

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIA**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE SECADO  
SPRAY ULTRASONICO**

**EDUARDO SEBASTIÁN JARA HERNÁNDEZ**

Santiago, Chile.

2014



**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIA**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE SECADO  
SPRAY ULTRASONICO**

**EDUARDO SEBASTIÁN JARA HERNÁNDEZ**

Profesora Guía Dra. Yolanda Vargas  
Hernández

Trabajo de titulación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Físico.

Santiago, Chile.

2014

# **EVALUACIÓN ENERGETICA DE UN PROCESO DE SECADO SPRAY ULTRASONICO**

**EDUARDO SEBASTIÁN JARA HERNÁNDEZ**

Este trabajo de titulación fue realizado bajo la supervisión de la profesora guía Dra. Yolanda Vargas Hernández, del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora del candidato, profesor Luis Gaete Garretón y profesor Francisco Sepúlveda Palma.

---

Luis Gaete Garretón.

---

Francisco Sepúlveda Palma.

---

Profesora Guía.

---

Directora de Departamento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todas las personas que de alguna u otra forma me influyeron, me apoyaron, me energizaron y me motivaron a seguir adelante en esta etapa. A mi familia completa por nunca dejar de confiar en mí, apoyarme y ser un pilar fundamental en todo momento, en especial a mi padre Ramón Jara Pardo, mi madre Luzmenia Hernández Cabrera, mis hermanas Sandra y Marcia, y a mis sobrinos, sin su apoyo nada de esto habría sido posible, los amo infinitamente. A Claudia Jofré Molineiro por ser mi compañera de vida en las buenas y en las malas, contigo los años de estudios fueron más dulces. A mi primo hermano, más hermano que primo, Felipe Daza Hernández por las experiencias vividas en mi paso por Concepción. A mis compañeros de carrera que se transformaron en amigos del alma, por las jornadas de estudio y diversión, a mis compañeros del laboratorio de Ultrasonidos por su ayuda constante en el desarrollo de este trabajo, a los profesores de la carrera por su entrega de conocimientos y formación personal y profesional. A los profesores del laboratorio Dra. Yolanda Vargas Hernández y Dr. Luis Gaete Garretón por confiar en mí para el desarrollo de este trabajo.

¡Muchas gracias a todos!

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto FONDEF D09I1235 CONICYT.

RESUMEN.....	1
Objetivos del Trabajo de Tesis.....	2
Objetivos Generales .....	2
Objetivos Específicos.....	2
Capítulo 1 .....	3
1.1 Introducción .....	3
1.2 Etapa de inyección:.....	4
1.3 Etapa de Atomización [1]: .....	4
1.4 Etapa de secado:.....	5
1.5 Etapa de Recolección [2]: .....	6
Capítulo 2: Física del secado.....	9
2.1 Física del secado [3] .....	9
2.2 Modelos de curvas de secado [3] .....	12
2.2.1 Modelos de Difusión .....	12
2.2.2 Curva de secado característica (CDC) .....	14
2.2.3 Aproximación a la Ingeniería de la reacción (REA) .....	14
2.2.4 Modelo de Difusión Utilizado [4].....	16
2.3 Condiciones necesarias para la evaporación:.....	18
Capítulo 3: Análisis Teórico y Experimental del secado .....	20
3.1 Curvas de secado Teóricas .....	20
3.1.1 Curvas de secado teóricas para agua de mar y agua pura .....	21
3.1.2. Curvas teóricas de secado para HydroCup .....	26
3.1.3 Incorporación de Temperatura variable al modelo teórico. ....	28
3.1.4. Medición de tamaños de gránulo secados en el laboratorio. ....	35

3.1.4.1. Agua de mar .....	35
3.1.4.2. HidroCup.....	37
Capítulo 4: Simulaciones .....	42
4.1 Simulación del secador de laboratorio: .....	42
Capítulo 5: Sistema de Secado spray de Laboratorio.....	50
5.1 Cámara de secado.....	50
5.2 Calefactor eléctrico trifásico .....	50
5.3 Sistema de Control de Temperatura .....	50
5.4 Extractor de aire.....	51
5.5 Sistema de Potencia Transductor Ultrasónico .....	51
5.6 Bomba de alimentación al transductor .....	51
5.7 Bomba de sistema de refrigeración para el transductor.....	51
Capítulo 6: Caracterización experimental del secador de laboratorio. ....	52
6.1 Parámetros que influyen en el proceso de secado .....	52
6.2 Medición de velocidad de flujo con tubo de Pitot. ....	52
6.3 Medición de Temperatura .....	55
6.3.1 Curva de calentamiento del secador:.....	55
6.3.2 Curva de ajuste de temperatura de entrada.....	56
6.3.3 Curva de ajuste de temperatura de salida .....	58
6.4 Medición de Potencia del sistema de secado. ....	61
6.4.1 Cálculo de Potencia Nominal del Calefactor Trifásico .....	61
6.4.2 Medición del consumo de Potencia del Calefactor trifásico con HIOKI-3161 (Clamp on Power meter).....	62
6.4.3 Montaje del medidor de potencia trifásico.....	63

6.4.4. Resultados de mediciones de Potencia con Relé Mecánico.....	64
6.4.5 Medición de potencia consumida por el calefactor con sistema de control con Relés de estado sólido (SSR) Para distintas Temperaturas de secado.....	66
6.4.6 Comparación de la potencia consumida por el calefactor con sistema de control de temperatura con relés mecánicos y con relés de estado sólido .....	68
Capítulo 7: Cálculo de la Energía específica consumida por el Sistema de Secado.....	70
7.1 Energía Específica para el secado de agua de mar. ....	70
7.1.2 Energía Específica considerando la masa seca obtenida.....	71
7.1.3 Energía específica considerando la masa de producto procesado.....	71
7.2 Energía Específica para el secado de HidroCup .....	72
7.2.1 Energía específica considerando la cantidad de gránulo obtenido. ....	73
7.2.2 Energía específica considerando la cantidad de producto procesado. ...	76
7.3 Estimación de la eficiencia del sistema de secado en términos de masa sólida de entrada versus masa sólida de salida.....	79
7.3.1 Para agua de mar .....	79
7.3.2 Para HidroCup. ....	79
Conclusiones .....	81
Bibliografía.....	82
Referencias.....	82
Anexo 1.....	83
Programa en Matlab para la Adquisición de Datos del Medidor de Potencia. ..	83
Anexo 2.....	84
Estimación del Coeficiente de Difusión para HidroCup:.....	84

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquema simplificado del sistema de secado de laboratorio.....	7
<b>Figura 2:</b> (a) Disminución de la humedad de la gota en función del tiempo. (b) Variación de la temperatura de la gota en función del tiempo.....	11
<b>Figura 3:</b> Curvas de secado teóricas para diámetro inicial de 63 [ $\mu\text{m}$ ], para agua de mar (línea continua) y agua pura (línea punteada).....	22
<b>Figura 4:</b> Curvas de secado de una gota de diámetro inicial $d_i=63[\mu\text{m}]$ para distintas temperaturas de secado, 210[°C] (rojo), 200[°C] (azul), 190[°C] (negro), 180[°C] (verde).....	25
<b>Figura 5:</b> Curvas de secado teóricas para hidróxido de cobre para gotas generadas por transductores de 6[kHz] (curva color negro) y 17[kHz] (curva color rojo).....	26
<b>Figura 6:</b> Valores experimentales de presión de saturación en función de la temperatura [7] (círculos azules), junto con el ajuste realizado con Matlab (línea punteada roja).....	29
<b>Figura 7:</b> Curva de secado para una gota de agua de mar de diámetro inicial 63[ $\mu\text{m}$ ] a temperatura constante (rojo) y para temperatura decreciente desde 200[°C] a 170[°C] (azul punteada).....	31

<b>Figura 8:</b> Curva de secado para una gota de HidroCup de diámetro inicial 170[ $\mu\text{m}$ ] a temperatura constante (rojo) y para temperatura decreciente desde 160[ $^{\circ}\text{C}$ ] a 110[ $^{\circ}\text{C}$ ] (azul punteada).....	33
<b>Figura 9:</b> Curva de secado para una gota de HidroCup de diámetro inicial 105[ $\mu\text{m}$ ] a temperatura constante (rojo) y para temperatura decreciente desde 160[ $^{\circ}\text{C}$ ] a 110[ $^{\circ}\text{C}$ ] (azul punteada).....	34
<b>Figura 10.a y b:</b> Micrografía de los gránulos de sales obtenidos con el sistema de secado del laboratorio, atomizado con el transductor de 17[kHz], con una magnificación de 10x.....	35
<b>Figura 11:</b> Distribución de diámetros de gránulos obtenidos del proceso de secado de gotas de Agua de mar, con diámetro inicial de 63[ $\mu\text{m}$ ].....	36
<b>Figura 12:</b> Micrografía de los gránulos de Hidróxido de Cobre obtenidos con el sistema de secado del laboratorio, a) atomizado con el transductor de 6[kHz] y b) atomizado con el transductor de 17[kHz], ambas con una magnificación de 10x.....	37
<b>Figura 13:</b> Histograma con la distribución de diámetros de gránulos obtenidos del proceso de secado de gotas generadas con el transductor de 6[kHz].....	38
<b>Figura 14:</b> Distribución de diámetros de gránulos secos con el sistema de secado de laboratorio de hidróxido de cobre atomizado con el transductor de 17[kHz].....	39
<b>Figura 15:</b> a) Imagen sólida de la geometría simulada de la cámara de secado con medidas reales. b) imagen transparente de la cámara de secado con medidas reales.....	43

