de secadores continuos de calor directo llevan a cabo la operación de secado bajo condiciones muy diferentes: en algunos de los secadores el material permanece en un lecho o capa que se mantiene inmóvil; en otros el material sí se mueve, como en un secador rotatorio, pero la agitación producida no es comparable a la de los métodos suspendidos en aire.

Cuando el lecho de material es estacionario, el calor es transferido a él por gases calientes que pasan por la superficie o a través del lecho. Si los gases pasan a través del lecho, las partículas deben aglomerarse, o ser relativamente grandes de manera que el lecho pueda ser suficientemente permeable para permitir el paso del gas. (2)

Secadores Rotatorios de Calor Directo:

El secador rotatorio es a menudo llamado el caballo de batalla de los secadores químicos. Esta descripción es apropiada por dos razones: primero, más químicos son secados en secadores rotatorios que en otro tipo de secador; segundo, este tipo de secador ha recibido muy poca atención en la literatura y en el trabajo de investigación. La mayoría del trabajo de ingeniería hecho en secadores rotatorios es estrictamente de una naturaleza práctica, de manera que el diseño está gobernado por la experiencia con el material a ser procesado (o similares) en laboratorio o unidades de tamaño real.

Un secador rotatorio de calor directo consiste de un cilindro horizontal a través del cual fluye el gas calentado.

El cilindro rota y usualmente está ligeramente inclinado del plano horizontal, de manera que la carga pueda ser hecha fluir por gravedad desde el extremo superior hacia el inferior. En un secador con flujo paralelo de aire y material, el material también es puesto en movimiento a través del secador por la corriente de aire.

Usualmente, el interior del cilindro está equipado con aletas que se despliegan a lo largo del cilindro; estas aletas levantan el material a ser secado y lo dispersan a través de la corriente de aire. Las aletas pueden tener distintos arreglos geométricos según su inclinación.

Debido a que el regado de material aumenta el contacto entre el material y el gas de secado, la tasa de secado, y por ende la capacidad de un secador de un tamaño dado, se incrementa también. Ordinariamente, aletas rectas se usan en el extremo de alimentación del secador para materiales pegajosos o húmedos, mientras que las de 45 y 90 grados se usan para materiales casi secos o de flujo libre.

La acción de secado en un secador rotatorio es intermedia entre la acción en una unidad de suspensión de partículas, como un secador flash, y la acción en un secador de bandeja o de sartén.

Las partículas están individualmente expuestas a la corriente de aire durante la acción de esparcimiento o regado, como en una unidad flash, pero las velocidades son mucho más bajas, de manera que la turbulencia es mucho menor, y el secado se lleva a cabo a tasas menores.

El período de tiempo que el material permanece en el secador, conocido como retención, varía desde 5 minutos hasta 2 horas. El secador, sin embargo, siempre retiene una cierta cantidad del material secado, la cual varía de 5 a 15 % del volumen total del cilindro o coraza.

Este material retenido se conoce como llenaje.

Para materiales que son extremadamente sensibles al calor, los secadores rotatorios pueden ser operados con velocidades lo suficientemente altas para transportar por aire el material a través de la unidad.

Todo el material es capturado por un colector de polvo como se hace, por ejemplo, con plásticos finos. El tiempo de retención en este tipo de secador es corto, aunque considerablemente mayor que en las unidades flash. Las partículas grandes o terrones de material húmedo son retenidas más tiempo que las partículas finas y secas.

Los secadores rotatorios de calor directo pueden ser operados con el flujo de gas paralelo o en contracorriente con el flujo de materiales. A primera vista, parecería que un flujo en contracorriente daría mayor eficiencia que un flujo en paralelo. Esto es verdad en un calcinador donde nada de humedad se remueve y apenas es necesario elevar la temperatura del material. Pero en un secador, especialmente uno con materiales sensibles al calor, el flujo en paralelo es a menudo más eficiente porque permite mayor temperatura del gas de entrada.

Ya que en flujo paralelo el gas de entrada caliente se pone en contacto con el material húmedo, la temperatura del material permanece a la temperatura de bulbo húmedo del gas tanto tiempo como el material contenga humedad. Para cuando el material está seco, la temperatura de bulbo seco ha sido disminuida a un punto donde ya no es dañina. En una aplicación de secador típica, por ejemplo, la temperatura del gas de entrada puede ser 176.67 °C sin que la temperatura del material se eleve por encima de 54.44 °C.

No solamente aumentan la capacidad de los secadores las altas temperaturas del gas de entrada, sino que también aumentan su eficiencia porque menos volumen de gas es requerido y, por ende, menos calor se pierde en los gases de purga.

En un secador en contracorriente, el producto seco se pone en contacto con los gases calientes de entrada. Esto puede ser una ventaja cuando se necesita un producto de alta temperatura pero es altamente indeseable con materiales sensibles al calor. En los secadores en paralelo, las temperaturas del producto y del gas de purga están muy cercanas. Así, la temperatura del producto puede ser controlada si se controla la temperatura del gas purgado.

La cantidad de humedad removida en un secador rotatorio es proporcional al área "croseccional" del secador y a la velocidad del gas de secado. Una velocidad del gas alta, también incrementa la turbulencia, lo que a su vez incrementa las tasas de secado.

Aunque la velocidad del gas máxima está limitada por la dispersión de partículas, no es una limitación tan seria como a veces se piensa, porque el polvo puede usualmente ser capturado en el lecho de material en el secador. Pastas húmedas o pegajosas que no pueden ser alimentadas directamente pueden mezclarse antes de la alimentación con un reciclaje de materiales secos, lo que disminuye el contenido de humedad a un nivel que puede ser manejado fácilmente.

El funcionamiento típico de los secadores rotatorios de calor directo obtenido por un fabricante se puede apreciar en la siguiente tabla:

Funcionamiento típico de los secadores rotatorios de calor directo:

Alta Temperatura

Material	Contenido inicial de humedad %	Contenido final de humedad %	Eficiencia térmica %
Arena	10	0.5	61
Piedra	6	0.5	65
Espato Flúor	6	0.5	59
Cloruro de Sodio (sal de vacío)	3	0.04	70-80
Sulfato de Sodio	6	0.1	60
Piedra Caliza	6	0.2	60-65

Temperatura Mediana

Material	Contenido inicial de humedad %	Contenido final de humedad %	Eficiencia térmica %
Caparrosa	7	1	55
Sulfato de Amonio	3	0.10	50-60
Acetato de Celulosa	60	0.5	51
Cloruro de Sodio (granulosa)	25	0.06	35
Estireno	5	0.1	45

Baja Temperatura

Material	Contenido inicial de humedad %	Contenido final de humedad %	Eficiencia térmica %
Acido Oxálico	5	0.2	29
Resinas de Vinil	30	1	50-55
Nitrato de Amonio	4	0.25	30-35
Urea	2	0.2	20-30

Una variación de las unidades de secado rotatorio es el Secador Rotatorio de Estantes. Aquí, la carga es soportada por estantes sobrepuestos, mientras es secada por gases calientes que pasan entre los estantes y a través del lecho poco profundo encima. En contraste con el secador rotatorio convencional, el flujo de aire es a través del lecho de material en vez de por el lecho de material. Por lo tanto, no se requiere un regado del material; en vez de eso, el material tiene una acción rodante, y es presionado al mismo tiempo por el aire fluyendo a través de él.

El resultado es una acción muy dócil que produce un mínimo rompimiento de partículas.

El contorno formado por los estantes es un cono truncado que hace fluir al material de la alimentación hacia el extremo de la descarga, el lecho es lo más delgado en la entrada. Debido a que mientras más delgado es el lecho, es menos la resistencia del gas a fluir, el mayor volumen de gas pasa a través del lecho en la alimentación, donde el material está lo más húmedo posible y donde la mayor parte del calor puede ser absorbido por vaporización.

El flujo de aire en un secador rotatorio de estantes exhibe este comportamiento: El contorno formado por los estantes es un cono truncado que hace fluir al material desde la alimentación hacia el extremo de la descarga, siendo el lecho lo más delgado posible a la entrada. Debido a que mientras más delgado es el lecho, es

menos la resistencia al flujo de gas, el mayor volumen de gas pasa a través del lecho en el extremo de la alimentación, donde el material está lo más húmedo posible y donde la mayoría del calor puede ser absorbido por vaporización.

A continuación se enumeran las ventajas y desventajas de los secadores rotatorios de calor directo:

Ventajas: (1) El cambio de escala de información de planta piloto o laboratorio es simple y efectivo; (2) la humedad ocluida (adherida a la partícula) es removida fácilmente porque puede obtenerse cualquier tiempo de retención razonable; (3) el costo capital es razonable; (4) control de temperatura preciso es posible, aunque en este aspecto es mejor un secador de lecho fluidizado; (5) el secado y el calcinado pueden llevarse a cabo en la misma unidad; y (6) el secador puede ser operado ya sea en flujo paralelo o en contracorriente, dependiendo de cuál proporcione una eficiencia más alta.

Desventajas: (1) Los secadores son difíciles de sellar; (2) los requerimientos de piso y espacio de construcción son razonablemente elevados; (3) finos y polvorientos materiales son expulsados del secador y requieren equipo costoso de recolección de partículas; y (4) la carga estructural dinámica es alta; si el secador está montado sobre acero estructural, el acero debe estar bien anclado. (2)

Sistemas Tipo Lote de Calor Directo:

Cuando el material que será secado es relativamente caro o frágil, de manera que hasta pérdidas pequeñas son significativas, unidades en donde el producto no se mueve deben usarse. Para este propósito, bandejas o estantes apilados uno encima del otro en una especie de gabinete son los medios más eficientes de lograr grandes áreas superficiales en un espacio mínimo. Y cuando las cantidades de material a ser manejadas no son demasiado grandes, el modo de operación se vuelve por lotes en vez de continuo. (2)

Secadores Tipo Lote de bandeja, estante y gabinete:

En estos secadores, la tasa de secado es directamente proporcional al 78 o 80 % de la tasa de flujo de gas; la superficie de sólidos expuestos al flujo de gas; y la diferencia media de temperatura existente entre los sólidos y el gas.

Las temperaturas usadas para el diseño práctico de secadores de bandeja están limitadas usualmente por la naturaleza frágil del material a ser secado. Por lo tanto, la mayoría de secadores de bandeja operan a temperaturas de gas entre el rango de 15.55 a 204.44 °C, mientras los secadores de tipo de bandeja de congelación operan cerca de cero.

También, ya que la ventaja primaria de los secadores de bandeja es su tratamiento gentil de las partículas, el flujo de gas esta usualmente limitado a menos de la velocidad de caída libre de las partículas más finas en el producto. Esto deja a la superficie de secado como la principal variable a ser considerada para su diseño.

Dadas las limitaciones de un diseño que se oponen a una superficie máxima en un número de estantes o bandejas, el problema siguiente más importante que enfrentan los manufactureros químicos con un producto que será secado es el manejo de los materiales. El material debe ser esparcido uniformemente sobre las bandejas, expuesto a los gases de secado, y finalmente recolectado de las bandejas al estar seco.

Los secadores tipo lote de bandeja son usados en compañías farmacéuticas, laboratorios de investigación, plantas piloto, y departamentos de desarrollo de productos nuevos. Ya que el flujo de aire y temperaturas están siempre cercanamente restringidos, el consumo de potencia no es una consideración importante. Similarmente, el polvo no es una consideración importante; y el equipo de control de polvo no se incluye frecuentemente con la unidad. (2)

Cálculo y Teoría de Secado:

Los cálculos y teoría básica de secado para las operaciones de secado le sirven al ingeniero químico como guía para evaluar y seleccionar equipo y procesos de secado.

Relaciones de Equilibrio:

Los sólidos húmedos pueden contener humedad enlazada o no enlazada. El anterior arroja una presión de vapor en equilibrio que es menos que la del agua pura. En la arena húmeda, por ejemplo, esencialmente toda la humedad no es enlazada; en el cuero y algodón por otro lado, el cual ha alcanzado el equilibrio con la atmósfera, toda la humedad es enlazada; mientras que la torta de filtrado del algodón contendrá humedad tanto enlazada como no enlazada.

Cuando algunos de estos sólidos están expuestos (por un suficientemente largo período de tiempo) a un suministro ilimitado de aire con humedad relativa pequeña pero arreglada, el contenido de humedad de los sólidos se aproximará al valor de equilibrio. El contenido de humedad en equilibrio dependerá, por supuesto, de la temperatura y naturaleza de los sólidos y de la humedad relativa del aire.

Aunque el contenido de humedad en equilibrio de materiales no porosos, insolubles como arena es prácticamente cero, que de otras sustancias, como algodón, cuero, y almidón, que varían de cero a un porcentaje grande del peso de los sólidos.

Determinar los valores de equilibrio se vuelve de importancia porque estos valores aumentan cuando la humedad relativa del aire aumenta, y la temperatura de los sólidos disminuye. Y para complicar las cosas, las isothermas de adsorción en equilibrio de muchos materiales, tales como almidón y pulpa de madera, exhiben histéresis. Para estos materiales, el contenido de humedad en equilibrio no será el mismo para adsorción que para desorción.

