

HORNO DE SECADO ROTATORIO

Hugo Flores, Facultad de Ingeniería Química, hflores@fiq.unl.edu.ar

Giuliana Francou, Facultad de Ingeniería Química, giulifrancou@hotmail.com

Fiorella Tell, Facultad de Ingeniería Química, fiorellabtell@hotmail.com

Eduardo Oto Gunst, Facultad de Ingeniería Química, egunst@fiq.unl.edu.ar

Gonzalo Galiano, Facultad de Ingeniería Química, ggaliano@fiq.unl.edu.ar

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo, diseño, construcción y puesta en marcha de un horno de secado rotatorio para estudiar los fenómenos de transferencia de energía y materia en el mismo.

Para tal fin se consideró que el equipo debía ser adecuado para desarrollar trabajos prácticos con estudiantes por lo cual no sólo debía ser confiable para la obtención de información experimental sino también debía satisfacer ciertas expectativas didácticas. Para ello se tuvieron en cuenta los parámetros geométricos del equipo e instrumental de medición necesario, adaptándose a las restricciones presupuestarias vigentes. Por esto último se utilizó la infraestructura existente en la facultad, como ser, parte de equipos en desuso, servicios e instrumental disponible.

También se llevaron a cabo experiencias preliminares a fines de determinar rangos y formas de operar, en lo relacionado a velocidades, temperaturas y sentido de circulación de las fases gas y sólido.

Como fruto del presente se incorporó al equipamiento de planta piloto de la Facultad de Ingeniería Química un equipo apto para ser utilizado en docencia, investigación y extensión, y se aprovechó la experiencia del proceso para formación y capacitación tanto de los estudiantes que participaron en la misma en carácter de pasantes, como para aquellos que cursan la asignatura Transferencia de Materia y Operaciones, en dicha facultad.

Palabras clave: *Secadero rotatorio, Operaciones, Enseñanza en Ingeniería.*

1. Introducción

El estudio de la operación unitaria secado es muy importante en la enseñanza de grado de las Ingenierías, ya que tiene mucha aplicación en las industrias de proceso. [1]

Cabe resaltar el carácter fundamentalmente empírico de la misma, ya que la mayoría de los cálculos de la misma se basan en información obtenida en forma experimental. [2]

De allí nace la importancia de contar en la planta piloto con equipamiento para poder llevar a cabo experiencias didácticas con los estudiantes de grado de las carreras de Ingeniería.

Por ello, y teniendo en cuenta la existencia en planta piloto de un secadero rotatorio en desuso, se decide revalorizarlo y ponerlo en funcionamiento y utilizarlo no solo en la enseñanza de grado de las carreras, sino también en proyectos de investigación y extensión al medio.

Teniendo en cuenta lo expresado, se convoca a una práctica extracurricular, en el marco de la reglamentación vigente, para llevar a cabo esta propuesta.

Las estudiantes seleccionadas, estudiantes de las carreras de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos y coautoras de este trabajo (Fiorella Tell y Giuliana Francou, respectivamente) llevaron a cabo el proceso de montaje, puesta a punto, y experiencias, procesaron la información y redactaron las conclusiones respectivas.

Esta tarea motivó el presente trabajo, que dio como resultado la incorporación de un equipo de escala semi industrial a la planta piloto, con lo que se mejoraron sustantivamente los procesos de enseñanza y de aprendizaje en las carreras de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral.

2. Materiales y Métodos:

2.1. Marco teórico:

2.1.1. Equipos de secado:

La operación de secado es muy importante en varios procesos industriales. Las razones para secar un material son diversas, las más comunes son asegurar la calidad y preservación de un producto. Dentro de los múltiples métodos empleados, el uso de hornos de secado rotatorios es una buena alternativa, debido a que brinda una buena área de contacto fluido - partícula y buenos coeficientes de transferencia [3], [4].

Es por ello, que el aprendizaje de los conceptos teóricos, así como de las ecuaciones de cálculo y su correcta utilización, como de los criterios prácticos involucrados en los procesos de diseño, simulación y obtención de información experimental, es de importancia en el proceso de aprendizaje por parte de los alumnos de las carreras de Ingeniería.