<b>Figura 16:</b> a) Vista de Planta sólida de la cámara de secado simulada. b) Vista de Planta transparente de la cámara de secado simulada.....	44
<b>Figura 17:</b> a) Líneas de corriente del flujo que ingresa por el tubo superior y sale por el tubo con codo inferior. b) vista lateral de las líneas de corriente del flujo dentro de la cámara.....	44
<b>Figura 18:</b> a) Imagen de las trayectorias reales de las gotas al interior de la cámara de secado. b) Imagen de las trayectorias reales de las gotas al interior de la cámara de secado con mayor iluminación.....	45
<b>Figura 19:</b> Distribución térmica de la cámara de secado simulada en COMSOL. .....	46
<b>Figura 20:</b> Gráfica de temperatura de entrada y de salida de la cámara de secado en función del tiempo simulada en Comsol, junto con el ajuste realizado en Matlab.....	47
<b>Figura 21:</b> 16a, 16b, 16c, 16d, 16e, 16f, Representan la distribución térmica simulada en la cámara de secado para los tiempos de 0[s], 40[s], 100[s], 244[s], 408[s] y 1000[s], respectivamente.....	48
<b>Figura 22:</b> Imagen del tubo de Pitot de cabeza semi-esférica construido en el laboratorio.....	53
<b>Figura 23:</b> Sensor Diferencial de Presión MPXV7002DP utilizado para medir la presión entregada por el tubo de Pitot.....	53
<b>Figura 24:</b> Circuito sugerido por el fabricante para el funcionamiento del sensor de presión MPXV7002DP.....	54
<b>Figura 25:</b> Curvas de calentamiento Tin (círculos azules), Tout (Línea punteada roja).....	56

<b>Figura 26:</b> Curva de ajuste realizada con Matlab según los datos experimentales medidos de temperatura de entrada.....	57
<b>Figura 27:</b> Curvas de calentamiento de Temperatura de entrada medida experimentalmente (Línea continua roja) y curva obtenida del ajuste de Matlab (círculos azules).....	58
<b>Figura 28:</b> Curva de ajuste realizada con Matlab según los datos experimentales de temperatura de salida medidos.....	59
<b>Figura 29:</b> Curvas de calentamiento de Temperatura de salida medida experimentalmente (Línea continua azul) y curva obtenida del ajuste de Matlab (círculos negros).....	60
<b>Figura 30:</b> Forma correcta de conectar el medidor HIOKI-3161 para una medición de potencia de alimentación trifásica según su manual de uso.....	63
<b>Figura 31:</b> Gráfica en tiempo real de medición de potencia instantánea y promedio, mediante adquisición de datos analógicos con Matlab.....	64
<b>Figura 32:</b> Gráfica completa de 90 minutos de medición de la potencia instantánea y promedio consumida por el calefactor eléctrico del sistema de secado, para una temperatura de secado de $T=110[^\circ\text{C}]$ .....	67
<b>Figura 33:</b> Potencia promedio consumida por el calefactor eléctrico en función de la temperatura de secado.....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I:</b> Valores de los parámetros utilizados para la simulación de curvas teóricas de agua dulce y agua de mar.....	23
<b>Tabla II:</b> Parámetros de interés estimados para gotas de agua de mar:.....	24
<b>Tabla III:</b> Valores de los parámetros utilizados en la simulación de secado de gotas de HidroCup.....	27
<b>Tabla IV:</b> Parámetros de interés estimados para Hidróxido de cobre al 54% de sólidos.....	27
<b>Tabla V:</b> Resumen de datos de interés para el secado de agua de mar.....	36
<b>Tabla VI:</b> Tabla comparativa de diámetros iniciales y finales para dos transductores atomizadores estimados de forma teórica y medidos experimentalmente.....	40
<b>Tabla VII:</b> Resultados de mediciones de Potencia Promedio para distintas temperaturas de secado.....	67
<b>Tabla VIII:</b> Comparación de potencia consumida por los sistemas de control con relés mecánicos y relés de estado sólido.....	69
<b>Tabla IX:</b> Parámetros del ensayo de secado de agua de mar.....	70
<b>Tabla X:</b> Elementos del sistema que consumen potencia.....	70
<b>Tabla XI:</b> Parámetros de la experiencia de secado de HidroCup.....	72
<b>Tabla XII:</b> Potencia consumida por todos los elementos que componen el sistema de secado.....	73

## **RESUMEN**

En esta memoria se presenta una evaluación de una tecnología de secado spray asistida por ultrasonidos que ha sido desarrollada en el Laboratorio de Ultrasonidos de la Universidad de Santiago de Chile. La investigación que culminó con la tecnología de secado que se expondrá se ha realizado con el soporte económico del proyecto FONDEF D09I1235.

Se realiza una evaluación energética del sistema de secado spray desarrollado en el Laboratorio de Ultrasonidos. La evaluación del sistema consulta además la realización de simulaciones, vía elementos finitos, para establecer la trayectoria de las partículas atomizadas por ultrasonidos en el interior de la cámara de secado de laboratorio desarrollada. Se comparan las predicciones con observaciones de campo.

Se estudia el comportamiento del flujo dentro de la cámara y su distribución térmica, los resultados se contrastan con las mediciones de las temperaturas de entrada y salida de la cámara de secado. La caracterización del proceso comienza con la estimación del tiempo de residencia mínimo requerido por las gotas para el secado. Se realizan los balances de masa del proceso.

Finalmente, se hace mediciones de distribuciones de tamaños de los gránulos generados para ello, se desarrollan herramientas que permitan medir los parámetros necesarios.

Los resultados obtenidos para la evaluación energética del secador spray asistido por ultrasonidos muestran que el mayor consumo de energía está en el proceso de secado.

## **Objetivos del Trabajo de Tesis**

### **Objetivos Generales**

- Caracterizar un sistema de secado de laboratorio, asistido por ultrasonidos.

### **Objetivos Específicos**

- Simular un proceso de secado spray asistido por ultrasonidos.
- Determinar, experimentalmente, los parámetros de operación de un secador spray asistido por ultrasonidos.
- Configurar un sistema de medición de potencia para el secado en tiempo real.
- Realizar una evaluación energética del proceso de secado spray asistido por ultrasonidos.

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

El secado de una solución o mezcla atomizada es utilizado en múltiples áreas de la industria, tales como el sector agrícola, farmacéutico, cosmético, alimenticio y químico-industrial. Cada sector industrial tendrá requerimientos distintos para el gránulo final generado en el secado, algunos necesitarán que el gránulo tenga una determinada humedad para lograr una dispersión óptima en el agua, otros necesitarán que el gránulo contenga cavidades internas en donde poder depositar algún agente activo de limpieza o medicamento.

Es por ello que se realiza un estudio del estado del arte en cuanto al funcionamiento de algunos secadores industriales, los parámetros que influyen en el proceso de secado y en las características finales del producto obtenido.

Parámetros como la temperatura, el caudal de alimentación del líquido a atomizar, el tamaño de las gotas atomizadas, así como propiedades intrínsecas del mismo como viscosidad, tamaño de partículas primarias y el porcentaje de sólidos presente en la gota, son fundamentales para determinar las condiciones finales del gránulo seco, tales como humedad, tamaño, porosidad, etc. Estas condiciones finales determinan características como su pulvulencia, solubilidad, fluidez, etc.

Interesa conocer los costos económicos que implica el proceso de secado, para ello, se hace necesario determinar el consumo energético del sistema completo, referido a la cantidad de producto seco generado. Esto permitirá calcular la **Energía Específica** que consume el sistema de secado, que se expresa, como es bien sabido, en kilogramos de producto que se logra procesar versus el

gasto energético. En este trabajo de tesis, se desarrollan métodos para adquirir esa información y calcular los costos y eficiencia del sistema.

Para facilitar la exposición de este trabajo se dividirá el proceso de secado en etapas a saber: Inyección, Atomización, Secado y Recolección.

### **1.2 Etapa de inyección:**

En la etapa de inyección se debe impulsar el líquido a secar mediante el uso de bombas de alimentación. Dichas bombas deben ser cuidadosamente seleccionadas en función de la naturaleza del líquido a inyectar, es decir, si es un líquido abrasivo o no (si contiene micro-metales dispersos en el líquido), si el líquido pertenece a la industria alimentaria debe mantenerse libre de contaminantes, etc. Las bombas de alimentación pueden ser de cavidad progresiva, tornillo, peristáltica, etc.

### **1.3 Etapa de Atomización [1]:**

En la etapa de atomización el líquido debe ser separado o desintegrado en pequeñas gotas. Existen distintos mecanismos usados hoy en día por la industria para atomizar el líquido inyectado, algunos de ellos se mencionan a continuación:

La atomización por **disco rotatorio**, éste método consiste en un disco que gira a alta velocidad en donde el líquido es inyectado por el centro y producto del giro del mismo, salen despedidas múltiples gotitas.

Otro método utilizado normalmente en la industria es la atomización por **boquilla a presión**, en este caso el líquido es inyectado a alta presión por las bombas hacia la boquilla, y es en la punta de ésta donde el líquido es atomizado debido a la diferencia de presión que el líquido enfrenta al salir de la boquilla.

Un tercer método para generar la atomización es la boquilla asistida por aire a presión o **boquilla de doble vía**. Este sistema es similar al de la boquilla a presión, pero con la diferencia de que cuenta con una vía adicional, concéntrica a la vía de inyección del líquido por donde se hace pasar aire a presión, y es éste aire el encargado de generar la atomización del líquido suministrado.

Existe también otro tipo de atomización que emplea ultrasonidos, este tipo de atomizador se encuentra en uso actualmente en sistemas clínicos para nebulizaciones, En el Laboratorio de Ultrasonidos de la Universidad de Santiago de Chile se ha implementado un sistema de secado spray de laboratorio asistido por ultrasonidos el que se analiza durante el desarrollo de esta tesis. Este tipo de atomización se denomina “**Atomización Ultrasónica**” y se produce haciendo incidir el líquido a atomizar en una placa radiante de un transductor ultrasónico [Proyecto FONDEF D0911235]. Producto de la vibración a alta frecuencia de dicha placa, el líquido se desintegra en millones de pequeñas gotitas que pasan a la siguiente etapa.

#### **1.4 Etapa de secado:**

Posteriormente, en la etapa de secado propiamente tal, el líquido atomizado se enfrenta a un flujo de aire a altas temperaturas, que varían entre los 100[°C] y los 300[°C], según la naturaleza del líquido a secar y los requerimientos de cada caso.