El contenido de humedad en exceso de sólidos por encima del valor de equilibrio es ún termino que se conoce como humedad libre; éste representa la cantidad

máxima por la cual la humedad en los sólidos puede ser reducida para una temperatura dada y humedad del aire.

Mecanismos de Secado:

Todos los procesos de secado involucran las transferencias simultáneas de masa y de calor: mientras la humedad es desorbida, o evaporada, el calor debe ser suministrado. En el secado de contacto directo, el calor es suministrado por el aire, mientras que en el secado indirecto, el calor es suministrado por otra fuente, usualmente por una frontera metálica en contacto con los sólidos.

En el secado por convección de aire, la tasa global de secado puede ser determinada por las resistencias a la transferencia de masa y de calor en la fase gaseosa o por la resistencia al transporte de la fase sólida. Cuando las resistencias de la fase gaseosa están en control, líquido es suministrado a la superficie de los sólidos tan rápidamente como este puede ser evaporado, y la superficie permanecerá húmeda. Pero cuando la fase de sólidos controla, limita la tasa de movimiento de humedad o transferencia de calor de manera que un gradiente de humedad se establece dentro de los sólidos.

La humedad puede moverse dentro de los sólidos por una variedad de mecanismos. En lechos de arena y en sólidos con grandes poros abiertos, el movimiento líquido es producido por tensión superficial. En materiales coloidales y de tipo gel, y en sólidos con poros muy finos, este movimiento es principalmente por difusión molecular ya sea en el estado líquido o vapor. En otros sólidos, el líquido es forzado a la superficie por un gradiente de presión que resulta del encogimiento de las capas exteriores.

Cuando sólidos fibrosos y particulares se secan, no es poco común para la tasa de secado global ser controlada por la resistencia de transferencia de calor de los sólidos.

Una capa de partículas no húmedas o fibras generalmente exhibe una muy pequeña conductividad termal, mucho más pequeña que la del agua líquida. Por lo tanto, una capa de partículas húmedas tendrá una conductividad termal mayor que una correspondiente capa de partículas secas. En el secador indirecto, la tasa está generalmente limitada por la transferencia de calor, pero hay muchos casos de secado por convección donde la resistencia termal de los sólidos controla.

Mientras son secados, muchos sólidos experimentan cambios físicos que afectan sus tasas de secado. El encogimiento de las fibras vegetales, madera y gránulos de almidón, por ejemplo, incrementa grandemente la resistencia a la transferencia de masa dentro de las fibras individuales y gránulos.

Cuando el líquido en los poros de un sólido contiene una sal disuelta, hay precipitación de la sal y reducción en el tamaño de las aberturas de los poros mientras el agua es evaporada. Este tipo de procesos reduce significativamente en apariencia la tasa de secado de cápsulas de nitrato de amonio. Si el jabón de barra se seca muy rápidamente la capa exterior se endurece y se vuelve impermeable.

Diferentes mecanismos están involucrados en la operación de secado como puede verse, y las resistencias de control pueden cambiar mientras un material es

secado. Esto, unido a la gran diversidad de sólidos y las numerosas formas de secado, hace a la generalización difícil si no imposible.

Definición de términos comunes:

Aire saturado: Aire en el que el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida a una temperatura dada y presión.

Humedad: Kilogramos de vapor de agua/ Kilogramos de aire seco, bajo cualquier conjunto de condiciones.

Porcentaje de humedad relativa: $100 \times (\text{kilogramos de agua/kilogramos de aire seco}) / (\text{kilogramos de aire saturado})$ ambos, numerador y denominador a la misma temperatura y presión.

Calor húmedo: El calor húmedo C_s es el calor que se requiere para aumentar la temperatura de la masa unitaria del gas y su vapor acompañante 1°C a presión constante.

Volumen húmedo: El volumen húmedo de una mezcla vapor-gas es el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes

Volumen saturado: Volumen en pies cúbicos de una libra de aire seco y el vapor de agua que contiene cuando está saturado.

Punto de rocío: Temperatura a la cual el aire y su vapor de agua deben ser enfriados (a humedad constante) para poder volverse saturados.

Temperatura de bulbo húmedo: Temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor-gas no saturada.

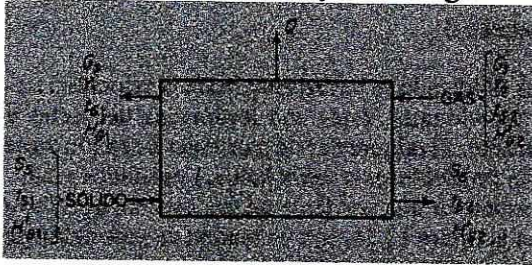
Procesos Continuos de Calor Directo:

Las operaciones de secado de contacto directo que se llevan a cabo ya sea en flujo paralelo o en contracorriente en equipo de túnel, transportador o rotatorio pueden ser tratadas en forma íntegra con balances de materia y energía, y con expresiones para las tasas de transferencia de masa y de calor. Sin embargo, muchos tipos de operaciones de secado continuas son tan complicadas debido a diversos factores que un análisis racional es excesivamente difícil e impráctico. Por esto, en muchos casos debe confiarse en pruebas de plantas piloto y extrapolación, y en algunas instancias pruebas a gran escala.

El secador en spray es uno de esos casos. Aunque ha sido sujeto de mucha investigación, no es posible diseñar un secador en spray a partir de relaciones

teóricas; hasta la extrapolación de datos de plantas piloto no es confiable siempre. Resultados de confianza pueden únicamente ser obtenidos por corridas de prueba hechas bajo condiciones de producción. (1)

Balances de Materiales y de Energía:



Un secador continuo a contracorriente puede representarse como en la figura de arriba. Los sólidos entran con un contenido de humedad X_1 y temperatura t_1 , y salen con un contenido de humedad X_2 y temperatura t_2 ; el gas entra con una humedad Y_2 y temperatura T_2 , y sale con una humedad Y_1 y temperatura T_1 . Por conveniencia, las tasas de corriente de gases y sólidos se expresan en base seca. Un balance global de humedad para el secador operando en estado estable es:

$$X_1L + Y_2G = X_2L + Y_1G \quad (I)$$

Si el secador es operado con el gas y los sólidos en flujo paralelo, el balance de humedad es similar a la ecuación (I), con únicamente los signos de los 2 términos cambiados:

$$X_1Ln - Y_2G = X_2L - Y_1G \quad (II)$$

Generalmente, la tasa de alimentación de sólidos y contenido de humedad son conocidos, así como el contenido de humedad deseado del producto y la humedad del aire que entra. Si se arregla la humedad del aire que sale, el balance de humedad proveerá la tasa de flujo de gas. Por otro lado, si se conoce la tasa de flujo de gas, el balance proveerá la humedad del aire que deja el secador.

Para la mayoría de operaciones de secado ordinarias, el balance de energía global se reduce a un balance de entalpía porque la energía cinética, potencial y otros efectos energéticos son prácticamente despreciables. El balance de energía global se aplica tanto a operaciones con flujo paralelo o en contracorriente:

$$h_1 L \pm H_2G = h_2 L \pm H_1G + q \quad (III)$$

En esta ecuación, los signos del segundo y cuarto término son positivos para flujo en contracorriente y negativos para flujo en paralelo.

La pérdida de calor hacia los alrededores está representada por q .

Si la operación es adiabática, q es cero. Por otro lado, si algo de calor indirecto es suministrado al secador, q es negativo. Cuando los sólidos son transportados a

través del secador sobre una banda, camiones u otros equipos, términos adicionales deben ser incluidos para corresponder a las entalpías locales del equipo transportador que entra y sale del secador.

La entalpía del aire húmedo puede evaluarse usando ya sea una carta psicrométrica o la siguiente relación:

$$H = 0.240T + (1060.8 + 0.45 T)Y \quad (IV)$$

Y la entalpía de los sólidos húmedos por:

$$h = C_d t + (t-32)X + \Delta H_A \quad (V)$$

Estas relaciones de entalpía están basadas en: aire seco a 101325 Pa y -17.78 °C, sólidos secos a 101325 Pa y -17.78 °C y agua líquida a 101325 Pa y 0 °C. El calor integral de humedecimiento o adsorción (ΔH_A) de sólidos insolubles, no higroscópicos con una relativamente pequeña área superficial es despreciablemente pequeño; pero para sólidos higroscópicos y para sólidos con un área de poros interna grande, como sílica gel puede ser significativo.

El balance de energía global es útil para evaluar cualquiera de las temperaturas de la corriente. Aunque, una vez que todas las tasas de flujo de las corrientes, humedades, y contenidos de humedad y tres de las temperaturas de corriente han sido establecidas, el balance de energía puede proveer la cuarta temperatura. (1)

Procedimiento de Unidad de Transferencia de Calor para un Secador Rotatorio en Contracorriente:

Objetivo: Encontrar la longitud total del secador Z.

Condiciones conocidas:

Para Sólidos	Para Gases
L	G, G_s
X_1, X_2	Y_2
t_1, t_2	T_2

Pasos de Cálculo:

1. Encontrar Y_1 usando el balance de humedad global como sigue:

$$Y_1 = Y_2 + (L/G)(X_1 - X_2)$$

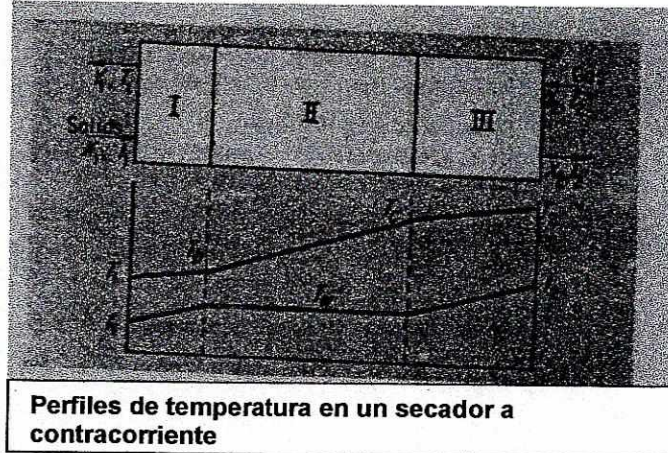
2. Encontrar H_1 usando el balance de energía global de acuerdo con la ecuación:

$$H_1 = H_2 + (L/G)(h_1 - h_2)$$

3. Encontrar T_1 usando la ecuación (IV) :

$$T_1 = (H_1 - 1060.8 Y_1)/(0.240 + 0.45Y_1)$$

4. Encontrar T_c y T_w usando un balance de energía alrededor de la sección 3 en la siguiente figura, y una carta psicrométrica



$$T_c = T_2 - (C_d - L/C_s G)(t_2 - T_w)$$

Asumir un valor de T_w ,

Resolver el balance de energía para T_c ,

Usar T_c y Y_2 para encontrar T_w en la carta psicrométrica, y comparar con el valor asumido de T_w ; repetir hasta que el valor asumido concuerde con el encontrado.

5. Encontrar T_b usando un balance de energía alrededor de la sección 1:

$$T_b = T_1 + (L/G) [(C_d + X_1 C_w)/C_s] (T_w - t_1)$$

6. Estimar el número de unidades de transferencia aplicando la siguiente ecuación a cada sección por separado:

$$N_t = (T_{in} - T_{out})/(\Delta T)_m$$

7. Verificar si el número total de unidades de transferencia está entre 1.5 y 2. Si no, ajustar la tasa de flujo de gas y repetir hasta que el número total de unidades de transferencia caiga entre 1.5 y 2.0.

8. Estimar L_t al aplicar la siguiente ecuación:

$$L_t = 0.1 C_s D G_s^{0.84}$$

9. Encontrar el largo total en el uso de:

$$Z = (N_t L_t)_I + (N_t L_t)_{II} + (N_t L_t)_{III} \quad (1)$$

Método de la Unidad de Transferencia de Calor:

Un método de estimar el largo de un secador continuo que opera ya sea en flujo paralelo o en contracorriente involucra el cálculo del número de unidades de transferencia de calor y la longitud de una unidad de transferencia. Este método se presta a sí mismo para el diseño y análisis de un importante tipo de operaciones donde los sólidos granulares, no porosos con solamente humedad de superficie desligada o suelta son secados en equipo rotatorio o de túnel. También puede ser usado para el diseño de calcinadores y enfriadores donde la transferencia de calor es de importancia primaria y cualquier secado es incidental.

De cualquier forma, el método está basado en un número de condiciones rigurosas, y su aplicabilidad es limitada.

Un secador adiabático, continuo e ideal del tipo considerado aquí puede dividirse en tres zonas o secciones. En la primera, los sólidos son calentados hasta la temperatura de saturación adiabática (o bulbo húmedo), y no se espera que ocurra ningún secado.

En la segunda sección, substancialmente toda la humedad es removida, mientras los sólidos permanecen a la temperatura de saturación adiabática. En la tercera sección, los sólidos son calentados aún más y experimentan un aumento de temperatura, sin que ocurra más secado. Así, para propósitos de análisis, se asume que el secado se confina a la sección central y que únicamente transferencia de calor tiene lugar en las secciones de los extremos.