Los hornos de secado rotatorios se clasifican como directos, indirectos y especiales. Estos nombres se refieren al método de transmisión de calor, que es directa cuando ésta se realiza por intercambio entre el sólido y el gas de arrastre, e indirecta cuando el medio de calentamiento no tiene un contacto físico con los sólidos y se separa de ellos por medio de una superficie de intercambio. En el presente trabajo se tratará solamente aquellos equipos totalmente directos.

Los equipos de calentamiento directo se dividen en dos categorías, de acuerdo a los métodos utilizados para diseñar los mismos. Algunos se basan en la información experimental de coeficientes de transferencia de masa y otros en utilizar coeficientes de transferencia de calor. En base a ello se los puede denominar en "procesos por transferencia de masa" a los primeros y "procesos por transferencia de calor" a los segundos. Es importante acotar que se pueden utilizar datos de coeficientes de transferencia de calor para diseñar los primeros, pero el camino inverso no es válido porque al extraer datos de coeficientes de transferencia de masa se desprecian los efectos de transferencia de calor por radiación que son importantes en los segundos.

En cualquiera de los dos métodos, es importante la obtención de información experimental para el diseño y simulación de los secaderos.

2.1.2. Ecuaciones de cálculo:

El procedimiento comprende el cálculo del diámetro y longitud del secadero, por ser los parámetros principales que definen las características del mencionado equipo, obviando otros como ser la inclinación del secadero, tiempo de retención del sólido dentro del mismo, etc. No obstante eso, se evaluará la influencia de estas variables en el desarrollo del presente trabajo [1], [5]

Se utilizarán para tal fin las ecuaciones usuales para este tipo de operación, como ser:

- Balance de materia
- Balance de energía
- Datos obtenidos de experiencias
- Equilibrio
- Ecuación de transferencia

Se efectuarán las suposiciones habituales en esta operación, como ser:

- No existen pérdidas de calor al medio ambiente.
- La transferencia de calor se lleva a cabo únicamente entre el gas y el sólido.

Se muestran las ecuaciones utilizadas para el tratamiento teórico de estos equipos.

Balance de materia (ecuación 1)

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (Y'_1 - Y'_2) \quad (1)$$

Balance de energía (ecuación 2)

$$S_s \cdot H'_{s1} + G_s \cdot H'_{g2} = S_s \cdot H'_{s2} + G_s \cdot H'_{g1} \quad (2)$$

Entalpía del sólido (ecuación 3)

$$H'_s = c_s (t_s - t_0) + X C_A (t_s - t_0) + \Delta H_A \quad (3)$$

Entalpía del gas (ecuación 4)

$$H'_G = C_s (t_G - t_0) + Y' \lambda_0 \quad (4)$$

Caudal másico superficial de gas (ecuación 5)

$$G'_s = v_g \cdot v_h \quad (5)$$

Caudal de gas (ecuación 6)

$$G_s = s_f G'_s \quad (6)$$

Longitud del equipo (ecuación 7)

$$z = H_{toG} \cdot N_{toG} \quad (7)$$

Altura de unidad de transferencia (ecuación 8)

$$H_{iOG} = G'_S \cdot C_S / (U \cdot a) \quad (8)$$

Número de unidades de transferencia (ecuación 9)

$$N_{iOG} = \Delta t'_G / \Delta t_m \quad (9)$$

Calor húmedo del gas (ecuación 10)

$$C_S = 1005 + 1884 \cdot Y' \quad (10)$$

Correlación para evaluar $U \cdot a$ (ecuación 11) [1]

$$U \cdot a = (237 \cdot G'^{0,67}) / T_D$$

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

G_S : Caudal de sólido seco (kg sólido seco/h)

X_1 : Humedad del sólido al ingreso al equipo (kg agua/kg ss)

X_2 : Humedad del sólido a la salida del equipo (kg agua/kg sólido seco)

G_S : Caudal de aire seco (kg aire seco/h)

Y'_1 : Humedad del aire a la salida al equipo (kg agua/kg aire seco)

Y'_2 : Humedad del aire al ingreso del equipo (kg agua/kg aire seco)

H'_{S1} : Entalpía del sólido al ingreso del equipo (kcal / kg. sólido seco)

H'_{S2} : Entalpía del sólido a la salida del equipo (kcal / kg. sólido seco)

H'_{G1} : Entalpía del gas a la salida al equipo (kcal / kg. aire seco)