Este flujo de aire de secado no debe ser demasiado alto, ya que, de ser así, las gotas atomizadas, se proyectarían rápidamente hacia las paredes internas de la cámara de secado y por estar aún con alto contenido de humedad quedarían adheridas a éstas, sin caer a la zona de recolección.

Por otro lado, si se usa un flujo de aire demasiado pequeño, las gotas atomizadas caerán directo a la zona de recolección, sin estar el tiempo suficiente en contacto con el aire caliente como para ser secadas.

Esta regulación del caudal de aire de secado debe ser realizada de forma experimental, observando el haz de atomización. En nuestro caso, a pesar de que el extractor de aire no es regulable, se realiza la regulación del flujo limitando la entrada de aire al calefactor. Consiguiendo además con ello una disminución de la presión interna de la cámara de secado, lo que favorece aún más la vaporización de la humedad.

### **1.5 Etapa de Recolección [2]:**

Finalmente, tenemos la etapa de recolección en donde se obtiene el gránulo final seco. En los secadores industriales existen principalmente dos tipos de recolección:

El primer tipo, corresponde a una recolección por intermedio de un “Lecho Fluidizado” en donde los gránulos semi-secos caen dentro de este lecho por el que circula aire caliente pero a menor temperatura que el de secado, continuando su proceso de secado hasta alcanzar la humedad requerida. Posteriormente, los gránulos rebalsan y caen a la zona final de recolección.

El segundo tipo de recolección corresponde a una recolección directa, es decir, no existe Lecho Fluidizado y el gránulo sólo se seca dentro de la cámara de secado, cayendo posteriormente de forma directa a la zona de recolección.

En el esquema mostrado en la figura (1), se pueden identificar las etapas del sistema de secado de laboratorio utilizado en este trabajo.

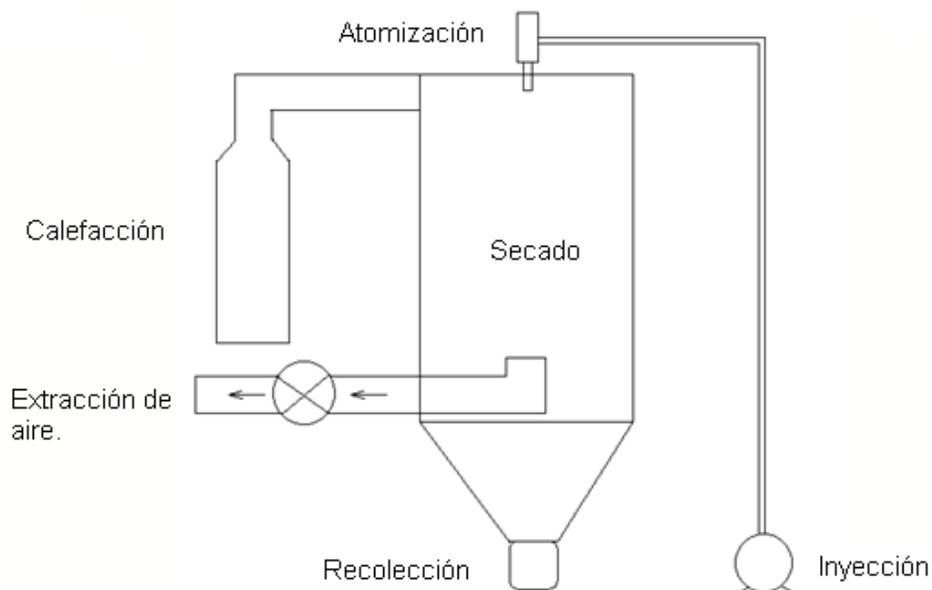


Figura 1: Esquema simplificado del sistema de secado de laboratorio.

Durante este trabajo de tesis, se realiza un estudio de la física del secado, considerando modelos físicos adecuados. Se realizan análisis de curvas teóricas de la evolución temporal de la gota durante el proceso de secado, es decir, curvas de tiempo de secado versus el diámetro de la gota. Se realizan simulaciones del proceso de secado con métodos de elementos finitos (MEF) que permitan obtener información de parámetros que son difíciles de medir en la práctica. Como por ejemplo, el comportamiento del flujo dentro de la cámara en términos de sus líneas de corriente, así como también la distribución térmica dentro de la misma. Se trabaja en métodos de adquisición de datos en “tiempo real” para obtener la medición de parámetros relevantes para la estimación de

consumo energético del sistema completo de secado, con el fin de obtener la antes mencionada “Energía Específica”.

En resumen, se realiza una caracterización del sistema de secado ultrasónico desarrollado en el Laboratorio de Ultrasonidos de la Universidad de Santiago de Chile.

## Capítulo 2: Física del secado

### 2.1 Física del secado [3]

En este capítulo se muestra una recopilación de la información disponible acerca de la física del secado, en donde se revisan los fenómenos físicos que influyen en el proceso de secado de una gota de líquido con sólidos mezclados o disueltos en su interior, así como el proceso mismo de secado con todas sus etapas.

Cuando una gota se ve expuesta a un medio en donde existe aire a altas temperaturas, sufre procesos térmicos que podemos separar en tres etapas: En la primera etapa, la gota sufre un incremento drástico de su temperatura hasta la llamada “temperatura húmeda” del aire de secado. Posteriormente, se da inicio a la segunda etapa en donde realmente comienza el proceso de evaporación del agua.

Debido a que la energía superficial para mantener una interfase sólido-vapor es mayor a la energía superficial para mantener una interfase de líquido-vapor, las partículas sólidas mezcladas dentro de la solución abandonan la superficie dirigiéndose al interior de la gota para minimizar la energía superficial, por lo que la humedad que contiene la gota es llevada desde el interior hacia la superficie lo suficientemente rápido como para mantenerla saturada de humedad, y es aquí en la superficie donde sucede la evaporación, provocando la reducción del tamaño de la gota. Aquí la tasa de evaporación es idéntica a la de una gota de agua pura y la temperatura de la gota permanece constante. A esta etapa se la denomina como “**periodo de secado a velocidad constante**”.

La tercera etapa se inicia cuando la capa saturada en agua que poseía la gota ha sido evaporada casi en su totalidad. Es decir, la humedad de la capa superficial de la gota se reduce hasta alcanzar una humedad crítica. Esto sucede debido a que el agua que fluye desde el interior de la gota hacia la superficie va disminuyendo debido a su evaporación y llega un momento en que ya no es capaz de mantener la superficie saturada de humedad. Aquí comienza un periodo de secado llamado “**periodo de secado a velocidad decreciente**”. Las partículas primarias que componen la mezcla o solución de la gota comienzan a aglomerarse y a formar una costra semi-sumergida en la humedad crítica de la superficie, inmediatamente la poca humedad que queda en la superficie termina de evaporarse dando lugar a una costra seca, la gota detiene su reducción y es aquí donde se determina el diámetro final que tendrá el gránulo seco. En esta etapa, la gota puede ser considerada como un gránulo húmedo con diámetro constante. A medida que continúa transcurriendo el secado se pueden identificar dos zonas dentro del gránulo húmedo; una zona en la superficie donde se encuentra la costra, que es una zona de estructura porosa y otra zona en el interior donde se encuentran partículas que aún no se adhieren a la costra y líquido que aún no ha sido evaporado.

A medida que la costra comienza a formarse se genera una fuerza capilar debido a los meniscos de líquido entre partículas que hacen que éstas se aproximen y se mantengan unidas en la superficie.

Esta costra formada en la superficie genera una resistencia a la fluidez del líquido desde el interior hacia el exterior del gránulo húmedo, esta resistencia a la fluidez irá en aumento a medida que más partículas se van adhiriendo a la costra. Es por eso que la velocidad de secado en esta etapa es decreciente.

En esta etapa contamos con un gránulo en donde su costra no se encuentra saturada de humedad, por lo que su temperatura ya no será la temperatura húmeda del aire, sino que comenzará a aumentar hasta llegar a la temperatura

de secado. En esta etapa se determina la humedad final que tendrá el gránulo. Si el tiempo de residencia del gránulo dentro de la cámara de secado es suficientemente grande el proceso de secado sigue desarrollándose hasta que el gránulo alcanza la humedad mínima posible, esta humedad corresponde a la de equilibrio con el entorno, es decir, la humedad del aire de secado.

En la figura (2) se muestra gráficamente el proceso de secado descrito, con respecto a la variación de humedad y temperatura de la gota durante el mismo.

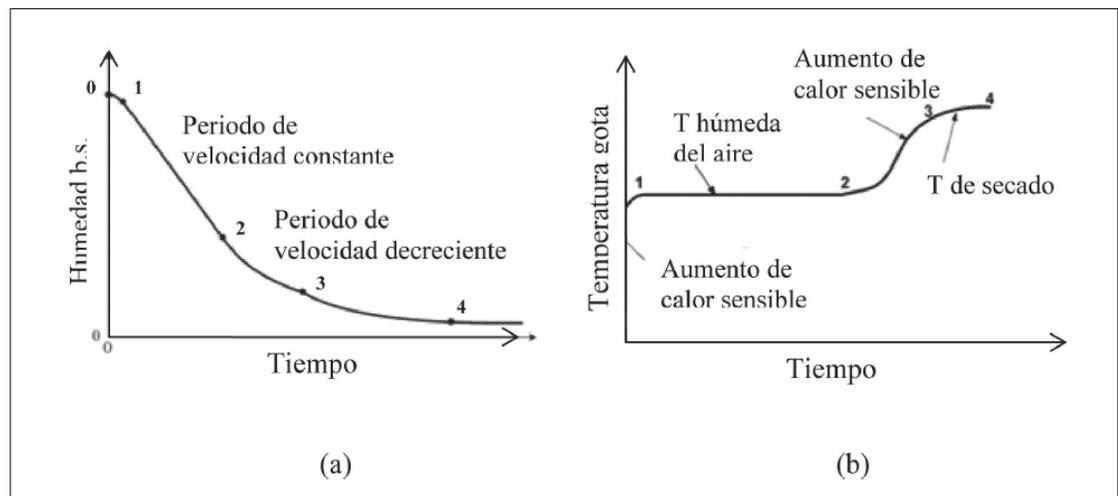


Figura (2): (a) Disminución de la humedad de la gota en función del tiempo. (b) Variación de la temperatura de la gota en función del tiempo. Figura tomada de la referencia [3].