Estas zonas existen tanto en secadores de flujo paralelo como en contracorriente. El modo de operación, por supuesto, afecta los perfiles de temperatura del gas sólidos que pasan a través. Los perfiles representativos que se muestran en la figura de tres secciones son para la operación en contracorriente. Para que los sólidos se sequen a la temperatura de saturación adiabática la transferencia de calor por conducción y radiación deben ser despreciables.

Para el tipo de secador ideal descrito arriba, es posible calcular el número de unidades de transferencia de calor en cualquier sección dada al integrar la siguiente expresión:

$$N_t = \int dT/(T - t) \quad (\text{VI})$$

Para el centro de la sección del secador, donde la temperatura de los sólidos es constante e igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire, esto lleva a:

$$N_t = \pm \ln [(T_c - T_w)/(T_b - T_w)] \quad (\text{VII})$$

El signo positivo se toma para secadores con flujo en contracorriente, y el negativo para secadores con flujo en paralelo. Para las secciones finales del secador, la ecuación (VI) puede ser integrada cuando los perfiles de temperatura

producidos por los sólidos y corrientes gaseosas son lineales. Estos perfiles son lineales cuando las capacidades caloríficas totales de las corrientes respectivas son constantes. Bajo estas circunstancias, el número de unidades de transferencia en la primera sección del secador con flujo a contracorriente está dado por:

$$N_t = \left[\frac{T_b - T_1}{(T_1 - t_1) - (T_b - T_2)} \right] \ln \left[\frac{T_1 - t_1}{T_b - T_2} \right]$$

(VIII)

Ambas ecuaciones (VII y VIII) pueden transformarse en una expresión de la forma:

$$N_t = (T_{in} - T_{out}) / (\Delta T)_m \quad (IX)$$

Donde $(\Delta T)_m$ es la fuerza de impulso logarítmica media para transferencia de calor. Por lo tanto, la ecuación (IX) es una expresión general que puede ser usada para calcular el número de unidades de transferencia en cualquier sección ya sea con flujo contracorriente o paralelo, cumpliéndose las condiciones arriba mencionadas.

Ya que el largo total de un secador es igual al producto del número de unidades de transferencia y largo de una unidad de transferencia individual, se tiene que:

$$Z = N_t L_t \quad (X)$$

Es necesario tener medios para evaluar el largo de una unidad de transferencia. Esto puede lograrse si se usa:

$$L_t = G_s C_s / Ua \quad (XI)$$

donde Ua representa el coeficiente de transferencia de calor volumétrico. Para cualquier sección dada de un secador, el coeficiente global de transferencia de calor y capacidad de calor húmedo del aire se presumen constantes. En el caso de secadores de túnel, donde el aire fluye por y paralelo a la superficie de secado, el coeficiente global es igual al coeficiente de película convectivo. Cuando esta expresión con la ecuación (XI) se obtiene el resultado que se muestra a continuación, el cual es útil para calcular el largo de una unidad de transferencia en un secador de túnel:

$$L_t = 19.5 G_s^{0.2} / a \quad (XII)$$

Para este tipo de secador, a representa la superficie efectiva para la transferencia de calor o masa por volumen unitario del secador.

En secadores rotatorios con aletas internas que levantan los sólidos y los hacen caer en cascada a través del gas que fluye, la correlación de Friedman & Marshall puede usarse para estimar el coeficiente global de transferencia de calor. Una forma aproximada para esta expresión, que provee valores conservadores es:

$$U_a = 10G_s^{0.16}/D \quad (\text{XIII})$$

Al combinar esta expresión con la ecuación 11 se obtiene la siguiente relación para estimar la longitud de una unidad de transferencia en un secador rotatorio:

$$L_t = 0.1C_sDG_s^{0.84} \quad (\text{XIV})$$

De acuerdo con Friedman & Marshall la velocidad másica del aire en un secador rotatorio puede estar entre el rango de 200 a 10,000 lb/(hr.)(ft²). Usualmente, la velocidad másica más alta que no causará dispersión excesiva o pérdida de partículas por entrada de aire es la que se usa. En general, una velocidad másica aceptable tendrá que determinarse por pruebas. Una vez que esta velocidad se ha encontrado, y la tasa de gas total es corregida, el diámetro del secador puede calcularse por la siguiente ecuación:

$$D = (4G/\pi G_s)^{1/2} \quad (\text{XV})$$

Normalmente, el diámetro estará entre el rango de 0.3048 a 3.048 metros, y será el equivalente de 10 a 25 % del largo del secador.

El procedimiento general para calcular el largo de un secador continuo por el método de coeficiente de transferencia de calor es: Se usan balances globales de materiales y de energía para establecer las condiciones finales. Balances de materiales y de energía cerca de las secciones finales, junto con una carta psicrométrica, se usan para establecer las temperaturas del aire que entra y sale de la sección central, así como la temperatura de bulbo húmedo y, por ende, la temperatura de los sólidos. El número de unidades de transferencia de calor se obtiene aplicando la ecuación (9) para cada una de las secciones.

En el pasado, se ha encontrado que el número total de unidades de transferencia en un secador rotatorio deben estar entre 1.5 y 2 para la operación más económica. Si el número se sale de este rango, se puede hacer un ajuste en la tasa de flujo de gas con un correspondiente cambio en la temperatura del gas de salida. El largo de una unidad individual de transferencia se encuentra entonces al aplicar la ecuación (XI) o una de sus formas alternas. Y finalmente el largo total es obtenido al multiplicar el número total de unidades de transferencia por el largo de una unidad individual.

Método de la Unidad de Transferencia de Masa:

Otro método de estimar el largo de un secador en contracorriente o en paralelo consiste en calcular el número de unidades de transferencia de masa que se requieren para una operación dada, y la longitud correspondiente de una unidad de transferencia individual. Puede aplicarse donde la tasa de secado instantánea

es una función puntual del contenido de humedad y la fuerza de impulso de humedad de los sólidos, $(Y_w - Y)$.

El secador adiabático, continuo, ideal que es la base para el método descrito aquí, consiste en dos secciones o zonas. Ya que la pila, se asume, entra a la primera sección a casi la temperatura prevaleciente de los sólidos en el secador, una zona de precalentamiento separada no es requerida. La transferencia de calor desde el aire hacia la pila es asumida por convección únicamente, y las áreas para transferencia de masa y de calor son asumidas iguales. También se asume que toda la vaporización tiene lugar en ambas secciones a la temperatura de saturación adiabática.

La transición de una zona a la siguiente está marcada por el punto donde el contenido de humedad crítica se alcanza. En la primera sección, la tasa de secado a una distancia, z , desde la entrada está gobernada por la relación:

$$N_A = k_y (Y_w - Y) \quad (\text{XVI})$$

Y en la segunda sección por:

$$N_B = k_y (Y_w - Y) [(X - X_e)/(X_c - X_e)] \quad (\text{XVII})$$

Los perfiles de temperatura representativos y de humedad del aire que se muestran en la figura son para una operación en paralelo.

El número de unidades de transferencia de masa en la sección A del secador adiabático ideal puede encontrarse integrando:

$$(N_t)_A = \int dY/(Y_w - Y) \quad (\text{XVIII})$$

La humedad, Y_w , corresponde a la condición de saturación adiabática y es constante. Por integración de la expresión anterior se obtiene la siguiente:

$$(N_t)_A = \pm \ln [(Y_w - Y_c)/(Y_w - Y_1)] \quad (\text{XIX})$$

Esta expresión puede usarse para calcular el número de unidades de transferencia de masa en la sección A. Para operaciones de flujo en contracorriente, se escoge el signo positivo; para flujo en paralelo se escoge el signo negativo.

Para determinar el número de unidades de transferencia en la sección B se requiere la integración de la relación más complicada:

$$(N_t)_B = \int \frac{(X_c - X_e) dY}{(X - X_e)(Y_w - Y)}$$

XX

Otra vez, Y_w se toma constante así como X_c y X_e , pero X es una variable que debe ser eliminada sustituyendo una expresión que representa un balance de humedad sobre la sección B. Cuando esto se hace y se lleva a cabo la integración, la siguiente relación se obtiene para calcular el número de unidades de transferencia:

$$(N_t)_B = \left[\frac{X_c - X_e}{(Y_w - Y_1)(G/L) \pm (X_2 - X_e)} \right] \times \ln \left[\frac{(X_c - X_e)(Y_w - Y_1)}{(X_2 - X_e)(Y_w - Y_e)} \right]$$

(XXI)

Para operaciones de flujo en contracorriente, se escoge el signo positivo; para flujo en paralelo se escoge el signo negativo.

La longitud de una unidad de transferencia para cada unidad de transferencia está dada por:

$$L_t = G_s/k_y a \quad (\text{XXII})$$

Donde es el área efectiva para la transferencia de masa por volumen unitario del secador. Para los sistemas aire-agua, la razón psicrométrica, $h_c/k_g C_s$, es casi la unidad; ya que $k_y = 1.61 k_g$, se tiene que:

$$k_y = 1.61 h_c / C_s \quad (\text{XXIII})$$

Cuando el aire fluye paralelo a la superficie de secado, como en un secador de túnel, las anteriores ecuaciones pueden combinarse para obtener la siguiente relación, la cual es útil y práctica para estimar la longitud de una unidad de transferencia:

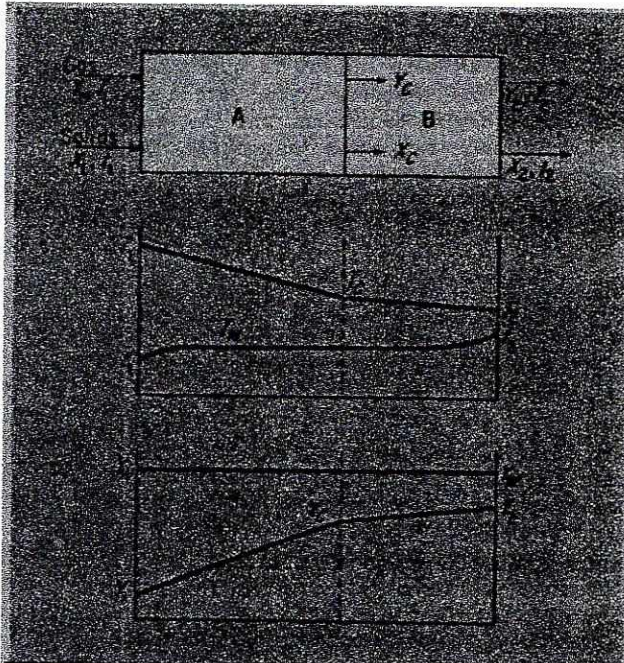
$$L_t = 48.5 C_s G_s^{0.2} / a \quad (\text{XXIV})$$

Finalmente, la longitud total del secador se obtiene por la ecuación:

$$Z = (N_t L_t)_A + (N_t L_t)_B \quad (\text{XXV})$$

El procedimiento general para calcular la longitud de un secador continuo por el método de la unidad de transferencia de masa es el siguiente: (1) Se usan balances globales de masa y de energía para establecer las condiciones finales; (2) el contenido crítico de humedad es medido experimentalmente; (3) la humedad Y_w , se encuentra por un balance de humedad alrededor de una sección del secador; (4) la temperatura de bulbo húmedo y , por ende Y_w se

encuentra por un balance de energía cerca de un extremo, junto con una carta psicrométrica. El número de unidades de transferencia de masa se encuentra por la ecuación (XIX) y (XXI), y la longitud de una unidad de transferencia por la ecuación (XXII). El número total se obtiene entonces por la ecuación (XXV). (1)



Perfiles de humedad y temperatura en un secador de flujo paralelo

Método de la Simulación de Secado Continuo:

Los métodos anteriores para los cálculos de secado continuo se han limitado a aplicaciones en casos en los que la tasa de secado instantánea es una función puntual de las condiciones de secado, y la pila permanece a la temperatura de saturación adiabática. Afortunadamente, hay un método experimental sencillo para simular operaciones de secado continuo que es muy general, y aplicable a casi cualquier tipo de pila que experimenta casi cualquier tipo de secado. La idea detrás del método es someter a la muestra de la pila a la misma secuencia de condiciones de secado que encontraría en la unidad continua proyectada.

La prueba no sólo duplica las condiciones actuales de la unidad a escala natural sino que también provee un récord de cómo serán las condiciones. Este método, también, tiene la ventaja de ser perfectamente riguroso sin requerir un conocimiento del mecanismo de secado. Consecuentemente puede usarse para diseñar equipo continuo para secar materiales como jabón y madera, cuyas propiedades y comportamiento de secado son notoriamente difíciles de representar matemáticamente. Aunque un secador adiabático, continuo y de flujo paralelo se usará para ilustrar el método, es igualmente aplicable a equipo no adiabático y en contracorriente.