H'_{G2} : Entalpía del gas al ingreso del equipo (kcal / kg. aire seco)

c_s : Capacidad calorífica del sólido seco (kcal / kg sólido seco . °C)

C_A : Capacidad calorífica de la humedad (agua), como líquido (kcal / kg. agua. °C)

t_s : Temperatura del sólido (°C)

t_o : Temperatura de referencia (°C)

ΔH_A : Calor integral de humidificación (o de adsorción, hidratación o solución), con referencia al líquido y sólidos puros, en t_o (kcal / kg. sólido seco)

C_S : Calor húmedo del gas (kcal aire/ kg aire seco. °C)

t_G : Temperatura del gas (°C)

λ_o : Calor latente de evaporación evaluado a t_o (kcal/ kg)

s_f : Sección de flujo para la corriente gaseosa (m²)

v_g : Velocidad del gas (m/hora)

v_h : Volumen húmedo del gas (m³ / kg aire seco)

G'_S : Caudal másico superficial de aire seco (kg aire seco/h.m²)

z : Longitud del secadero (m)

H_{toG} : Altura de unidad de transferencia en fase gaseosa (m)

N_{toG} : Número de unidad de transferencia en fase gaseosa

U : Coeficiente global de transferencia de calor (kcal/ h . m² . °C)

a :Superficie interfacial específica del sólido (m² sup. de interfase / m³ volumen lecho de secado)

$\Delta t'_G$: Variación de temperatura en el gas debido a la transferencia de calor únicamente hacia el sólido (°C)

Δt_m : Diferencia de temperatura promedio entre el sólido y el gas (°C).

T_D : Diámetro exterior del secadero (m)

2.1.3. Equipo utilizado:

El secadero rotatorio consiste en un cilindro que gira sobre cojinetes apropiados y, por lo común, tiene una leve inclinación en relación con la horizontal. La longitud del cilindro varía de cuatro a diez veces su diámetro, que oscila desde aproximadamente 30 cm. hasta más de 3 m. Los sólidos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro, y se descargan por el otro extremo como producto terminado. Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad del movimiento de los sólidos, según que la circulación del gas sea a contracorriente o cocomorriente con la circulación de los sólidos.

El equipo objeto del presente trabajo tiene las siguientes dimensiones:

Longitud total: 3,30 m.

Longitud efectiva de transferencia: 2,89 m.

Diámetro exterior: 0,30 m.

Diámetro interior: 0,295 m.

Sección de flujo del gas en el equipo: 0,06835 m²

Seis baffles de 0,06 m. de alto cada uno

2.2. Procedimiento experimental:

2.2.1. Montaje y puesta en marcha del equipo:

Se realizó un relevamiento completo de las partes del equipo, a partir de este se analizó que piezas faltaban y cuáles deberían ser sustituidas por otras en mejores condiciones.

Posteriormente se llevaron a cabo las modificaciones y adecuaciones necesarias, por razones operativas, teniendo en cuenta el espacio disponible, conexión a servicios auxiliares, etc.

Se trabajó en los dispositivos de aireación, calentamiento del gas, recolección de polvo, conexión de servicios (electricidad, aire comprimido, gas natural), y se le agregó una capa de material aislante, a los fines de cumplir con las hipótesis formuladas en el planteo teórico (sistema adiabático).

Una vez finalizadas esas actividades, se montó el equipo y se llevaron a cabo experiencias preliminares, a los fines de familiarizarse con el mismo y definir las condiciones límites de operación, en relaciones a caudales y temperaturas de gas y de sólido, velocidad de rotación del tambor, inclinación del mismo, etc.

2.2.2. Experiencias llevadas a cabo:

Se realizaron ensayos variando la velocidad de giro del tambor mantenido constante el caudal de alimentación, y luego variando el caudal de alimentación.