## **2.2 Modelos de curvas de secado [3]**

Existen tres grandes tipos de aproximaciones para la formulación de los modelos:

- Modelos que emplean simultáneamente las ecuaciones diferenciales de conservación de materia y energía usando las ecuaciones y coeficientes de difusión.
- Modelos basados en una aproximación semi-empírica que utiliza el concepto de curva de secado característica (CDC), en donde se tienen en cuenta los distintos periodos de secado (periodo a velocidad de secado constante y decreciente).
- Modelos basados en una aproximación a la ingeniería de la reacción, conocida por las siglas REA (Reaction Engineering Approach).

### **2.2.1 Modelos de Difusión**

El modelo de difusión se ha aplicado generalmente para predecir la velocidad de secado de las gotas [3]. El primer trabajo en el que se utilizó este modelo fue publicado en los años 50 y se ha aplicado al estudio del secado de numerosos materiales. En este modelo, la fuerza impulsora para el transporte de agua es el gradiente de humedad entre el aire y la gota/gránulo. Dicho transporte se produce por difusión del agua líquida o vapor de agua. El agua se difunde a través del sólido y se evapora en la superficie. Cuando se alcanza la humedad crítica y se forma la costra porosa, el plano de evaporación se desplaza hacia el interior del gránulo y el vapor de agua se difunde a través de la costra.

La distribución temporal y espacial de los componentes durante el secado se obtiene resolviendo la ecuación de difusión que se muestra a continuación:

$$\frac{\partial c_{M,i}}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{i,j} \nabla c_{M,i}) \quad Ec (1)$$

$$\frac{\partial c_{M,i}}{\partial t} = \frac{D_{i,j}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial c_{M,i}}{\partial r} \right)$$

Donde  $c_{M,i}$  es la concentración másica del componente  $i$ ,  $D_{i,j}$  es la difusividad del componente  $i$ , en el componente  $j$ . y  $r$  es el radio de la gota.

En general, el modelo describe el proceso mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias y en derivadas parciales y sus correspondientes condiciones de contorno.

La resolución es complicada por la existencia de un dominio de contorno que se desplaza debido a la contracción de la gota en el primer periodo, y al retroceso de la interfase costra-núcleo durante el segundo periodo. Por lo que la resolución numérica de estos modelos requiere de tiempo y recursos de cálculo importantes. Además requiere el conocimiento de muchos coeficientes de transporte y características del material como coeficientes de difusión de materia y energía, compacidad de las partículas, humedad crítica, etc. bajo distintas condiciones de secado. La difusión de agua puede describirse haciendo uso de una difusividad efectiva. Sin embargo, dicha difusividad tampoco es fácil de determinar con precisión, ya que, varía con el contenido de agua y requiere conocer el perfil de humedad al interior del gránulo.

### 2.2.2 Curva de secado característica (CDC)

El modelo CDC fue formulado suponiendo que la velocidad de secado es una función lineal de primer orden con respecto al contenido de humedad libre en la gota/gránulo. El modelo se basa en la existencia de dos periodos de secado. El periodo de velocidad de secado constante se asimila a la evaporación de gotas pequeñas de líquido puro, mientras que el periodo de velocidad de secado decreciente se determina multiplicando la velocidad de secado final del primer periodo por una función que depende de la humedad presente, la humedad de equilibrio y la humedad crítica. Esta aproximación supone que, a cada contenido en humedad libre, le corresponde una velocidad de secado específica relativa a la velocidad de secado en el primer periodo, e independiente de las condiciones de secado externas. La velocidad de secado puede expresarse como:

$$\frac{dX}{dt} = f \cdot \frac{h_c \cdot A}{m_s \cdot \Delta H_v} (T - T_g) \quad Ec(2)$$

Donde  $h_c$  es el coeficiente individual de transferencia de energía,  $A$  es el área de la gota,  $m_s$  es la masa de sólido,  $\Delta H_v$  es la entalpía de vaporización del agua,  $T$  y  $T_g$  son las temperaturas del aire y de la gota, respectivamente,  $X$  es la humedad presente.

### 2.2.3 Aproximación a la Ingeniería de la reacción (REA)

Este modelo considera el proceso de secado como un proceso de activación en donde tiene que superarse una barrera energética para que el proceso de evaporación de humedad se lleve a cabo.

El modelo utiliza el gradiente de concentraciones de vapor como fuerza impulsora para la evaporación del agua en la superficie de la gota/gránulo. La velocidad de secado se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dm_L}{dt} = -h_m \cdot A \cdot (\rho_{v,sup} - \rho_{v,a}) \quad Ec(3)$$

Donde,  $m_L$  es la masa de agua presente en la gota,  $h_m$  es el coeficiente de transferencia de materia,  $A$  es el área de la gota,  $\rho_{v,sup}$  es la concentración de vapor en la superficie de la gota,  $\rho_{v,a}$  es la concentración de vapor en el aire de secado.

Cuando la superficie de la gota se encuentra completamente saturada de humedad (correspondiente a la primera etapa de secado), la concentración de vapor en la superficie es igual a la concentración de vapor saturado. A medida que comienza el segundo periodo de secado esta concentración de vapor va disminuyendo. Ambas concentraciones se pueden relacionar mediante la humedad relativa en la superficie de la gota de la siguiente manera:

$$\rho_{v,sup} = \varphi_{sup} \cdot \rho_{v,sat}(T_g) \quad Ec(4)$$

Donde,  $\varphi_{sup}$  es la humedad relativa de la superficie.

Por otra parte, la humedad relativa puede expresarse de la siguiente manera:

$$\varphi_{sup} = \exp\left(-\frac{\Delta E_v}{R \cdot T_g}\right) \quad Ec(5)$$

Aquí,  $\Delta E_v$  representa la energía de activación aparente necesaria para el proceso de secado, y refleja el grado de dificultad que presenta la eliminación de agua en los distintos periodos de secado. Por ejemplo, cuando la gota se encuentra completamente saturada de agua, la energía de activación tiende a cero, e irá en aumento a medida que la gota vaya perdiendo humedad.

En general, es posible obtener una relación entre la energía de activación aparente y la humedad, como una propiedad característica de cada material bajo condiciones de secado distintas. De la Ec. (5), Es posible obtener el valor de la energía de activación de manera experimental de la siguiente manera:

$$\Delta E_v = -R \cdot T_g \cdot \ln \left( \frac{-\frac{dm_L}{dt} \cdot \frac{1}{h_m \cdot A} + \rho_{v,a}}{\rho_{v,sat}} \right) \quad Ec(6)$$

Al representar la energía de activación frente al contenido de humedad libre ( $X - X_{eq}$ ) se obtiene una función del tipo:

$$\Delta E_v = a \cdot \exp(-b \cdot (X - X_{eq})^c) \quad Ec(7)$$

Donde  $a$  debe ser independiente del contenido de humedad inicial, mientras que  $b$  y  $c$  están relacionados y dependen de la humedad inicial y de la temperatura de secado.

#### 2.2.4 Modelo de Difusión Utilizado [4].

El modelo que se ha elegido para estudiar la dinámica del diámetro de la gota es válido tanto, en un proceso de secado, como en uno de condensación, y se encuentra propuesto en la referencia [4].

La expresión matemática propuesta es:

$$\frac{dd_p}{dt} = \frac{4D_v M}{R \rho_p d_p T} (p - p_s) \quad Ec. (8)$$

Donde,  $d_p$  corresponde al diámetro de gota-gránulo,  $D_v$  es el coeficiente de difusión del vapor,  $M$  es la masa molar del líquido que compone la gota,  $R$  es la

constante universal de los gases,  $\rho_p$  es la densidad de la gota,  $p$  es la presión en una zona lejana a la gota, es decir, la presión dentro de la cámara de secado y  $p_s$  es la presión en la superficie de la gota o bien la presión de saturación de vapor. Finalmente  $T$  es la temperatura del aire de secado.

Si separamos variables en la ecuación (8) e integramos:

$$d_p d(d_p) = \frac{4D_v M}{R\rho_p T} (p - p_s) dt$$

$$\int_{d_i}^{d_f} d_p d(d_p) = \frac{4D_v M}{R\rho_p T} (p - p_s) \int_0^t dt$$

$$(d_f^2 - d_i^2) = \frac{8D_v M}{R\rho_p T} (p - p_s) t$$

Despejando el tiempo:

$$t = \frac{R\rho_p T}{8D_v M} \frac{(d_f^2 - d_i^2)}{(p - p_s)} \quad Ec(9)$$

Esta expresión sirve para obtener el tiempo que demora una gota en disminuir su diámetro inicial  $d_i$ , hasta un diámetro final  $d_f$ . Considerando las condiciones del entorno y características de la gota antes mencionadas.

### 2.3 Condiciones necesarias para la evaporación:

Otro parámetro importante, es la razón de saturación  $r$  [4]. Esta razón considera la presión interna de la cámara de secado y la presión de saturación de vapor como variables principales para indicar si nos encontramos en condiciones propicias para la evaporación de un líquido o para la condensación del mismo, la razón de saturación se expresa como:

$$r = \frac{p}{p_s} \quad Ec(10)$$

Donde  $p$  corresponde a la presión del entorno, en nuestro caso, la presión dentro de la cámara de secado y  $p_s$  corresponde a la presión de saturación de vapor o equivalentemente a la presión en la superficie de la gota.