Primero, el secador continuo se divide en un número arbitrario de pequeños incrementos longitudinales. Un balance de humedad sobre el primer incremento en el extremo de entrada del secador en flujo paralelo puede expresarse como:

$$Y_i - Y_1 = -(L/G)(X_i - X_1) \quad (\text{XXVI})$$

donde X_i y Y_i son el contenido de humedad y humedad de los sólidos y el gas que dejan el primer incremento. Una forma general de expresar el balance de humedad por cada incremento es:

$$\Delta Y = -(L/G)(\Delta X) \quad (\text{XXVII})$$

Si el secador es adiabático, el balance de energía por cualquier incremento es:

$$\Delta H = -(L/G)(\Delta h) \quad (\text{XXVIII})$$

Cuando las ecuaciones (IV) y (V) se substituyen en la ecuación anterior, el balance de energía por el primer incremento se vuelve:

$$T_1 = \frac{(0.240 + 0.45 Y_1) T_1 - (L/G) [C_p t + \Delta (tX) - 1,092.8 \Delta X]}{0.240 + 0.45 [Y_1 - (L/G) \Delta X]}$$

(XXIX)

Para el propósito de esta ilustración (y para simplificar el balance de energía), se asume que el calor de humedecimiento (adsorción) es despreciable.

Para llevar a cabo el método, las condiciones de entrada del secador y tasas de flujo deben conocerse, siendo el objeto encontrar el tiempo de secado y, por ende, la longitud del secador requerida para alcanzar el contenido de humedad final. La muestra de pila debe ser representativa respecto de sí misma ya que será secada en la unidad de tamaño natural.

La muestra se somete primero a las condiciones de aire conocidas que prevalecerán en el extremo de entrada del secador continuo. Cuando el contenido de humedad de la muestra se reduce al contenido de humedad de los sólidos que abandonan el primer incremento del secador, las condiciones del aire son cambiadas a las que prevalecerán a la entrada del segundo incremento del secador a gran escala. Así, de incremento en incremento, se simula el secador continuo hasta que el contenido de humedad de pila final y, por ende, el fin del secador se alcanza.

Debe notarse que la temperatura observada de la muestra al final de un incremento es usada para calcular la temperatura de gas necesaria para el siguiente incremento.

Si es posible, la prueba debe llevarse a cabo usando las mismas dimensiones de pila y forma, velocidad del gas y patrón de flujo, como en la unidad a escala natural, de manera que el método de contacto de aire-sólidos pueda duplicarse lo más cercano posible. Cuando esto no es posible, debe mantenerse similaridad geométrica e hidrodinámica entre la prueba y la unidad de tamaño normal. (1)

Justificación:

El Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala cuenta con equipos para el estudio de las principales operaciones unitarias de Ingeniería Química. Dentro de estos equipos se encuentra el Secador Rotatorio que, por problemas de diseño, no puede operar adecuadamente y por lo tanto no ha sido usado en forma apropiada en el laboratorio. Debido a lo anterior el uso del Secador Rotatorio en prácticas de laboratorio se hace necesario con las modificaciones adecuadas.

Las prácticas a desarrollarse, una vez corregidos los errores de diseño serían:
Evaluar parámetros de operación, analogías de transferencia de masa y de calor y su influencia sobre capacidad, eficiencia y coeficientes de transferencia de masa y de calor del equipo.

Objetivos:

General:

Corregir problemas de diseño para poner en funcionamiento el Secador Rotatorio, haciendo las modificaciones y cambios necesarios, para que pueda ser usado como un equipo capaz de operar óptimamente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, con el propósito de que su manejo, por parte del operador, sea fácil, sencillo y confiable. Todo lo anterior, con el objeto de secar diferentes tipos de materiales sólidos granulados inorgánicos, tales como arena, cemento bentonita, cal, sal y otros.

Específicos:

- Realizar pruebas preliminares para determinar los errores de diseño.
- Rediseñar el sistema de secado, de tal forma que el Secador Rotatorio opere de la manera más eficiente y simple posible, para obtener la mejor eficiencia de secado.
- Cambiar la posición del ventilador, con el objeto de producir un flujo en contracorriente, que mejore el efecto de choque entre el material a secar y el medio de secado.
- Cambiar el tipo de quemador y su posición, acoplándolo al hogar (fuente de calor), con el objeto de conseguir un mejor contacto con el material a secar y así obtener un mejor aprovechamiento de la energía térmica (gas propano).
- Cambiar el separador ciclónico, con el propósito de evitar caídas de presión innecesarias, lo cual garantiza un flujo de aire constante y evita flujos de pistón.
- Cambiar el motor del sistema de alimentación de tornillo, para asegurar un suministro de material constante y uniforme.

Problema a Resolver:

Se encontró que los dos problemas críticos del equipo son el sentido de la circulación del aire y la localización de la fuente de calor.

Metodología:

1. Puesta en marcha del equipo para ser operado en sus condiciones originales: Dimensionamiento total del equipo, medición de voltajes de operación de motores, cambio de voltaje en los motores de rotación del tambor y ventilación, reinstalación de motores, elaboración del tablero de mando, instalación y prueba del tablero de mando y rectificación del sentido de la rotación de los motores de ventilación y rotación del tambor.
2. Realización de pruebas preliminares para determinar los errores del diseño original:
Puesta en operación del equipo para confirmar errores de diseño detectados por la observación de los hechos y para determinar la eficiencia del mismo.
3. Corrección de problemas de diseño en el equipo:
Cambiar el sentido de la circulación del aire para inducir el flujo en Contracorriente respecto de la alimentación, cambiar la posición de la fuente de calentamiento para inducir el flujo de calor en contracorriente también respecto de la alimentación.
4. Realización de pruebas con el equipo rediseñado:
Secado del material empleado en el paso o etapa 2, comparar los resultados con los obtenidos con el equipo en sus condiciones originales, evaluación del equipo al utilizar otro material y obtención de los parámetros necesarios para los cálculos de los balances de masa y de energía. Para la obtención de los parámetros anteriores se hizo uso de los siguientes instrumentos de medición: balanza, rotámetro de gas para medir el flujo de propano, psicrómetro para las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, anemómetro para medir la velocidad del aire, termómetros y termómetro de carátula para medir la temperatura del cono.

Resultados:

Modificaciones efectuadas de acuerdo al objetivo general:

Tabla 1: Corrección de problemas de diseño para poner en funcionamiento el Secador Rotatorio

Al corregir todos los errores de diseño y modificar a fondo el sistema de Mando Eléctrico (inexistente en el diseño original), mediante la elaboración, instalación y conexión de un Tablero de Mando para todas las funciones del secador, con jerarquía de operación y selección e indicador de funciones; se obtuvo un funcionamiento controlado, eficiente, sencillo y fácil de operar, con capacidad de secar diversos materiales, para alcanzar una eficiencia del 77% de remoción de kilogramos de agua por kilogramo de material, en comparación del 17% que se obtuvo con el diseño original. Por los resultados obtenidos, se considera que el diseño elegido, efectuado en el equipo, es el más apropiado para este tipo de secador, ya que pone en contacto directo a los tres elementos primarios, que participan en la operación de secado, como son el material a secar, el calor que eleva la temperatura, por medio del quemador, (fuente de calor) y el aire que atrapa el agua removida del material por medio del ventilador de circulación de aire, (medio de secado).

Modificaciones efectuadas de acuerdo a los objetivos específicos:

Tabla 2: Realización de pruebas preliminares para determinar los errores de diseño

De las pruebas preliminares que se realizaron en el equipo con el diseño original, se identificaron todos los errores que tenía, mismos que se describen a continuación:

- Posición invertida del quemador de gas propano (fuente de calor).
- Posición invertida del ventilador de circulación de aire (medio de secado).
- Rotación invertida del cilindro rotativo.
- Capacidad limitada del quemador de gas propano (fuente de calor).
- Capacidad escasa o muy limitada del separador ciclónico.
- Capacidad nominal incorrecta o equivocada del motor de la alimentación de material.
- Instalación de gas propano con una presión de trabajo inferior a la requerida por el equipo.
- Voltaje de operación de motores inapropiado (bajo voltaje).

Tabla 3: Rediseño del sistema de secado

Al rediseñar el sistema de secado, se tomaron en cuenta todos los errores de diseño, se corrigieron cada uno de ellos, al tomar en cuenta que el objetivo principal es el óptimo desempeño del secador.

- Se Cambió el voltaje de operación de los motores del ventilador y de rotación, pasándolos de 110 Voltios a 220 Voltios, mediante un cambio en la conexión eléctrica en los motores. La razón de este cambio es para que los motores trabajen con un Amperaje menor, lo cual se traduce en un funcionamiento menos forzado del motor y libre de sobrecalentamiento.
- Se cambio la rotación del cilindro, mediante un cambio en la conexión eléctrica del motor, con lo cual se permitió que el transportador dentro del cilindro rotativo, acarreara el material desde el punto de entrada hasta el punto de salida.
- Se colocó una nueva instalación de gas propano, con una presión de trabajo de 34473.79 Pa, que es la requerida por el nuevo quemador de gas del Secador Rotativo que permite una operación satisfactoria del mismo, siendo capaz de elevar la temperatura en la salida a 450 °C y en la entrada a 140 °C.

Tabla 4: Cambio de la posición del ventilador

Se cambió la ubicación del ventilador, trasladándolo de la salida a la entrada, poniéndolo directamente en el cono de entrada, ligeramente atrás del punto de alimentación, obteniéndose un magnifico resultado, ya que proporcionó, como se había previsto, un flujo en contracorriente que incrementa el contacto entre el material y el aire, se logra también, una distribución del calor uniforme a lo largo de todo el cilindro desde la salida hasta la entrada de material, con lo que se permite un óptimo intercambio de calor al material a secar.

Tabla 5: Cambio del tipo de quemador y de su posición para acoplarlo al hogar

Se cambió el quemador de gas propano, por uno con capacidad de quemar hasta 7.5 Kilogramos de gas por hora, a una presión de 5 PSIG y a un flujo de 13 Litros por minuto de gas; suficiente para alcanzar temperaturas arriba de 400°C. Dicho quemador se instaló dentro de un cilindro de hierro fundido, el que a la vez sirve de hogar y de soporte del quemador, y que permite tanto una buena mezcla de aire con el combustible, como la entrada de aire de circulación, forzado por el ventilador a través del cilindro del secador. Los resultados obtenidos fueron más que satisfactorios ya que dicho quemador fue capaz de elevar y mantener, la temperatura dentro del cilindro del secador, entre un rango de 450 °C donde el material esta saliendo y 140 °C donde el material entra y fuerza con esto a que el material entregue o suelte el 77% de la masa de agua de humedad inicial.

Tabla 6: Cambio del separador ciclónico

Se cambio el separador ciclónico por otro de mayor capacidad, ya que según se pudo determinar, no era de la capacidad que requiere este equipo, se acopló otro de dimensiones ya expresadas, el que funcionó satisfactoriamente, ya que logró atrapar el 93% de la partículas arrastradas por la circulación de aire, sin ponerle mayor resistencia a la circulación de aire, y sin que ahogue la llama del quemador.

Tabla 7: Cambio del motor del sistema de alimentación de tornillo

Se cambió el motor de la alimentación, ya que el que tenía instalado no correspondía con la capacidad requerida por el tornillo de alimentación, que es de 1/20 HP, al ser instalado el otro motor, el funcionamiento del tornillo de alimentación fue constante y uniforme y alimentó la misma cantidad durante todo el tiempo que se operó, entregó un promedio de 68 Libras por hora de material a 14 RPM. Se puede incrementar esta capacidad de alimentación de material, con solo incrementar la revoluciones del tornillo de alimentación, para lo cual lo único que se requiere es cambiar el engranaje del motor, por uno de mas dientes.