Durante las mismas se relevó la siguiente información: Caudal de alimentación, temperaturas y humedades de ingreso y de salida de sólido, velocidad, temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo de ingreso y de salida del gas, velocidad de giro del tambor. El material procesado fue yeso pulverizado

3. Resultados y Discusión:

3.1. Resultados

Se indica en la Tabla 1 un resumen de las determinaciones relevadas en las experiencias llevadas a cabo:

Tabla 1. Resumen de resultados obtenidos en experiencias

	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3
Caudal de sólido (kg/h)	25	20	40
Temperatura de ingreso sólido (°C)	20	22	20
Humedad de ingreso sólido (% m/m)	18,1	27,8	28,5
Temperatura de salida sólido (°C)	61	60	66
Humedad de egreso sólido (% m/m)	13,2	17,8	22,4
Velocidad promedio gas (m/s)	0,557	0,560	0,670
Temperatura de ingreso gas (°C)	93	94	90
Temperatura de bulbo húmedo ingreso gas (°C)	33	32	33
Temperatura de egreso gas (°C)	45	38	36
Temperatura de bulbo húmedo egreso gas (°C)	34	34	32
Velocidad de rotación del tambor (rpm)	8	16	8

Fuente: Elaboración propia

3.2. Evaluación de resultados:

Con los valores obtenidos de temperaturas de ingreso y de egreso de gas, se obtienen las humedades de entrada del mismo a través del diagrama psicrométrico, con el caudal de sólido y humedades de ingreso y egreso del mismo, utilizando la ecuación (1) se puede obtener el caudal de gas.

Por otra parte, utilizando la velocidad del gas determinada experimentalmente, y mediante la ecuación (5) se puede evaluar el caudal másico superficial de aire, y

mediante la ecuación (6) obtener un nuevo valor de caudal másico superficial y comparar ambos valores.

Con la ecuación (9) se obtiene el Número de Unidades de Transferencia de la fase gaseosa (N_{toG}); con la ecuación (7) la Altura de Unidad de Transferencia de la fase gaseosa (H_{toG}) y con la ecuación (8) el valor de U.a; el mismo se compara con el obtenido a partir de una correlación (ecuación 10).

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 2

Tabla 2. Resumen de resultados obtenidos

	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3
Caudal de gas (kg as /h) (1)	103,2	113,6	149,9
Caudal másico superficial de gas (kg as /seg m ²) (5)	0,558	0,561	0,680
Caudal de gas (kg as /h) (6)	137,3	139,0	168,48
N_{toG} (9)	1,693	2,26	2,74
H_{toG} (m) (7)	1,707	1,28	1,06
U. a (8) (kcal/ h . m ² . °C)	403,56	449	650.8
U. a (10) (kcal/ h . m ² . °C)	534,40	536,33	610,11

Fuente: Elaboración propia

3.3. Discusión de resultados

El cálculo del caudal de gas se llevó a cabo por dos vías diferentes; el primer valor utilizando la ecuación del balance de energía; el segundo valor, con la velocidad de gas determinada experimentalmente; se observa diferencia entre los mismos, causada probablemente por no cumplirse la hipótesis de sistema adiabático, y adquirir importancia las pérdidas al ambiente.

Esta discrepancia es razonable, y puede servir al estudiante para analizar el comportamiento del sistema, al obtener el valor de una variable por distintas vías; eso le permite evaluar porque se produce esa discrepancia, y verificar la validez de las conclusiones obtenidas.

En relación a un valor importante, como lo es el valor del producto U . a, se observa en primer lugar que varía con el caudal másico superficial del gas, aunque en una proporción mayor que la predicha en el modelo teórico (ver experiencias 1 y 3).

Se puede observar una discrepancia razonable entre los valores obtenidos experimentalmente y los predichos con la correlación; esto puede originarse a que la misma ha sido desarrollada para equipos que no coinciden exactamente con las características geométricas del dispositivo estudiado,

También hay una variación con la velocidad de rotación del tambor, produciendo una ligera mejora en el valor del mismo (ver experiencias 1 y 2).

Se concluye del análisis de los resultados, que la unidad en estudio es apropiada para relevar información experimental, por lo tanto para fines de docencia, investigación y servicios.

4. Conclusiones y recomendaciones:

Como resultado de este trabajo, se puso en funcionamiento un secadero en desuso, contando con un presupuesto y espacio limitado, lo que posibilitó incorporar a la planta piloto de la Facultad de Ingeniería Química un equipo que puede ser utilizado no solamente para fines didácticos, sino también para investigación, y extensión, tanto educativos como de asistencia técnica.

Además, sirvió para fines didácticos, tanto en lo relacionado con el personal docente de la asignatura involucrada, y el responsable de la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería Química, como con los estudiantes de la misma.