Revisemos ahora los tres casos con los que nos podemos encontrar respecto de la razón de saturación:

- 1) El primer caso corresponde a que la razón de saturación sea menor a 1, es decir,  $r < 1$ , lo que es equivalente a que la presión en la superficie de la gota  $p_s$ , sea mayor a la presión dentro de la cámara de secado  $p$ , esto genera la condición necesaria para que se produzca la migración de la humedad desde la gota hacia el entorno en búsqueda del equilibrio, fenómeno conocido como evaporación, por lo que la gota disminuirá su tamaño a lo largo del tiempo.
- 2) El segundo caso corresponde a que la razón de saturación sea mayor a 1, es decir  $r > 1$ , lo que conlleva a que la presión en la superficie de la gota sea menor que la presión dentro de la cámara de secado, en este escenario tenemos la condición necesaria para que la humedad del entorno se incorpore a la gota, fenómeno conocido como condensación y la gota aumentará su tamaño a medida que transcurre el tiempo.

3) El tercer y último caso corresponde a que la razón de saturación sea igual a 1,  $r = 1$ , es decir, la presión en la superficie de la gota sea idéntica a la presión dentro de la cámara de secado. En este caso no se genera evaporación ni condensación, por lo que la gota permanece con su tamaño constante.

## Capítulo 3: Análisis Teórico y Experimental del secado

### 3.1 Curvas de secado Teóricas

En este capítulo se muestran los resultados de las curvas teóricas generadas con Matlab, empleando el modelo propuesto por W. C. Hinds.

En el programa realizado se considera un diámetro final de la gota a secar que en este trabajo se ha calculado según el porcentaje de sólidos presente en la misma. Además se considera un diámetro inicial conocido según la frecuencia de operación del transductor que atomiza y genera las gotas [5].

Se realiza una presentación de curvas teóricas de tiempo de secado para diferentes diámetros iniciales. Las partículas provienen de diferentes fluidos como “Hidrocup”, agua de mar y otros. El modelo estima el tiempo que tarda una gota de diámetro inicial  $d_i$  en alcanzar un diámetro final  $d_f$ , para el caso del agua pura el diámetro final será  $d_f = 0$ .

La ecuación utilizada es la mencionada en el capítulo anterior (Ec.9):

$$t = \frac{R\rho_p T(d_f^2 - d_i^2)}{8D_v M(p - p_s)}$$

### 3.1.1 Curvas de secado teóricas para agua de mar y agua pura

Se obtuvieron las curvas de tiempo de secado para las gotas generadas con el transductor de 17[kHz] correspondientes a diámetros iniciales de 63[ $\mu\text{m}$ ] [5], para poder realizar una comparación con los tamaños finales obtenidos del ensayo de secado de agua de mar, realizado con el mismo transductor.

Los diámetros finales se estiman de la siguiente manera:

Suponiendo la gota esférica se tiene:

$$V_{esf} = \frac{\pi}{6} d^3 \quad Ec. (11)$$

$$d_f = \left[ \frac{6}{\pi} V_f \right]^{\frac{1}{3}} \quad Ec(12)$$

Esta expresión depende del volumen final de la gota que se estima considerando el volumen inicial y el porcentaje de sólidos que contiene. Suponemos que el volumen final corresponde a la fracción sólida de la gota inicial.

$$V_f = V_i * \%sólidos \quad Ec. (13)$$

Para el caso de agua de mar, se considera una concentración de sólidos de un 4.8%. Este porcentaje de sólidos fue medido con la termo-balanza del laboratorio “*Mettler Toledo HR73 Halogen Moisture Analyzer*”.

A continuación se muestran las curvas obtenidas considerando una temperatura de secado de  $T=200[^\circ\text{C}]$ :

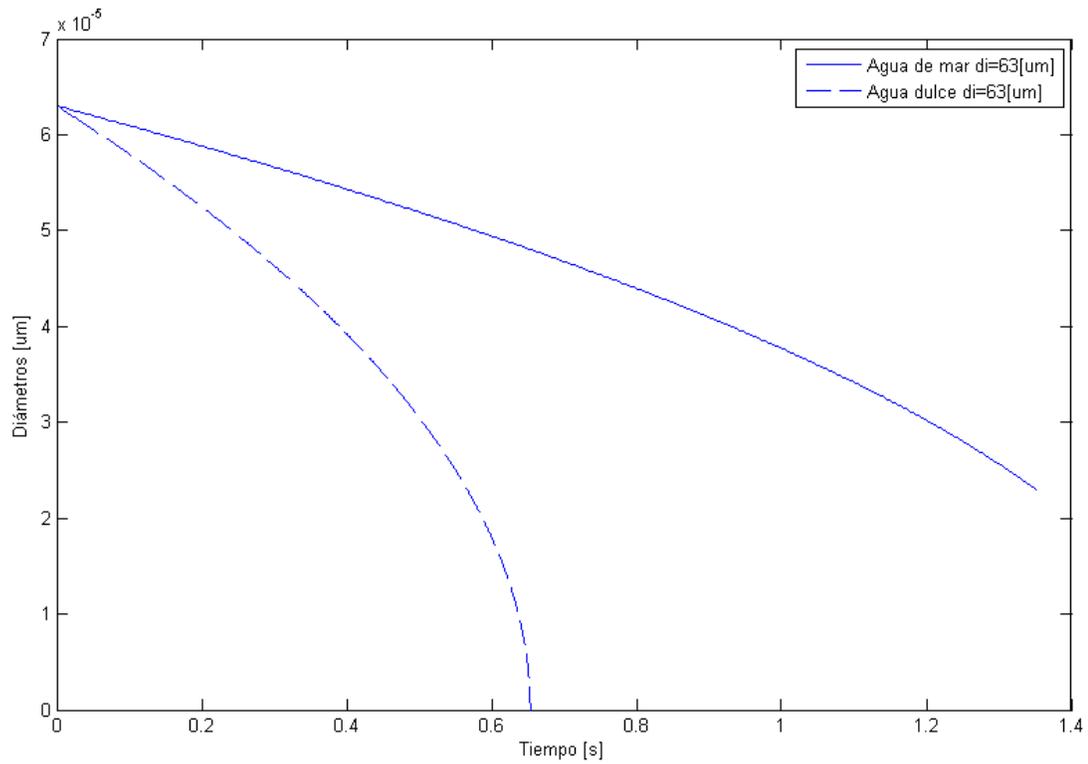


Figura 3: Curvas de secado teóricas para diámetro inicial de 63 [μm], para agua de mar (línea continua) y agua pura (línea punteada).

Podemos observar desde la gráfica de curvas teóricas, que las gotas de agua pura, realizan su evaporación en un tiempo notoriamente menor que las gotas de agua de mar.

Los valores de los parámetros utilizados para la simulación se muestran en la Tabla I.

Tabla I: valores de los parámetros utilizados para la simulación de curvas teóricas de agua dulce y agua de mar.

Agua dulce		Agua de mar	
$T$	473.15 [°K]	$T$	473.15 [°K]
$R$	8.3144[Pa · m <sup>3</sup> /(K · mol)]	$R$	8,3144[Pa · m <sup>3</sup> /(K · mol)]
$\rho_p$	1000 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$	1027 [kg/m <sup>3</sup> ]
$d_i$	63 [μm]	$d_i$	63 [μm]
$d_f$	0 [μm]	$d_f$	23 [μm] <i>estimado</i>
$D_v$	6.52 · 10 <sup>-8</sup> [m <sup>2</sup> /s]	$D_v$	4,52 · 10 <sup>-8</sup> [m <sup>2</sup> /s]
$M$	0.018 [kg/mol]	$M$	0,0199 [kg/mol]
$p$	100540 [Pa]	$p$	100540 [Pa]
$p_s$	1569064[Pa]	$p_s$	1569064[Pa]

Un parámetro importante a considerar es la distancia mínima que debe recorrer la gota durante su trayecto dentro de la cámara de secado para que logre evaporar su contenido de agua. Esto se puede obtener considerando el tiempo de secado obtenido de la figura (3) en conjunto con la velocidad del flujo de aire caliente medido en el capítulo (6), utilizando la expresión conocida de velocidad, pero despejando la distancia recorrida, esto es:

$$d = v * t \quad \text{Ec. (14)}$$

A continuación se muestra un resumen con los valores de los diámetros finales estimados de los gránulos obtenidos para el caso del agua de mar, agua dulce y distancia mínima de recorrido de la gota para su secado (Tabla II).

Tabla II: Parámetros de interés estimados para gotas de agua dulce y agua de mar:

	D. Inicial [ $\mu\text{m}$ ]	D. final [ $\mu\text{m}$ ]	Tiempo [s]	D. mínima [m]	N° vueltas
Agua dulce	63	0	0,65	3,25	1,5
Agua de mar	63	23	1,35	6,75	3,5

Los tiempos mostrados en la Tabla II, corresponden a los tiempos de residencia mínimos estimados dentro de la cámara de secado para que las gotas generadas alcancen su evaporación completa.

Estos datos fueron útiles para saber si con las condiciones de temperatura, presión interna de la cámara de secado y velocidad de flujo de entrada, sería posible la evaporación completa de las gotas de agua de mar y de agua dulce generadas.

Con los resultados se observa que la distancia mínima es suficiente para que se realice la evaporación, ya que, si consideramos que las gotas dentro de la cámara realizan giros de un radio estimado de 0,30 [m] aproximadamente, se necesitarían de 1,5 y 3,5 vueltas para el secado de agua dulce y de mar, respectivamente.

Por otra parte, se obtuvo también las curvas de secado teóricas para una gota de diámetro inicial 63[ $\mu\text{m}$ ] con distintas temperaturas de secado, 210[°C], 200[°C], 190[°C] y 180[°C]. Cabe señalar que dichas temperaturas se suponen constantes durante el proceso de secado.