Resultados obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas usando piedra pómez como material de secado:

Tabla 8: Masa de agua de humedad removida por el Secador Rotatorio y eficiencia del mismo

Corridas	Masa de agua de humedad removida por el Secador Rotatorio	Eficiencia del Secador Rotatorio
1	0.0171 kg.	76.34 %
2	0.0172 kg.	76.79 %
3	0.017 kg.	75.89 %
4	0.0174 kg.	77.68 %
5	0.0173 kg.	77.23 %
6	0.01741 kg.	77.72 %
7	0.01713 kg.	76.47%
8	0.01708 kg.	76.25 %
9	0.01725 kg.	77.01 %
10	0.01731 kg.	77.28 %
Promedio	0.017218 kg.	76.87 %

Resultados obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas usando arena de río como material de secado:

Tabla 9: Masa de agua de humedad removida por el Secador Rotatorio y eficiencia del mismo

Corridas	Masa de agua de humedad removida por el Secador Rotatorio	Eficiencia del Secador Rotatorio
1	0.0042 kg.	77.78 %
2	0.00417 kg.	77.22 %
3	0.00421 kg.	77.96 %
4	0.00419 kg.	77.59 %
5	0.00423 kg.	78.33 %
6	0.00422 kg.	78.15 %
7	0.00418 kg.	77.41 %
8	0.0042 kg.	77.78 %
9	0.00416 kg.	77.04 %
10	0.00415 kg.	76.85 %
Promedio	0.004191 kg.	77.61 %

Resultados de los balances de masa y energía del equipo modificado operando con piedra pómez como material de secado:

Tabla 10: Resultados de los balances de masa

Corrida	1	2	3	4	5	6
1	3.60E-04	7.57E-02	5.30E-03	7.41E-02	2.55E-03	4.30E-03
2	3.60E-04	7.57E-02	5.29E-03	7.41E-02	2.55E-03	4.30E-03
3	3.60E-04	7.57E-02	5.29E-03	7.41E-02	2.53E-03	4.30E-03
4	3.59E-04	7.57E-02	5.30E-03	7.41E-02	2.54E-03	4.28E-03
5	3.58E-04	7.56E-02	5.31E-03	7.41E-02	2.54E-03	4.29E-03
6	3.58E-04	7.57E-02	5.29E-03	7.41E-02	2.54E-03	4.29E-03
7	3.60E-04	7.58E-02	5.30E-03	7.41E-02	2.55E-03	4.29E-03
8	3.60E-04	7.57E-02	5.30E-03	7.41E-02	2.55E-03	4.29E-03
9	3.60E-04	7.56E-02	5.30E-03	7.41E-02	2.55E-03	4.30E-03
10	3.60E-04	7.57E-02	5.30E-03	7.41E-02	2.55E-03	4.30E-03

Clave

1. Flujo de Propano entrando al secador en kg/s
2. Flujo de Aire Húmedo entrando en kg/s
3. Flujo de alimentación en kg/s
4. Flujo de gases de combustión en kg/s
5. Flujo de masa de agua de humedad abandonando el secador en kg/s
6. Flujo de material seco en kg/s

Tabla 11 : Resultados de los balances de energía

Corrida	1	2	3	4	5
1	11162.1861	81.2088213	5338.78776	132.765591	1879.46477
2	11162.1978	81.1806864	5338.77311	132.767056	1879.582
3	11162.1539	81.2099935	5338.87569	132.761195	1879.52339
4	11162.1099	81.2041321	5338.82586	132.731888	1879.50873
5	11162.2008	81.2047183	5338.90499	132.790502	1879.49408
6	11162.1685	81.2129243	5338.86689	132.787571	1879.43547
7	11162.1392	81.2050113	5338.85517	132.78464	1879.45012
8	11162.1187	81.2061836	5338.80242	132.78171	1879.4677
9	11162.1304	81.2070628	5338.79363	132.778779	1879.4765
10	11162.2272	81.2067698	5338.78483	132.769108	1879.48529

Clave:

1. Calor necesario para calentar el aire en Joule/s
2. Pérdidas de calor por agua generada en Joule/s
3. Pérdidas de calor por gases de combustión en Joule/s
4. Pérdidas de calor por masa de agua de humedad del aire en Joule/s
5. Pérdidas por radiación en Joule/s

Tabla 12 : Distribución porcentual del calor cedido por el gas propano

Corrida	1	2	3	4	5
1	59.3861085	0.43205478	28.4039189	0.70635194	9.99930459
2	59.3861709	0.43190509	28.4038409	0.70635973	9.99992828
3	59.385937	0.43206102	28.4043867	0.70632855	9.99961643
4	59.3857031	0.43202983	28.4041216	0.70617263	9.99953847
5	59.3861865	0.43203295	28.4045426	0.70648447	9.99946051
6	59.3860149	0.43207661	28.4043399	0.70646888	9.99914866
7	59.385859	0.43203451	28.4042775	0.70645329	9.99922662
8	59.3857499	0.43204075	28.4039969	0.70643769	9.99932018
9	59.3858122	0.43204542	28.4039501	0.7064221	9.99936695
10	59.3863268	0.43204387	28.4039033	0.70637065	9.99941373

Clave:

1. Calentamiento del aire (%)
2. Agua de combustión (%)
3. Gases de combustión (%)
4. Masa de agua de humedad del aire (%)
5. Pérdidas por radiación (%)

Tabla 13: Eficiencia Térmica del Secador Rotatorio

Descripción	Valor
Material con respecto al aire	22.98 %
Material respecto al propano	13.65 %

Tabla 14: Dimensiones del ciclón disponible

Hallado	Sugerido
$D_c = 0.46 \text{ m}$	D_c
$D_e = D_c/1.92$	$D_e = D_c/2$
$H_c = D_c/3.83$	$H_c = D_c/2$
$B_c = D_c/3.83$	$B_c = D_c/4$
$L_c = D_c/1.24$	$L_c = 2D_c$
$S_c = D_c/3.54$	$S_c = D_c/8$
$Z_c = D_c/1.24$	$Z_c = 2D_c$
$J_c = D_c/2.88$	$J_c = D_c/4$

Discusión de Resultados:

Comparación:

Al comparar los resultados obtenidos con el equipo modificado, frente a los que se obtuvieron con el equipo en sus condiciones originales, se puede apreciar que la eficiencia de remoción de agua del equipo rediseñado, se elevó a 77 % contra un 17 % que tenía originalmente o sea un 352.9 % más eficiente y se logró que el equipo sea capaz de remover hasta 5 veces más agua que en su estado inicial.

Las pruebas se realizaron con dos materiales distintos y se obtuvo en ambos casos, resultados bastante similares, por lo que la tendencia parece indicar que se observará el mismo patrón de remoción de agua con otros materiales granulados, especialmente con aquellos que presenten una mayor área de contacto con el medio de secado (aire caliente).

Diseño:

Por los resultados obtenidos en dichas pruebas, se puede confirmar que el arreglo o configuración en **Contracorriente** elegido para el rediseño del equipo, es el más adecuado al operar éste con el tipo de materiales granulados utilizados, frente al arreglo en paralelo que tenía inicialmente, esto por las siguientes razones observadas dentro del secador: Primero, se incrementó el contacto entre el material y el medio de secado, por la naturaleza misma de ataque entre los dos medios y el sentido de la circulación del aire y segundo, en la reubicación de la posición de la fuente de calor, se aprovechó la normal tendencia que poseen los gases de combustión, de ascender o fluir hacia arriba, con esto se logra distribuir el calor a lo largo de todo el cilindro, permitiendo que el material se calentara gradualmente conforme recorre el cilindro, observándose una buena transferencia de calor, tanto por convección como por radiación.

Es importante mencionar que con el arreglo en paralelo, la fuente de calor estaba en el mismo punto de la alimentación, lo que ocasionaba que el calor, por su misma naturaleza de fluir hacia arriba, no se distribuyera bien a lo largo del cilindro, obteniéndose por ende, una pobre eficiencia de remoción de humedad.

Operación:

Se logró una facilidad de operación del equipo con la introducción de un tablero eléctrico, con el que además de lo práctico de sólo oprimir botones, se tiene programado un orden jerárquico que no permite arrancar los distintos elementos en cualquier orden, sino con una secuencia preprogramada, teniendo primero que poner en marcha la circulación del aire, luego la rotación del cilindro y por último la alimentación del material a secar, misma que puede interrumpirse al terminarse el material, sin necesidad de apagar todo el secador.

Durante la operación del equipo, antes y después de las modificaciones, se detectaron varios problemas, además del problema a resolver, entre éstos se pueden mencionar la alimentación de materiales al equipo, la capacidad del ciclón y la presión de entrada del propano que proporciona el sistema de gas de la universidad. Respecto del ciclón original, se concluyó que no tiene las dimensiones adecuadas para manejar el flujo de aire del ventilador, ya que actuaba como una resistencia para la circulación del aire, o en pocas palabras como un tapón, lo que causaba que el calor se concentrara en la zona del quemador y no se distribuyera a lo largo del cilindro. Tal problema se corrigió al colocar un ciclón con las dimensiones adecuadas. Lo anterior puede comprobarse numéricamente al dividir el flujo volumétrico de aire entre el volumen de cada ciclón, así $(6.5129E-02 \text{ m}^3/\text{s})/8.212E-03 \text{ m}^3 = 7.94$ y $(6.5129E-02 \text{ m}^3/\text{s})/9.2879E-02 = 0.7$, estos cocientes indican el número de veces por segundo en que cada ciclón cambia su volumen, mientras un ciclón recicle su volumen en aire menos veces por unidad de tiempo tendrá una menor resistencia al paso de aire que se reflejará en una menor caída de presión, por lo tanto se puede apreciar la razón por la que el ciclón pequeño presentaba una mayor resistencia y la razón de emplear el ciclón grande, cuyas dimensiones se incluyen en la sección de Anexos y Resultados. En cuanto a la alimentación de materiales, se observó que el motor de la tolva se atascaba aun con pequeños volúmenes de material y hasta con materiales con buena fluidez, por lo que se sustituyó con un motor de mayor potencia. Finalmente, la presión de entrada del gas proporcionada por el sistema de propano de la universidad, no llegaba ni siquiera a 6894.76 Pascales de presión, consecuentemente el consumo de gas estaba limitado, y era el máximo flujo de propano $1.5E-04$ metros cúbicos por segundo, lo anterior se corrigió al colocar un regulador de presión que incrementó la presión de entrada del gas de menos de 6894.76 Pascales a 34473.79 Pascales y el flujo del mismo de $1.5E-04$ a $2.17E-04$ metros cúbicos por segundo.

Al analizar los resultados de los balances de masa y de energía, puede concluirse que son confiables, debido al número de corridas que los confirman, en cuanto al balance de masa los resultados indican que existe un grado de acumulación de material en el sistema ya que en el balance general, lo que está saliendo es ligeramente menor a lo que entra, aunque tal vez esto también se deba a que la humedad que entra con el aire, se determina indirectamente a partir de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire en la entrada del secador. Los resultados del balance de calor indican que un porcentaje significativo del calor se pierde en los gases de combustión, este calor perdido podría aprovecharse al recircular los gases de combustión calientes (constituidos en su mayoría por aire) para lograr así un mejor aprovechamiento energético y optimizar así la eficiencia del secador.

Los resultados de la eficiencia térmica del secador, indican que tal eficiencia es baja, pero los mismos se deben a las condiciones de operación y no a características de diseño del equipo. Lo anterior se corregiría al reducir el flujo de aire y secando un material mucho más húmedo, esto disminuiría el exceso de aire y por ende los gases de combustión.

Conclusiones:

1. Los cambios efectuados al equipo (cambio de la posición del ventilador y de la fuente de calentamiento para inducir flujo en contracorriente respecto de la alimentación de materiales) fueron los más adecuados, habiéndose obtenido los resultados esperados en materia de remoción de agua de humedad del producto a secar en condiciones óptimas y en un tiempo reducido de un minuto.
2. La eficiencia de remoción de agua de humedad del equipo rediseñado, se elevó a 77 % contra un 17 % que tenía originalmente o sea un 352.9 % más eficiente, al lograr que el equipo sea capaz de remover hasta 5 veces más agua que en su estado inicial.
3. Con el arreglo en paralelo, la fuente de calor (quemador de gas propano) estaba en el mismo punto de la alimentación, lo que ocasionaba que el calor, por su misma naturaleza de fluir hacia arriba, no se distribuyera bien a lo largo del cilindro, obteniéndose por ende, una pobre eficiencia de remoción de humedad.
4. Al analizar los resultados de los balances de masa y de energía, puede concluirse que son confiables, debido al número de corridas que los confirman, en cuanto al balance de masa los resultados indican que existe un grado de acumulación de material en el sistema ya que en el balance general, lo que está saliendo es ligeramente menor a lo que entra, aunque tal vez esto también se deba a que la humedad que entra con el aire, se determina indirectamente a partir de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire en la entrada del secador.
5. Los resultados del balance de calor indican que un porcentaje significativo del calor se pierde en los gases de combustión.
6. El calor perdido podría aprovecharse al recircular los gases de combustión calientes (constituidos en su mayoría por aire) con un mejor aprovechamiento energético y mejoría de la eficiencia del secador.
7. Los resultados de la eficiencia térmica del secador, indican que tal eficiencia es baja, pero los mismos se deben a las condiciones operación y no a características de diseño del equipo.

Recomendaciones:

1. Diseñar y elaborar un ducto y válvula de extracción para la recirculación del aire caliente; medio de secado para lograr un mayor aprovechamiento energético y mejorar la eficiencia de secado.
2. Se debe incrementar la presión de entrada del gas propano, (medio de calentamiento) a 68947.57 Pascales para lograr abastecer el consumo del quemador.
3. Para lograr un funcionamiento continuo y más seguro, es necesaria la instalación de un regulador automático de temperatura.
4. Se deberá instalar un sistema de control de llama que vigile el normal funcionamiento del quemador.
5. Se deberá instalar un separado de polvos (ciclón) de las dimensiones descritas en el plano correspondiente.

Bibliografía:

1. Sloan, C.E. , 1967. Revista Chemical Engineering, ejemplar de Junio. USA., pp 169-200.
2. Tsao, G.T. , 1967. Revista Chemical Engineering, ejemplar de Junio. USA., pp 201-214.
3. Treybal, Robert. 1988. Operaciones de Transferencia de Masa. 2da. Edición McGraw-Hill. México D.F., México. 858 pp.
4. McCabe, Warren, et al. 1991. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. 4ta Edición McGraw-Hill. México D.F., México. 1112 pp.
5. Perry, Robert H., 1973. Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill. 5ta. Edición. USA.