En relación al personal docente, la participación en las distintas etapas sirvió para adquirir experiencia en el manejo de este equipo por un lado, e incorporar a la asignatura Transferencia de Materia y Operaciones un equipo nuevo, y otro trabajo práctico en su curricula.

En cuanto a las estudiantes co autoras de este trabajo, y que llevaron a cabo una práctica extracurricular de acuerdo a la reglamentación vigente de la Facultad de Ingeniería Química, les sirvió para afianzar los conceptos teóricos prácticos recibidos en el cursado, aprendiendo técnicas de trabajo que podrán usar en un futuro desempeño profesional, usando los recursos y materiales con que se disponía.

En la práctica extracurricular se llevaron a cabo distintas actividades para poder acondicionar un secadero rotatorio que no funcionaba, con lo que ejercitaron la práctica de tomar decisiones ingenieriles, y también utilizar distintas herramientas, como soldadora, amoladora, plasma, con sus respectivos elementos de seguridad.

Con relación a los estudiantes que cursan la asignatura mencionada, se va a implementar para los mismos, un nuevo trabajo práctico, a los fines de ampliar el conocimiento de equipos muy utilizados en la industria. Esa nueva experiencia didáctica le va a permitir compara los resultados obtenidos en forma teórica con los experimentales; y a la vez obtener resultados empíricos para el diseño y simulación de nuevas situaciones con diferentes productos. Cabe mencionar que la cátedra cuenta entre sus herramientas didácticas con un software educativo para el diseño de un secadero rotatorio producido por dos docentes de la misma, y que es utilizado durante el cursado [6]

No obstante eso, se han llevado a cabo visitas a la planta donde los estudiantes tuvieron oportunidad de ponerse en contacto con el equipo durante las distintas instancias de montaje, adecuación, familiarización con el mismo, experiencias previas, etc.

Esto sirvió no solo como refuerzo de los conceptos teóricos de esta asignatura, sino para el de otras vinculadas con la currícula de las carreras, como Transferencia de Cantidad de Movimiento y Operaciones, Transferencia de Energía y Operaciones,

Finalmente, los buenos resultados alcanzados motivaron al personal docente de la asignatura y de Planta Piloto a llevar a cabo una experiencia similar, por la cual se recuperará y refuncionalizará un equipo de contacto continuo gas sólido para llevar a cabo experiencias didácticas en esta asignatura, y las de Transferencia de Cantidad de Movimiento y Operaciones, y de Transferencia de Energía y Operaciones.

5. Referencias

- [1] TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de transferencia de masa*. Madrid. Ed. Mc Graw Hill
- [2] COOK, E.; DU MONT, H.; *Process drying practice*; New York. Ed. Mc Graw Hill
- [3] PERRY, R.; GREEN, D.; MELANCY, J.; (2001); *Manual del Ing. Qco. Vol II*; New York. Ed. Mc Graw Hill
- [4] MUJUMDAR., A.; *Principles and fundamentals of drying*; Londres. Ed. Hemisphere Publishing Company
- [5] PERSONAL DOCENTE ASIGNATURA TRANSFERENCIA DE MATERIA Y OPERACIONES (2014); *Diseño y cálculo de secadero rotatorio con ejemplo de cálculo*. Entorno virtual Facultad de Ingeniería Química.
- [6] PARODI, C.; FLORES, H.; (2000); *Secadero rotatorio – Software para aprendizaje y cálculo*. Bahía Blanca; Tercer Congreso Argentino de enseñanza de la Ingeniería. Publicado en actas.

6. Anexos

6.1. Guía de Trabajos Prácticos de ensayo de Secado en Secadero Rotatorio

Objetivos:

- Capacitar al estudiante en la operación de un secadero continuo rotatorio a escala piloto en condiciones de alta temperatura.
- Relevar la instalación a los fines de obtener las dimensiones y características de funcionamiento de la misma.
- Relevar toda la información necesaria para un diseño industrial, tanto como condiciones del sólido, del gas y coeficientes de transferencia
- Comparar la información obtenida con la disponible en bibliografía

Técnica operatoria:

El estudiante llevará a cabo un relevamiento de la instalación y confeccionará un croquis a mano alzada del equipo, con sus dimensiones.

Posteriormente pondrá en marcha el mismo, operando hasta alcanzar el estado de régimen, cuando se nota constancia de las variables en función del tiempo.