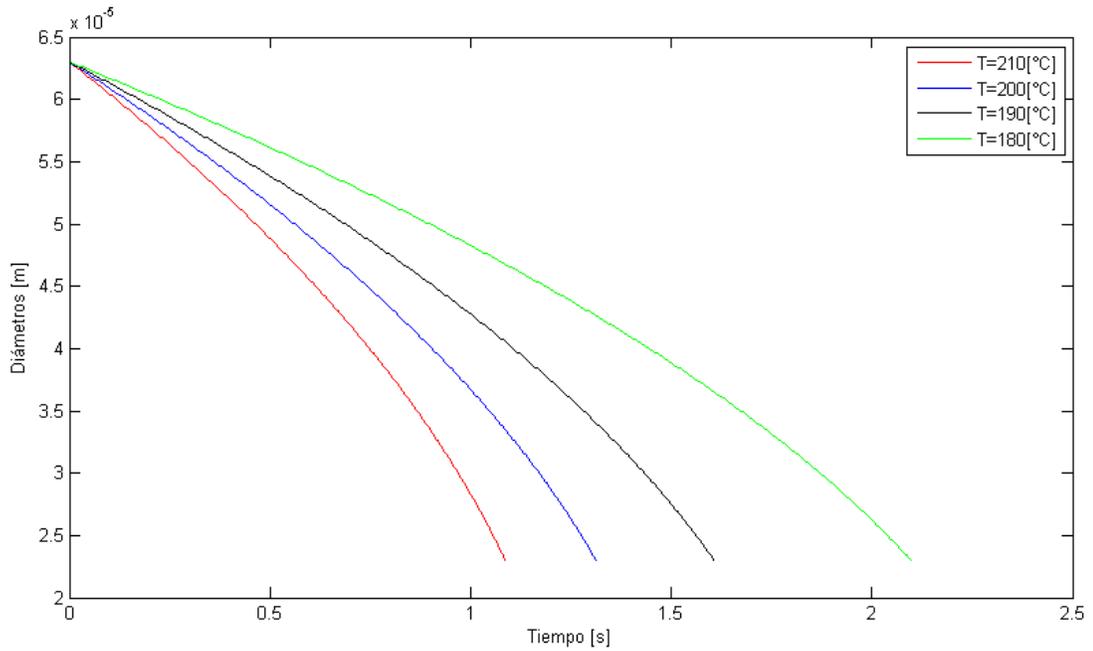


Figura 4: Curvas de secado de una gota de diámetro inicial  $d_i=63[\mu\text{m}]$  para distintas temperaturas de secado,  $210^\circ\text{C}$  (rojo),  $200^\circ\text{C}$  (azul),  $190^\circ\text{C}$  (negro),  $180^\circ\text{C}$  (verde).

De esta figura podemos observar la dependencia inversa entre el tiempo y la temperatura de secado que nos entrega el modelo teórico utilizado.

### 3.1.2. Curvas teóricas de secado para HidroCup

A continuación se muestran las curvas teóricas de secado para gotas de hidróxido de cobre generadas por dos transductores, el primero con frecuencia de operación de 6[kHz] que genera gotas en su mayoría de un diámetro inicial de  $di_1 = 170[\mu m]$  y el segundo con frecuencia de operación de 17[kHz] que genera gotas en su mayoría de  $di_2 = 105[\mu m]$ , en ambos casos se considera una temperatura de secado de 180[°C].

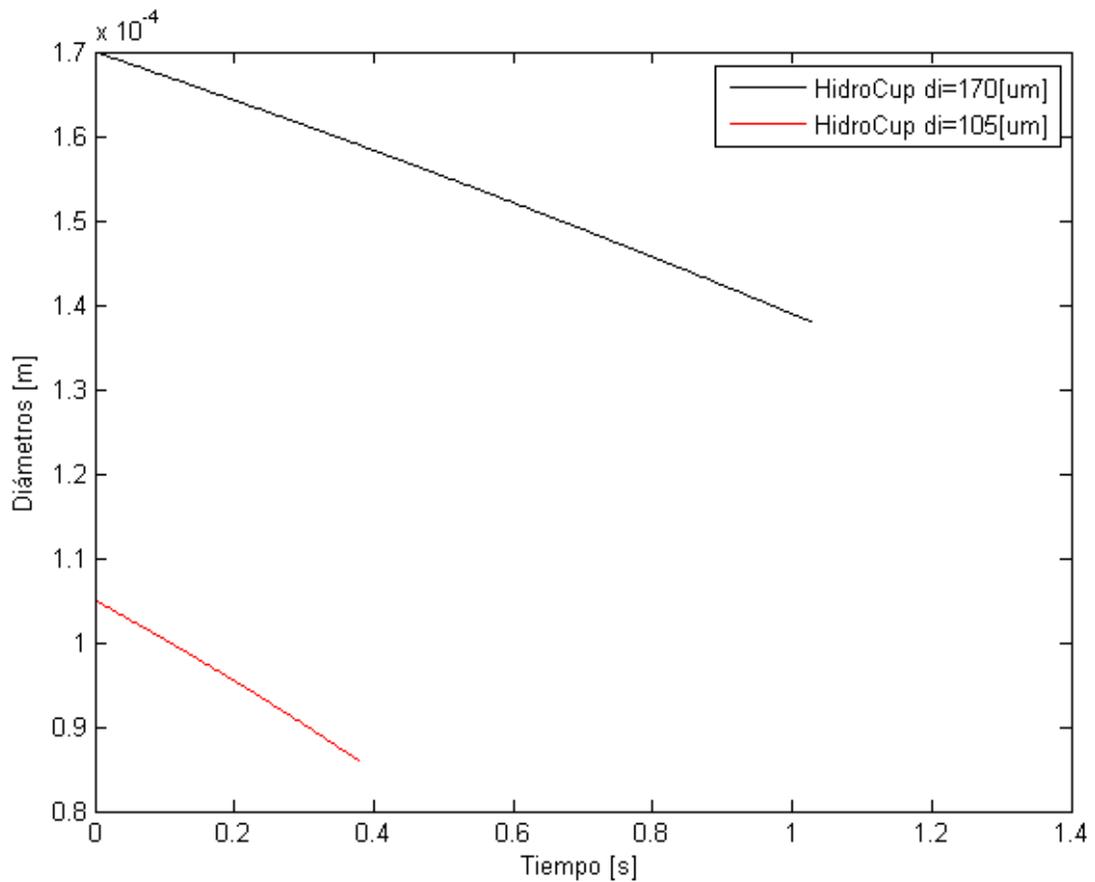


Figura 5: Curvas de secado teóricas para hidróxido de cobre para gotas generadas por transductores de 6[kHz] (curva color negro) y 17[kHz] (curva color rojo).

Los diámetros finales se obtuvieron considerando los diámetros iniciales  $di_1 = 170[\mu m]$  y  $di_2 = 105[\mu m]$ . en conjunto con las ecuaciones (12), (13) y (14), y considerando un porcentaje de sólidos de 54%, medido en el laboratorio con una Termo-balanza “Mettler Toledo modelo HR73 “Halogen Moisture Analyzer”.

El coeficiente de Difusión para el HidroCup fue estimado como se muestra en el anexo 2.

A continuación se muestra la Tabla III con los valores de los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla III: valores de los parámetros utilizados en la simulación de secado de gotas de HidroCup.

HidroCup 54%	
$T$	433,15 [°K]
$R$	8,3144[Pa · m <sup>3</sup> /(K · mol)]
$\rho_p$	1250 [kg/m <sup>3</sup> ]
$d_i$	170 [ $\mu m$ ], 105[ $\mu m$ ]
$d_f$	138 [ $\mu m$ ], 86[ $\mu m$ ]
$D_v$	1,65 · 10 <sup>-7</sup> [m <sup>2</sup> /s]
$M$	0,061 [kg/mol]
$p$	100540 [Pa]
$p_s$	637432[Pa]

A continuación se muestra la Tabla IV con un resumen de datos relevantes para la simulación de curvas teóricas de secado para hidróxido de cobre.

Tabla IV: Parámetros de interés estimados para Hidróxido de cobre al 54% de sólidos.

Diámetros iniciales [ $\mu m$ ]	Diámetros finales [ $\mu m$ ]	Tiempo de secado [s]	Distancia mínima requerida [m]	Número de vueltas
170	74	1,03	5,15	2,7
105	67	0,38	1,90	1

En los ensayos de secado, se ha observado que las gotas describen trayectorias helicoidales, comenzando con un radio pequeño que en su descenso comienza a aumentar. Para efectos del cálculo de número de vueltas se considera un radio de giro promedio de las gotas de 0,3 [m].

### **3.1.3 Incorporación de Temperatura variable al modelo teórico.**

En el modelo aplicado se considera la temperatura del entorno constante, esto es una aproximación válida para tiempos muy pequeños o velocidades de flujo lo bastante pequeñas como para que la gota no alcance a percibir un gradiente de temperatura considerable. Pero, ¿qué pasaría si la gota necesitase de un tiempo de secado mayor, de manera que necesite de mayor distancia para su secado? Entonces tendríamos que en su recorrido la partícula se enfrentaría a una temperatura que va decreciendo, por lo que se debe incorporar al modelo una temperatura variable, con un comportamiento decreciente.

Por otra parte, la presión de saturación de vapor  $p_s$  también se convierte en una variable, ya que, depende de la temperatura, de esta forma, al disminuir la temperatura, también lo hace  $p_s$ .

Según datos obtenidos de presión de saturación en función de la temperatura de la referencia [7], se realiza un ajuste en Matlab para obtener una expresión matemática que nos sirva para calcular dicha presión de saturación para cualquier temperatura.