Anexos:

Datos obtenidos con el equipo en sus condiciones originales:

Tabla 15 : Datos del material de secado sin pasar por el equipo

Nombre del material de secado	Piedra Pómez
Peso de la muestra para análisis	0.1001 kg
Humedad de la muestra	0.0278 kg
Porcentaje de humedad	27.77 %

Tabla 16 : Datos del material secado en el equipo

Corridas	Peso de la muestra para análisis	Masa de agua de humedad remanente de la muestra	Porcentaje de humedad remanente
1	0.1002 kg	0.0242 kg	24.15 %
2	0.1 kg	0.0236 kg	23.60 %
3	0.1 kg	0.023 kg	23 %
4	0.1001 kg	0.023 kg	22.98 %

Tabla 17 : Humedad removida por el Secador Rotatorio y eficiencia del mismo

Corridas	Masa de agua de humedad eliminada por el Secador Rotatorio	Eficiencia del Secador Rotatorio
1	0.0036 kg	12.95 %
2	0.0042 kg	15.11 %
3	0.0048 kg	17.27%
4	0.0048 kg	17.27 %
Promedio	0.00435 kg	15.65%

Datos obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas:

Tabla 18: Datos del material de secado sin pasar por el equipo

Nombre del material de secado	Piedra Pómez
Peso de la muestra para análisis	0.1 kg
Humedad de la muestra	0.0224 kg
Porcentaje de humedad	22.4 %

Tabla 19 : Datos del material secado en el equipo

Corridas	Peso de la muestra para análisis	Masa de agua de humedad remanente de la muestra	Porcentaje de humedad remanente
1	0.1 kg	0.0053 kg	5.3 %
2	0.1 kg	0.0052 kg	5.2 %
3	0.1 kg	0.0054 kg	5.4 %
4	0.1 kg	0.005 kg	5 %
5	0.1 kg	0.0051 kg	5.1 %
6	0.1 kg	0.00499 kg	4.99 %
7	0.1 kg	0.00527 kg	5.27 %
8	0.1 kg	0.00532 kg	5.32 %
9	0.1 kg	0.00515 kg	5.15 %
10	0.1 kg	0.00509 kg	5.09 %

Datos obtenidos con el equipo con las modificaciones efectuadas si se usa arena de río como material de secado:

Tabla 20 : Datos del material de secado sin pasar por el equipo

Nombre del material de secado	Arena de Río
Peso de la muestra para análisis	0.1 kg
Humedad de la muestra	0.0054 kg
Porcentaje de humedad	5.4%

Tabla 21 : Datos del material secado en el equipo

Corridas	Peso de la muestra para análisis	Masa de agua de humedad remanente de la muestra	Porcentaje de humedad remanente
1	0.1 kg	0.0012 kg	1.2 %
2	0.1 kg	0.00123 kg	1.23 %
3	0.1 kg	0.00119 kg	1.19 %
4	0.1 kg	0.00121 kg	1.21 %
5	0.1 kg	0.00117 kg	1.17 %
6	0.1 kg	0.00118 kg	1.18 %
7	0.1 kg	0.00122 kg	1.22 %
8	0.1 kg	0.0012 kg	1.20 %
9	0.1 kg	0.00124 kg	1.24 %
10	0.1 kg	0.00125 kg	1.25 %

Datos de los balances de masa y energía del equipo modificado operando con piedra pómez como material de secado:

Tabla 22: Datos para el balance de masa

Descripción	Valor
Flujo de material saliendo	4.54E-03 kg/s
Flujo de propano	2.0E-04 m ³ /s
Densidad del aire	1.16207544 kg/m ³
Gravedad específica del propano	1.55
Temperatura de bulbo seco en la entrada de aire	21 °C
Temperatura de bulbo húmedo en la entrada de aire	19 °C
Humedad del aire de entrada	0.012857 kg Agua/kg Aire Seco
Velocidad del aire	6.858 m/s
Area de salida del flujo de aire	0.00950 m ²

Tabla 23: Datos para el balance de energía

Descripción	Valor
Cp para mezclas gaseosas	998.5525 J/kg °C
Cp para mezclas húmedas	1927.1196 J/kg °C
Temperatura del aire en la cámara	170 °C
Temperatura del cono	95 °C
Temperatura ambiente	23.33 °C
Calor de combustión del propano	93967061.33 J/m ³
Calor latente del agua a 95 °C	2270176 J/kg
Temperatura de salida del material	90 °C

Cálculo de muestra:

- Balance de masa:

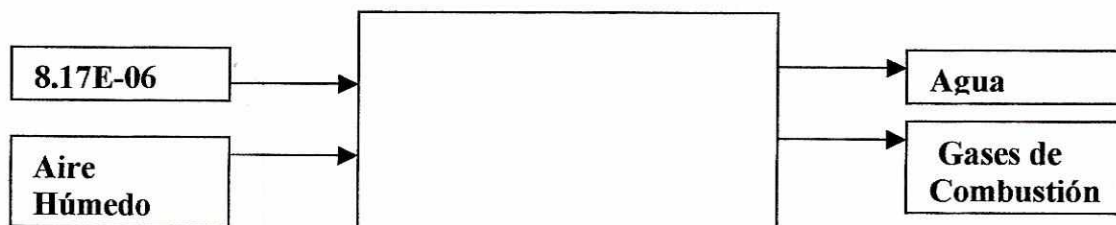
$$\text{Densidad del propano} = 1.16207544 \text{ kg/m}^3 \times 1.55 = 1.801216932 \text{ kg/m}^3$$

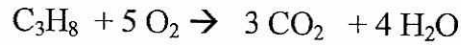
$$12 \text{ Lts/min} \rightarrow 0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$0.0002 \text{ m}^3/\text{s} \times 1.801216932 \text{ kg/m}^3 = 3.60 \text{ E-04 kg/s}$$

$$\text{Moles de propano entrando} = 3.60 \text{ E-04 kg/s} \times (1 \text{ mol kg}/44.09 \text{ kg de Propano})$$

$$\text{Moles de propano que entran por segundo} = 8.17\text{E-06}$$





Kilogramos de Agua por kilogramo de Aire seco en la entrada:

Con la temperatura de bulbo seco de 21 °C y la de bulbo húmedo de 19 °C, se obtiene por la carta psicrométrica: 0.012857 kg Agua/kg Aire Seco.

De lo anterior se tiene que el porcentaje de agua en la entrada es de 1.27 %

Flujo de aire que entra:

Area de salida del aire: 0.00950 m²

Velocidad del aire que entra: 6.858 m/s

Flujo volumétrico de aire: 0.00950 m² X 6.858 m/s = 0.065151 m³/s

Con la densidad del aire se tiene que el flujo másico es de 7.57E-02 kg/s

Flujo de aire seco: 0.9873 X 7.57E-02 = 0.07473861 kg/s

Flujo de agua que entra con el aire: 0.0127 X 7.57E-02 = 0.00096139 kg/s

Flujo molar de aire: 2.577E-03 mol/s

Flujo molar de agua que entra con el aire: 5.34 E-05 mol/s

Entradas:

Aire seco: 2.577E-03 mol/s del cual 21 % es oxígeno y 79 % es nitrógeno

Agua: 5.34 E-05 mol/s

Propano: 8.17E-06 mol/s

Salidas:

Agua de combustión: 8.17E-06 X 4 = 0.00003268 mol/s

Agua entrando con el aire: 5.34 E-05 mol/s

Agua evaporada: ((4.54E-03 kg/s)X (0.947))X((22.4/77.6)-(5.3/94.7)) = 1E-03 kg/s

CO₂ de la combustión: 8.17E-06 X3 = 0.00002451 mol/s

Oxígeno libre: 0.00054117 - 5 (8.17E-06) = 0.00050032 mol/s

Nitrógeno libre: 0.79(2.577E-03) = 0.00203583 mol/s

Flujo másico de gases de combustión secos (O₂, N₂ y CO₂):

CO₂ → 0.00107844 kg/s

O₂ → 0.01601024 kg/s

N₂ → 0.05700324 kg/s

Total → 0.07409192 kg/s

Agua que sale = Agua de Combustión + Agua por humedad del aire + Agua Evaporada

Agua que sale = (0.00003268 + 5.34 E-05 + 5.555E-05)x 18

Agua que sale = 2.55E-03 kg/s

Balance Total

Entradas	Salidas
3.60 E-04 kg/s de Propano	0.07409192 kg/s de Propano
7.57E-02 kg/s de Aire Húmedo	2.55E-03 kg/s de Aire Húmedo
5.30E-03 kg/s de Piedra Poma	4.30E-03 kg/s de Piedra Poma
Total 0.08136	Total 0.08094192

- Balance de energía:

Calor necesario para calentar el aire en J/s:

$$7.57E-02 \times 998.5525 \times (171 \text{ }^\circ\text{C} - 23.333 \text{ }^\circ\text{C}) = 11162.186$$

Pérdidas de calor por agua generada en J/s:

$$0.00058824 \times 1927.1196 \times (95 \text{ }^\circ\text{C} - 23.33 \text{ }^\circ\text{C}) = 81.21$$

Pérdidas de calor por gases de combustión en J/s:

$$0.07409192 \times 998.5525 \times (95 \text{ }^\circ\text{C} - 23.33 \text{ }^\circ\text{C}) = 5338.78776$$

Pérdidas de calor por humedad del aire en J/s:

$$0.0009612 \times 1927.1196 \times (95 \text{ }^\circ\text{C} - 23.33 \text{ }^\circ\text{C}) = 132.765591$$

Pérdidas de calor por radiación: Se asume 10 % del calor cedido por la combustión del propano:

$$0.10 \times [93967061.33 \text{ J/m}^3 \times 0.0002 \text{ m}^3/\text{s}] = 1879.46477\text{J/s}$$

Para la distribución porcentual del calor del propano, se divide cada fuente de pérdida o empleo de calor entre el calor de combustión del propano y se multiplica por cien

Eficiencia Térmica del secador:

Con respecto al propano:

$$ET = (A + B)/C \times 100$$

Donde:

A: Calor sensible de calentar el material

B: Calor latente del agua a la temperatura del cono

C: Calor cedido por la combustión del propano

$$A = 5.30E-03 \times (836.58) \times (90 \text{ }^\circ\text{C} - 23.33 \text{ }^\circ\text{C}) = 295.591481 \text{ J/s}$$

$$B = 1E-03 \times (2270176 \text{ J/kg}) = 2270.176 \text{ J/s}$$

$$C = 93967061.33 \text{ J/m}^3 \times 0.0002 \text{ m}^3/\text{s} = 18793.412266 \text{ J/s}$$

$$ET = 13.65 \%$$

La eficiencia térmica con respecto al aire se calcula de la misma manera.

- Separador Ciclónico:

Evaluación del ciclón original:

De las pruebas efectuadas en las condiciones originales, se pudo establecer, entre otras fallas, que el separador ciclónico original, ponía mucha resistencia a la circulación, al grado de que casi no permitía la circulación de aire, con lo que contribuía a una mala distribución de calor a lo largo del cilindro.

Se encontró que la mala circulación, se debía principalmente el diámetro del tubo de escape, que era muy reducido y provocaba una alta caída de presión, para la velocidad lineal de entrada al ciclón que era de unos 6 a 8 m/s. Determinada la causa, se procedió a efectuar el calculo de dicha caída de presión, que según Miller y Lissman, (Calculation of Cyclon Presure Drop), investigadores de ciclones obtuvieron la siguiente expresión:

$$\Delta P = K (Dc / De)^2$$

Donde K es una constante con De / Dc esté entre $1/4$ a $1/2$ y para la que hallaron un valor de 16, en medidas compatibles. Para $De/Dc = 6/16 = 3/8$ está dentro del rango

Dimensiones del Ciclón Original (ver Figura Ciclón)

	Hallado	Sugerido
$Dc = 0.16$ m Diámetro superior del Cilindro	$Dc = 16$	
$De = 0.06$ m Diámetro tubo de escape	$Dc/2.66$	$Dc/2$
$Hc = 0.12$ m Altura del tubo de entrada	$Dc/1.33$	$Dc/2$
$Bc = 0.05$ m Ancho del tubo de entrada	$Dc/3.20$	$Dc/4$
$Lc = 0.31$ m Altura del cilindro	$2Dc$	$2Dc$
$Sc = 0.03$ m Sección que excede a la entrada	$Dc/5.33$	$Dc/8$
$Zc = 0.31$ m Altura del cono	$2Dc$	$2Dc$
$Jc = 0.06$ m Diámetro del tubo de salida de polvo	$Dc/2.66$	$Dc/4$

Caída de Presión del ciclón original:

$$\Delta P = 16 (160 \text{ mm} / 60 \text{ mm})^2 = 16 \times 7.11 = 114 \text{ mm de Agua}$$

Adaptación de otro separador ciclónico:

Al determinar que el separador ciclónico original no era apropiado para este secador, se encontró otro de mayores dimensiones, cuyo diámetro del tubo de escape era 4 veces mayor que del ciclón original, $Dea / Deo = 24 / 6 = 4$, y se procedió luego a hacer los cálculos respectivos, para determinar si su caída de presión no iba a poner resistencia la circulación de aire.