Luego se releva toda la información experimental necesaria y se procede a llevar a cabo los cálculos necesarios. Se repite la experiencia modificando las condiciones preparativas por ejemplo velocidad del gas, caudal de sólido, velocidad de rotación, etc.

Finalizada la experiencia, se procesa toda la información obtenida y se obtienen las conclusiones pertinentes

Determinaciones y cálculos:

De la experiencia se obtiene:

- Diámetro y longitud del secadero
- Caudal de alimentación del sólido
- Temperaturas de ingreso y egreso de las corrientes de proceso
- Velocidad del gas en el equipo

Con las ecuaciones de balance de materia y de energía (ecuaciones 1 y 2) se calcula el caudal de gas; con los valores de temperatura determinados experimentalmente se evalúa el Número de Unidades de Transferencia de la fase Gaseosa (ecuación 9).

Como se conoce la longitud del equipo, se puede obtener a partir de la ecuación 7 la Altura de Unidad de Transferencia de la fase Gaseosa.

Paralelamente se puede obtener el caudal másico superficial del gas; como se conoce la sección de flujo del equipo, el caudal másico del gas, la velocidad del mismo, y las temperaturas y humedades de entrada y salida, el estudiante puede obtener este valor por dos caminos distintos, lo que le da oportunidad para comparar ambos resultados y analizar la validez de algunas hipótesis formuladas en el procedimiento de cálculo.

Completada esta instancia, se procede a evaluar el valor del producto $U \cdot a$ (ecuación 8)

La metodología de cálculo se repite para las distintas modificaciones de condiciones de operación

Informe final:

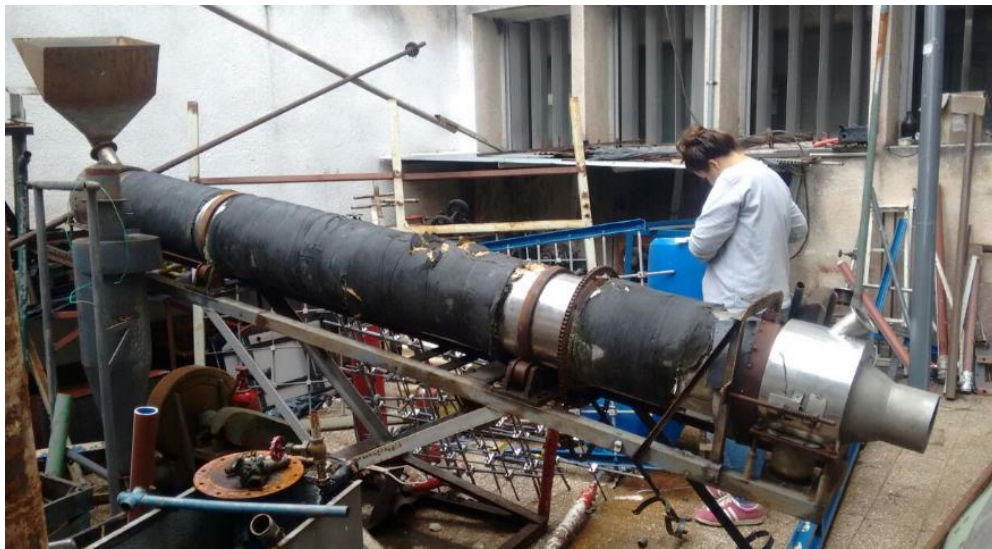
Como conclusión de la experiencia, el estudiante debe elevar un informe donde debe constar la siguiente información:

- Objetivo de la experiencia.
- Breve descripción de los principios teóricos, técnicas experimentales, bibliografía, etc.

Horno de secado rotatorio

- Definición de la nomenclatura utilizada.
- Cálculos y resultados, identificando los parámetros medidos en forma directa, indicando las ecuaciones utilizadas para el cálculo de todos los resultados intermedios y finales, resultados obtenidos y toda otra información que estime pertinente.
- Discusión y Conclusiones: Los resultados obtenidos deben ser comparados con los valores disponibles en bibliografía, marcando la discrepancia que pueda existir con estos. Se deberá analizar las posibles fuentes de errores y los métodos propuestos para evitarlos o eliminarlos.

6.2. Secadero en proceso de refuncionalización



6.3. Secadero terminado