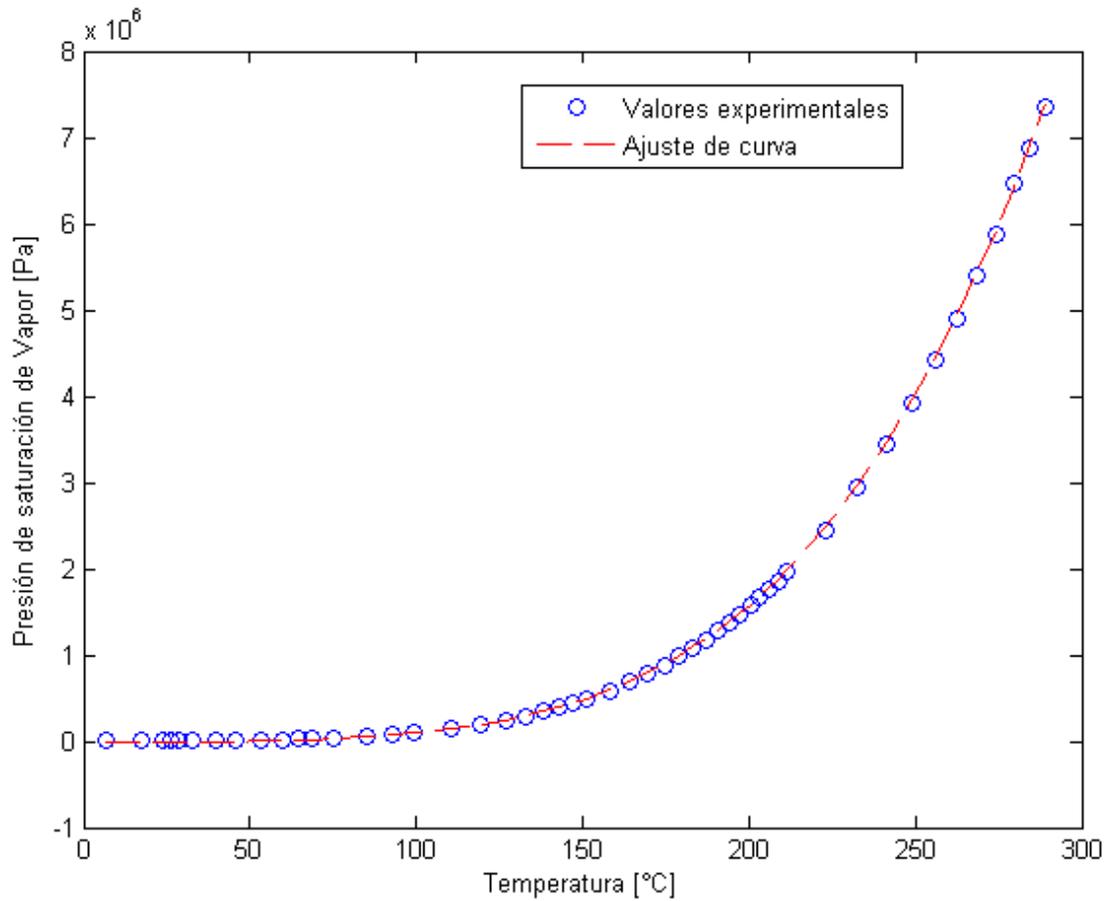


Figura 6: Valores experimentales de presión de saturación en función de la temperatura [7] (círculos azules), junto con el ajuste realizado con Matlab (línea punteada roja).

La expresión matemática obtenida para la presión de saturación en función de la temperatura es la siguiente:

$$Ps(T) = p_1 * T^4 + p_2 * T^3 + p_3 * T^2 + p_4 * T + p_5 \quad Ec(15)$$

Dónde

$$p_1 = 0,001439, \quad p_2 = -1,732, \quad p_3 = 790,6$$

$$p_4 = -1,618 * 10^5, \quad p_5 = 1,248 * 10^7$$

Una vez obtenida esta ecuación, podemos introducir al modelo una variación lineal de la temperatura en el eje  $z$ , es decir, considerar que la gota se enfrenta a una disminución de la temperatura a medida que comienza a descender en espiral por la cámara de secado y obtener una nueva curva teórica de la evolución temporal del diámetro de la gota en función del tiempo.

### Agua de mar:

Para la simulación de la curva teórica del secado de gotas de agua de mar, se considera un gradiente de temperatura dentro de la cámara de secado desde 200[°C] hasta 170[°C], que corresponde al gradiente medido en los ensayos de secado realizados.

Para agua de mar con un diámetro inicial de 63[ $\mu\text{m}$ ] tenemos la curva que se muestra en la figura (7).

El gráfico muestra el diámetro de una gota de agua de mar en metros (eje Y, multiplicado por  $10^{-5}$ ) frente al tiempo en segundos (eje X). Se comparan dos condiciones de temperatura: una constante a 200°C (línea roja) y una que decrece desde 200°C hasta 170°C (línea azul punteada). Ambas curvas comienzan en un diámetro de  $6.3 \times 10^{-5}$  m a  $t=0$ . La curva roja termina a  $t \approx 1.3$  s con un diámetro de  $2.3 \times 10^{-5}$  m. La curva azul punteada termina a  $t \approx 2.6$  s con un diámetro de  $2.3 \times 10^{-5}$  m.

Tiempo [s]	Diámetro [m] ( $\times 10^{-5}$ ) - T=200[°C]	Diámetro [m] ( $\times 10^{-5}$ ) - T° decreciente de 200[°C] a 170[°C]
0	6.3	6.3
0.5	5.2	5.4
1.0	3.8	4.5
1.3	2.3	-
2.0	-	3.0
2.6	-	2.3

Figura 7: Curva de secado para una gota de agua de mar de diámetro inicial 63[ $\mu\text{m}$ ] a temperatura constante (rojo) y para temperatura decreciente desde 200[°C] a 170[°C] (azul punteada).

Como se puede observar en la figura (7), el tiempo de secado de la gota de agua de mar aumenta al considerar un gradiente de temperatura decreciente durante su trayecto, obteniendo un nuevo tiempo de secado de

31

aproximadamente 2,5 [s] que corresponde casi al doble del tiempo de secado si consideramos la temperatura constante (1,35 [s]).

### **Para HidroCup:**

Para la incorporación de la temperatura variable en la simulación del secado de gotas de HidroCup, se considera un gradiente de temperatura desde 160[°C] a 110[°C], que corresponde al gradiente de temperatura observado en los ensayos de secado entre la entrada y la salida de la cámara de secado.

A continuación se muestra la figura (8) en donde se observan las curvas de secado considerando temperatura constante a  $T=160[°C]$ , temperatura variable desde 160[°C] hasta 110[°C] y gotas de diámetro inicial de 170[ $\mu\text{m}$ ].

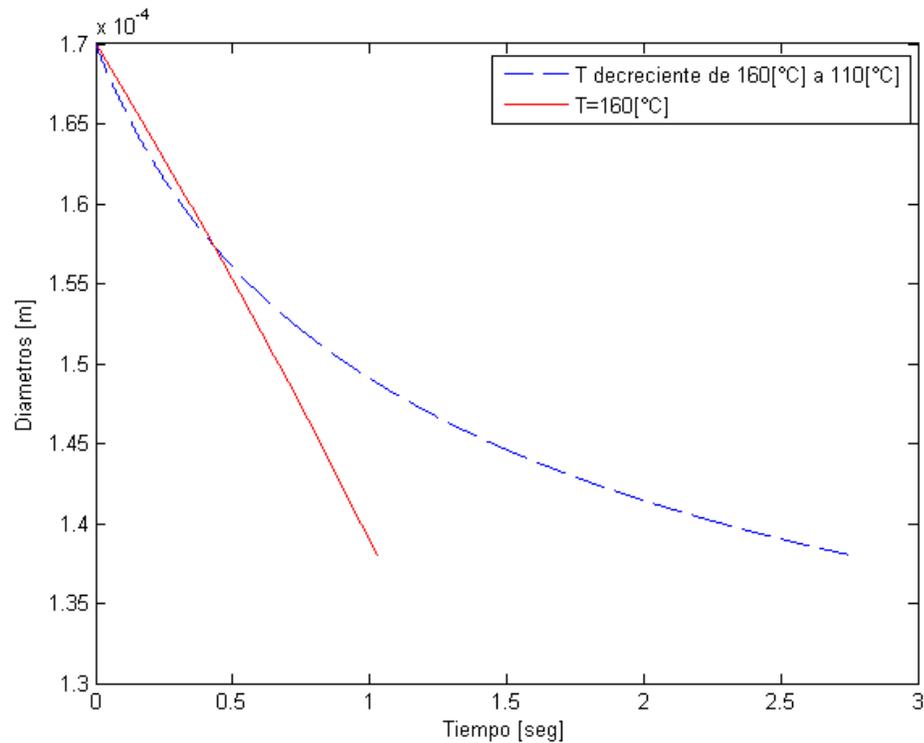


Figura 8: Curva de secado para una gota de HidroCup de diámetro inicial  $170[\mu m]$  a temperatura constante (rojo) y para temperatura decreciente desde  $160[^\circ C]$  a  $110[^\circ C]$  (azul punteada).

Podemos observar que el tiempo de secado al considerar un gradiente de temperatura es de  $2,76 [s]$ , siendo aproximadamente 2,5 veces más que el tiempo de secado si consideramos la temperatura constante ( $1,03 [s]$ ).

En la figura (9) se muestra las curvas de secado considerando temperatura constante a  $T=160[^\circ C]$ , temperatura variable desde  $160[^\circ C]$  hasta  $110[^\circ C]$  y gotas de diámetro inicial de  $105[\mu m]$ .