Dimensiones del ciclón disponible

(ver Figura Ciclón)

		Hallado	Sugerido
Dc = 0.46 m	Diámetro superior del Cilindro	Dc = 46	
De = 0.24 m	Diámetro tubo de escape	Dc/1.92	Dc/2
Hc = 0.12 m	Diámetro del tubo de entrada	Dc/3.83	Dc/2
Bc = 0.12 m	Ancho del tubo de entrada	Dc/3.83	Dc/4
Lc = 0.37 m	Altura del cilindro	Dc/1.24	2Dc
Sc = 0.13 m	Sección que excede a la entrada	Dc/3.54	Dc/8
Zc = 0.37 m	Altura del cono	Dc/1.24	2Dc
Jc = 0.16 m	Diámetro del tubo de salida de polvo	Dc/2.88	Dc/4

Caída de presión del ciclón disponible:

$$\Delta P = 16 (460 \text{ mm} / 240 \text{ mm})^2 = 16 \times 3.67 = 59 \text{ mm de}$$

$$59 < 114$$

Al determinar que su caída de presión era un 52% menor, se procedió a efectuar la instalación de dicho ciclón, se observó que su función de separador de partículas era satisfactoria, ya que alcanzó una eficiencia de separación de un 93%, poniéndole muy poca resistencia a la circulación del aire.

PROPORCIONES DE UN CICLON

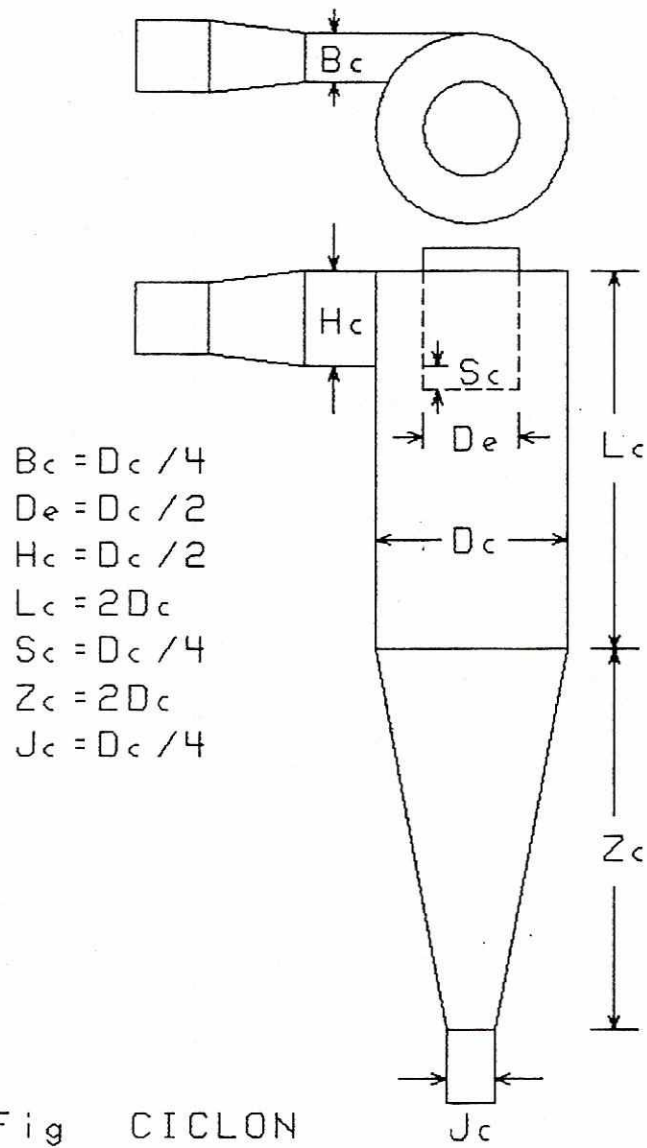
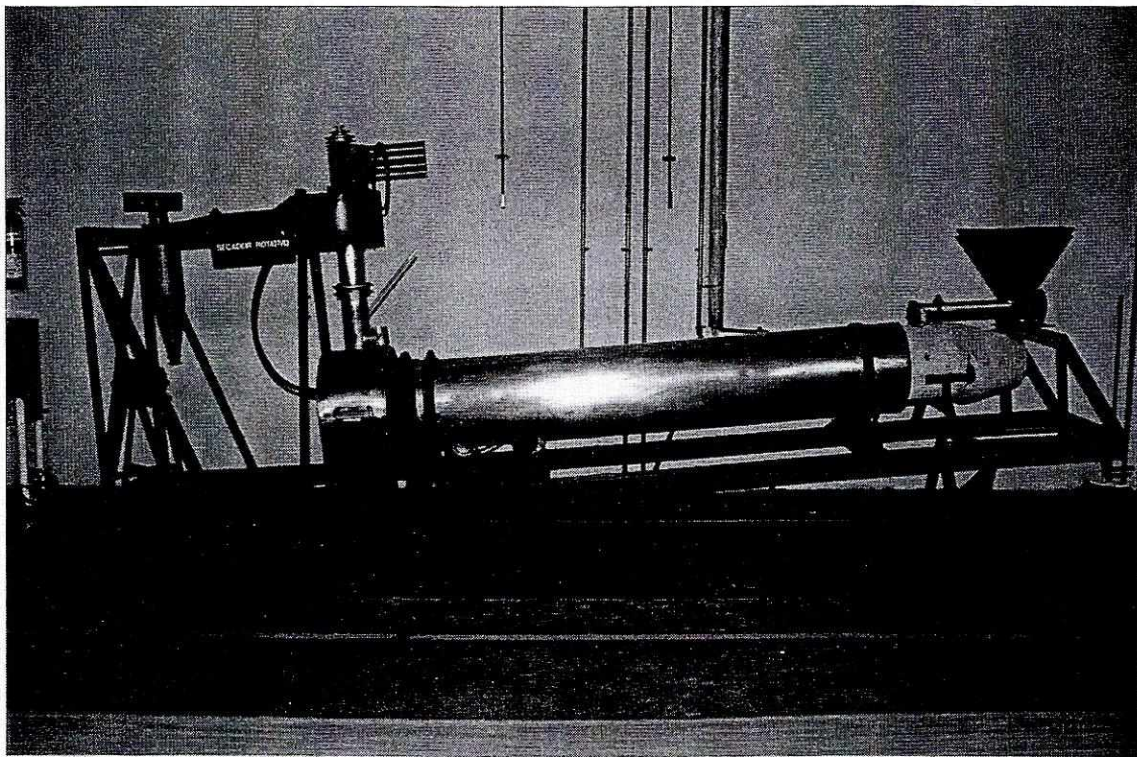
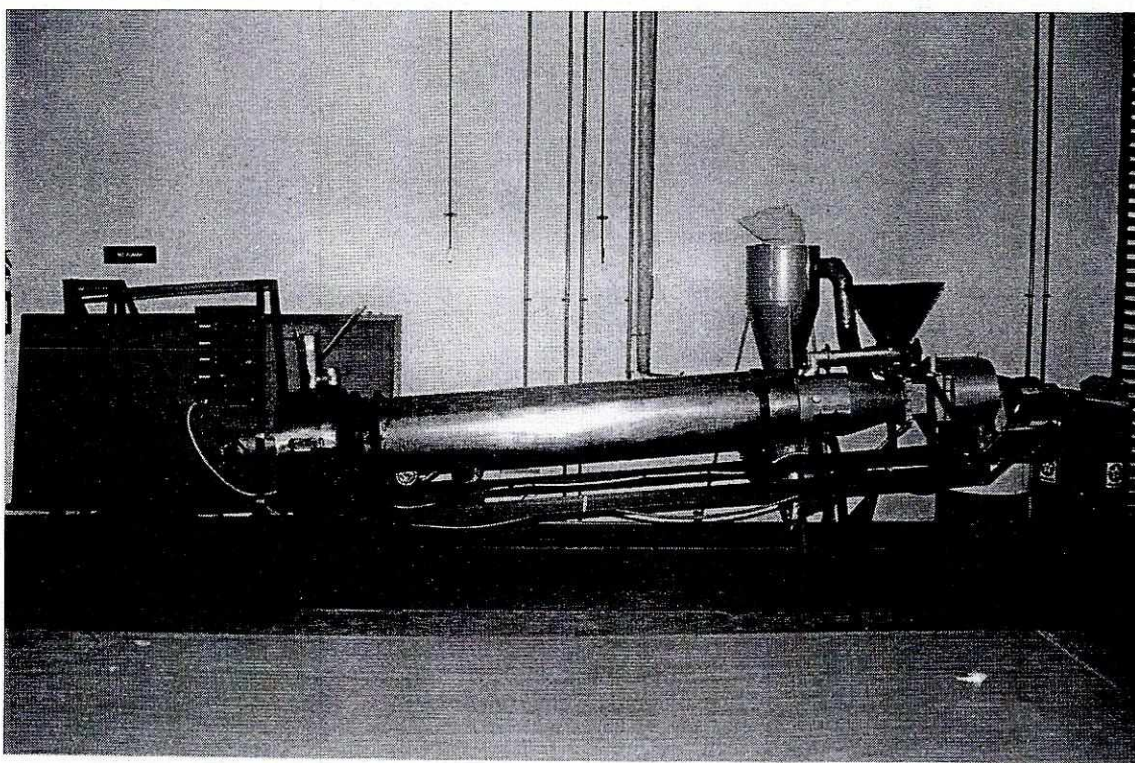


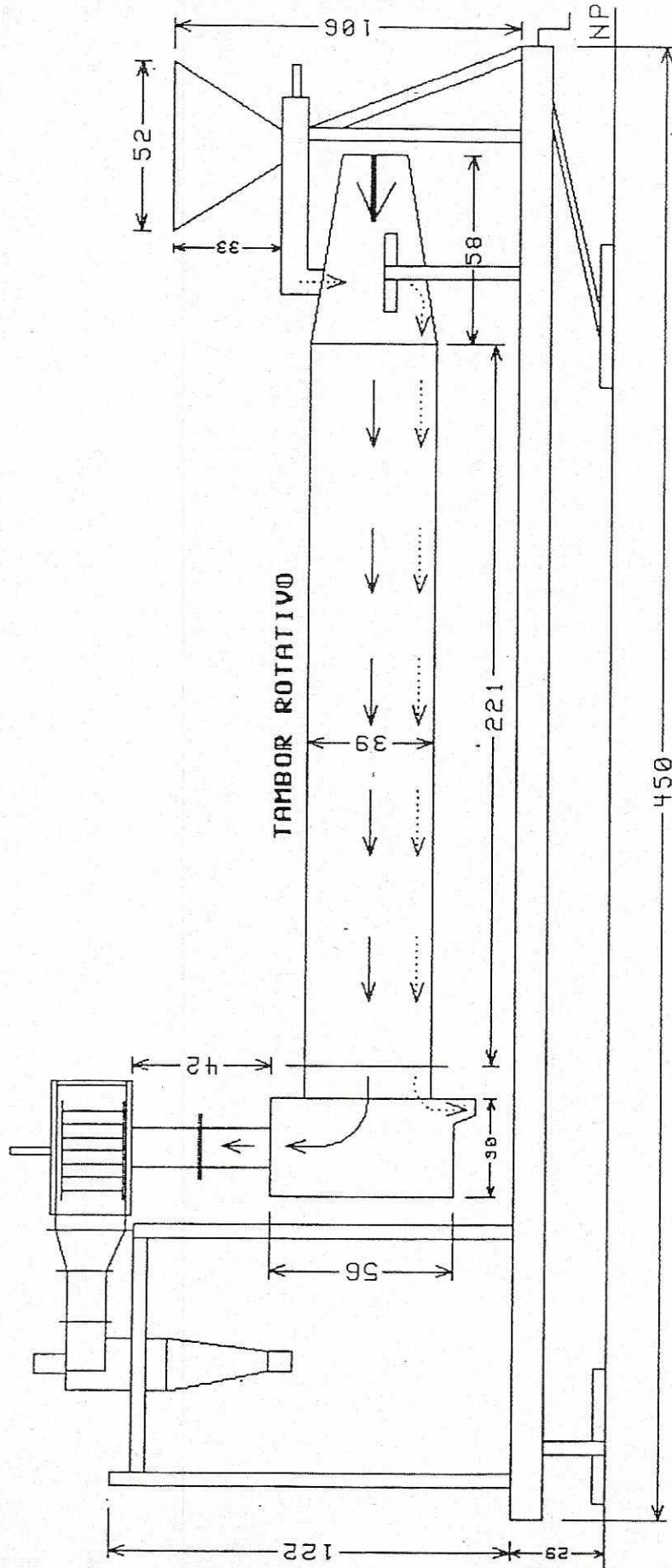
Fig CICLON

SECADOR ROTATORIO EN SUS CONDICIONES ORIGINALES



SECADOR ROTATORIO CON LAS MODIFICACIONES EFECTUADAS





UNIVERSIDAD DEL VALLE

PLANO I: ELEVACION

MEDIDAS EN: CENTIMETROS

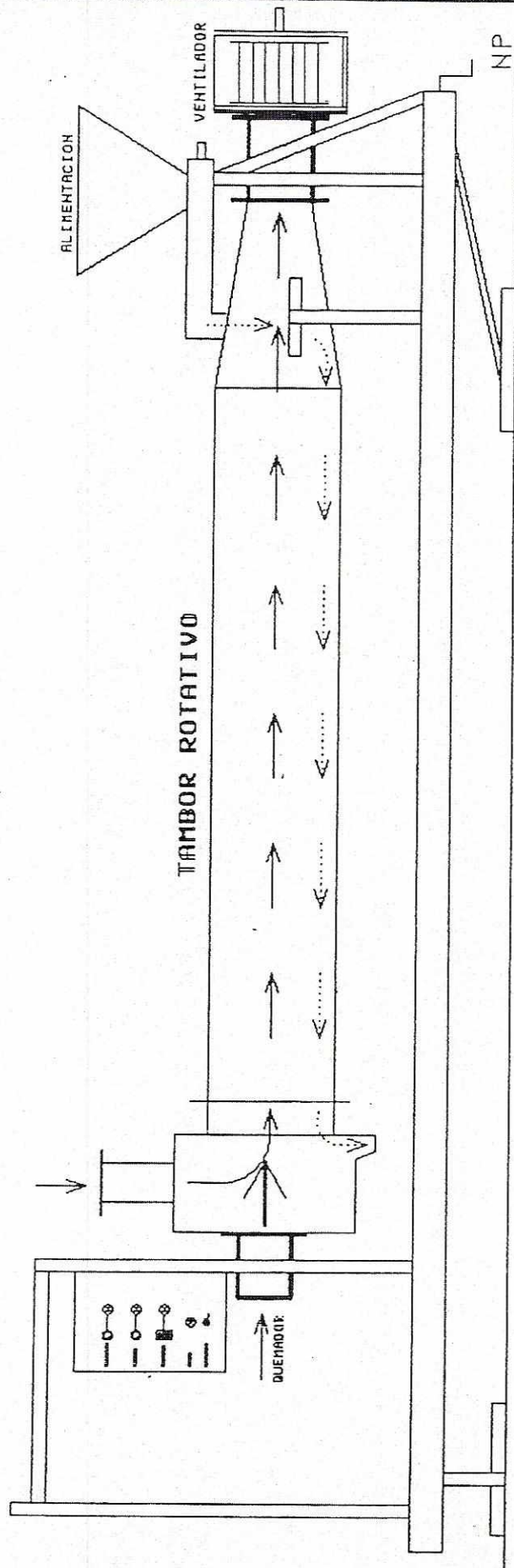
SECADOR ROTATIVO

DISEÑO ORIGINAL

ESCALA: 1 : 20

FECHA: 02-JUN-2000

ESTUD: OSCAR JIMENEZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE

SECADOR ROTATIVO

ESCALA: 1 : 20

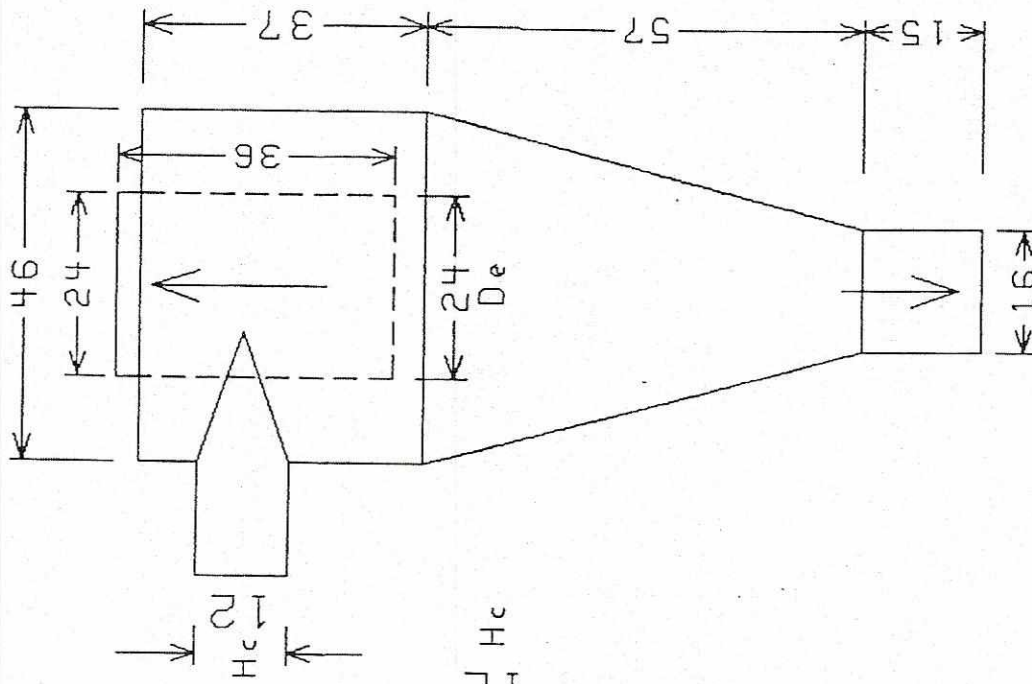
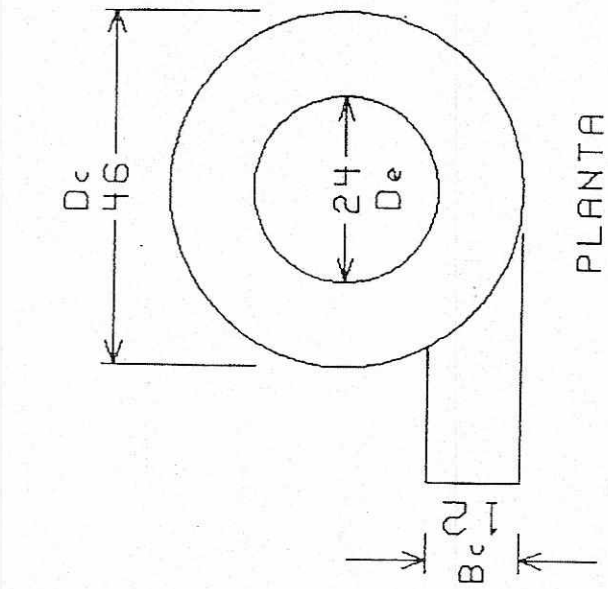
PLANO IV: ELEVACION

REDISEÑADO

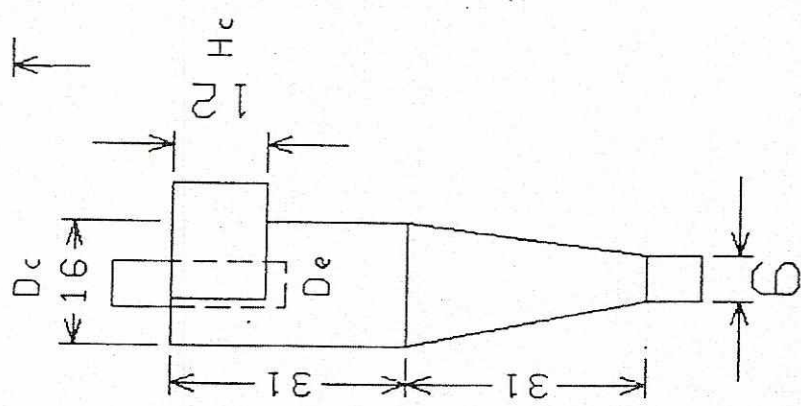
FECHA: 13/SEP/2000

CAMBIOS EFECTUADOS

ESTUD: OSCAR JIMENEZ

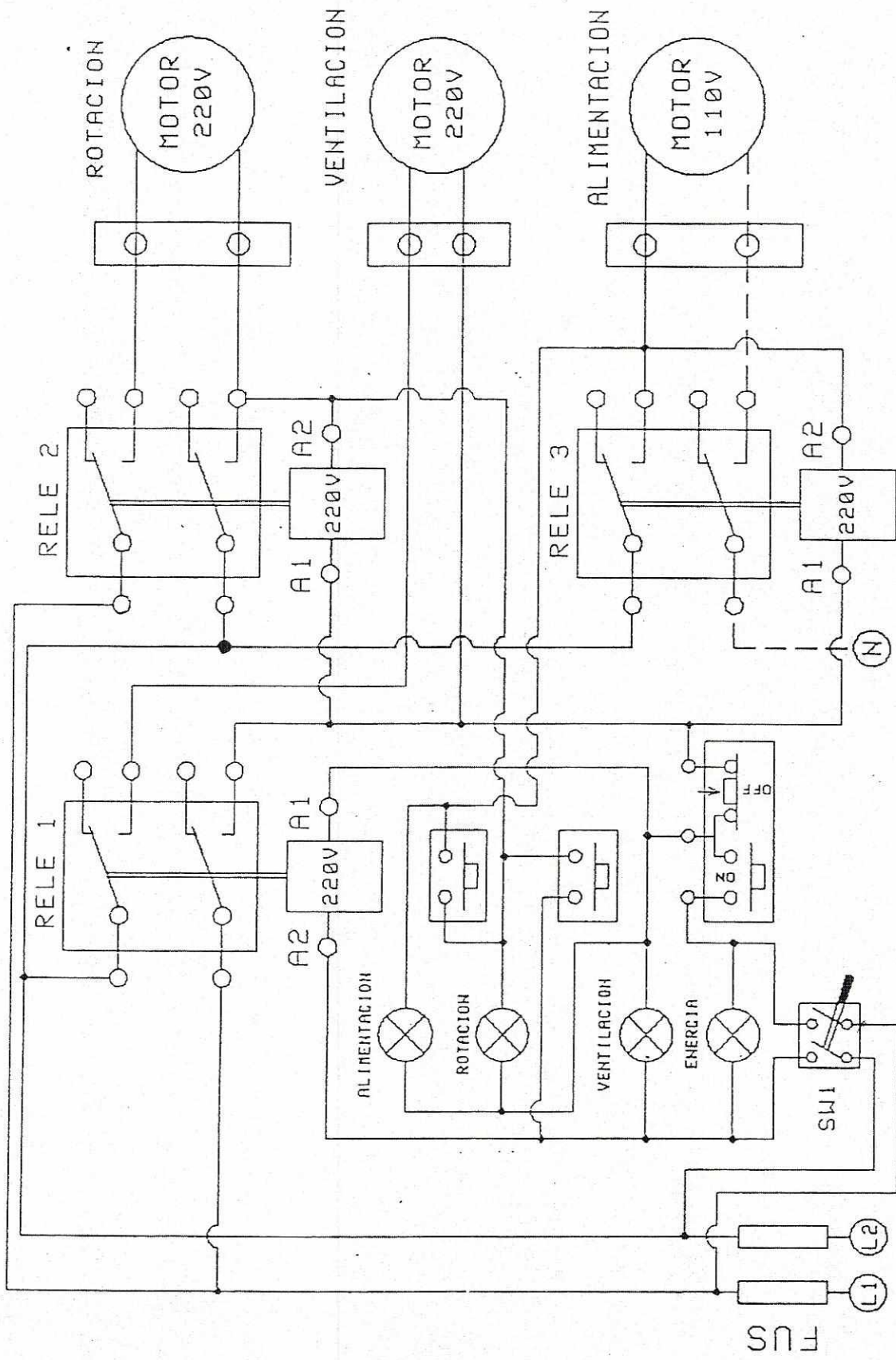


ADECUADO



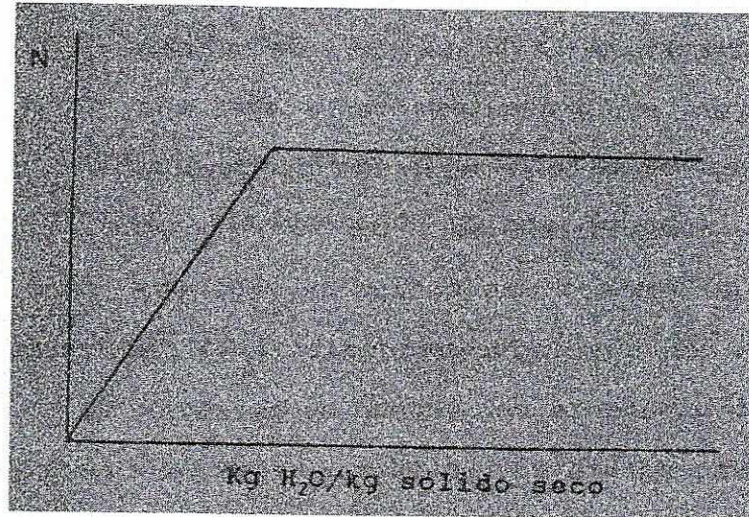
ORIGINAL

UNIVERSIDAD DEL VALLE	SECADOR ROTATIVO	FECHA: 06-SEP-2000
PLANO III: CICLON	SEPARADOR CICLONICO	ESTUD: OSCAR JIMENEZ
MEDIDAS-EN: CENTIMETROS		ESCALA: 1 : 10



UNIVERSIDAD DEL VALLE	TRABAJO DE GRADUACION	FECHA: 20-JUN-2000
PLANO II: ELECTRICO	DIAGRAMA CIRCUITO ELECTRICO	ESTUD: OSCAR JIMENEZ
DIASEROT	SECADOR ROTATIVO	

**CURVA DE RAPIDEZ DE SECADO EN FUNCION DE LA HUMEDAD
ABSOLUTA DE MATERIALES COMO LA PIEDRA POMA**



N = flux de secado, masa de humedad evaporada/tiempo(área)