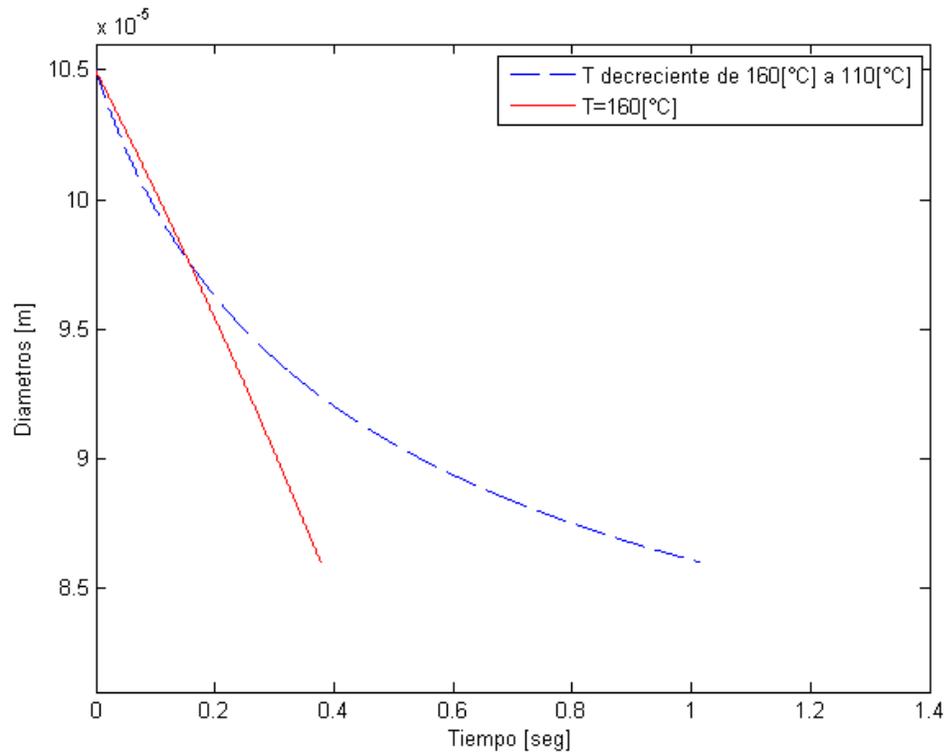


Figura 9: Curva de secado para una gota de HidroCup de diámetro inicial  $105[\mu\text{m}]$  a temperatura constante (rojo) y para temperatura decreciente desde  $160[^\circ\text{C}]$  a  $110[^\circ\text{C}]$  (azul punteada).

El tiempo de secado requerido al considerar un gradiente decreciente de temperatura, aumenta a  $1,01$  [s], siendo casi 2,7 veces más que el tiempo de secado al considerar la temperatura constante ( $0,38$  [s]).

### 3.1.4. Medición de tamaños de gránulo secados en el laboratorio.

#### 3.1.4.1. Agua de mar

El ensayo de secado fue realizado con una temperatura de secado de 200[°C], un caudal de alimentación de 2[l/h] y una frecuencia de operación del atomizador de 17[kHz], que genera en su mayoría gotas de diámetros iniciales de 63[μm].

En la figura (10) se muestran unas micrografías tomadas con el microscopio óptico del laboratorio Olympus BX51, de las muestras de partículas de sal secadas.

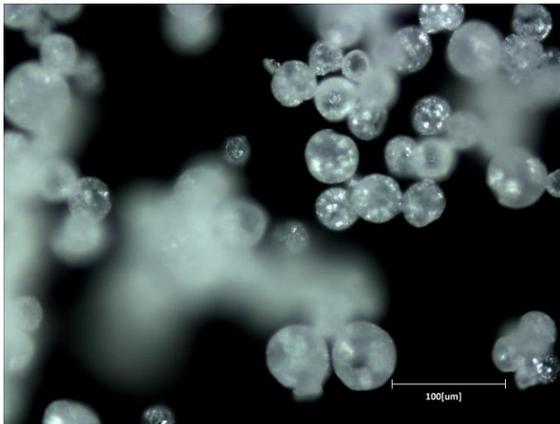


Figura (10.a): Micrografía de los gránulos de sales obtenidos con el sistema de secado del laboratorio, atomizado con el transductor de 17[kHz], con una magnificación de 10x

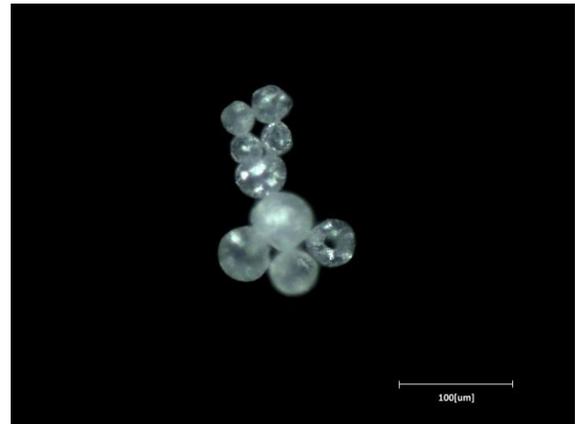


Figura (10.b): Micrografía de los gránulos de sales obtenidos con el sistema de secado del laboratorio, atomizado con el transductor de 17[kHz], con una magnificación de 10x

Como se observa en las figuras, las sales obtenidas en el secado de agua de mar poseen una morfología esférica. A partir de imágenes tomadas al polvo de sal obtenido, se determina su distribución de tamaños, que se muestra en la figura (11). La determinación de los tamaños se realiza mediante una medición manual en píxeles de los diámetros de los gránulos de las micrografías y

mediante una comparación con una escala patrón de longitud, se obtiene la conversión a micrómetros del diámetro de cada gránulo analizado.

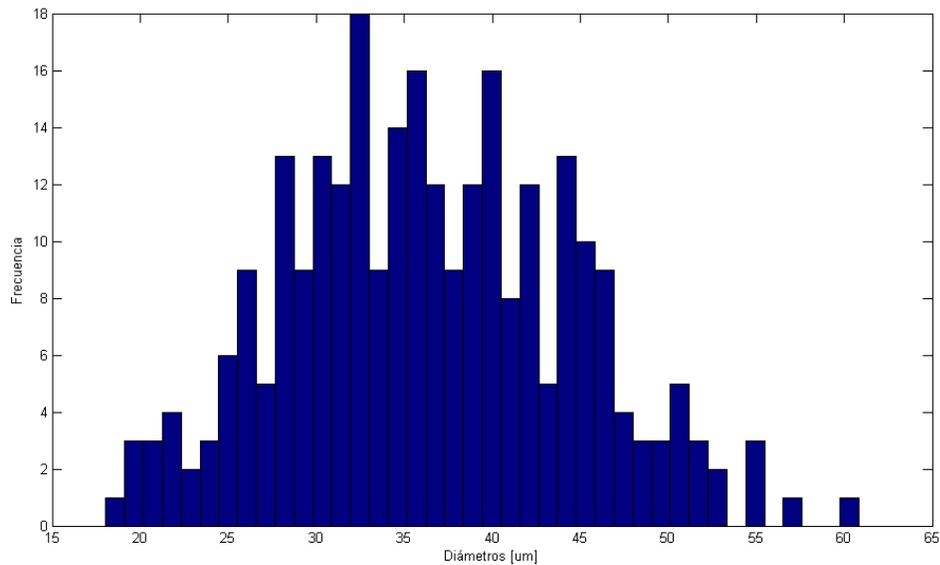


Figura 11: Distribución de diámetros de gránulos obtenidos del proceso de secado de gotas de Agua de mar, con diámetro inicial de 63[μm].

Como se observa en el histograma, el tamaño medido con mayor frecuencia dentro de las muestras analizadas fue de 33[μm].

En la Tabla V se muestra los parámetros de interés para el secado de Agua de mar.

Tabla V: Resumen de datos de interés para el secado de agua de mar.

Frecuencia .de Operación [kHz]	Diámetro inicial [μm]	Diámetro final estimado [μm]	Diámetro final medido [μm]	Promedio [μm]	Desviación Estándar. [μm]
17	63	23	33	36	8

### 3.1.4.2. HidroCup

Se toman muestras de los ensayos de secado realizados en el laboratorio con los transductores de 6[kHz] y 17[kHz] que generan los diámetros iniciales de gotas mencionados en el ítem anterior. La temperatura de secado fue de 160[°C], y el caudal de alimentación de líquido de 5,6 [l/h].

Se toman micrografías con el microscopio óptico del laboratorio para su posterior procesamiento con el fin de obtener un Histograma con la distribución de tamaños de gránulos que genera el sistema con cada transductor.

En la figura (12) se muestra dos imágenes del polvo de HidroCup, obtenidas con el Microscopio, para las dos frecuencias de operación.

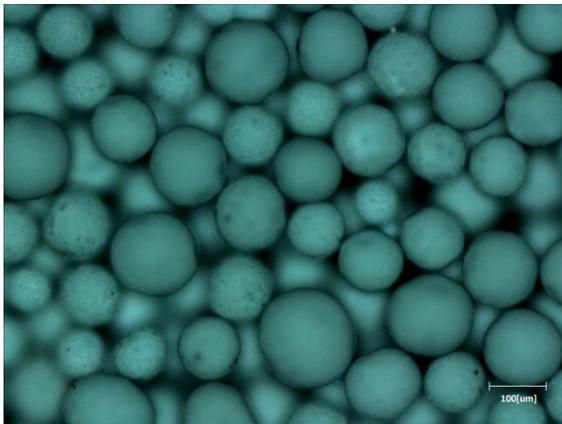


Figura (12.a): Micrografía de los gránulos de Hidróxido de Cobre obtenidos con el sistema de secado del laboratorio, atomizado con el transductor de 6[kHz], con una magnificación de 10x

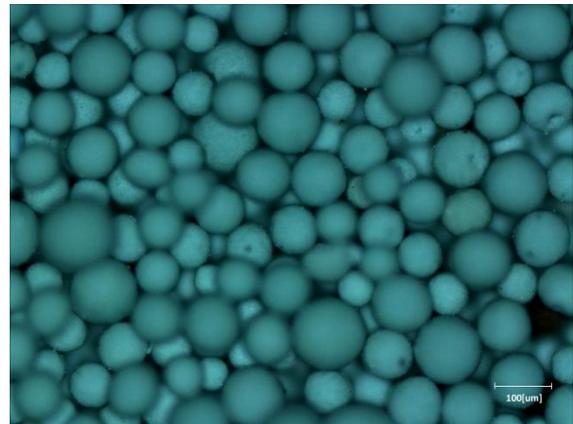


Figura (12.b) Micrografía de los gránulos de Hidróxido de Cobre obtenidos con el sistema de secado del laboratorio, atomizado con el transductor de 17[kHz], con una magnificación de 10x

Para los tamaños iniciales de  $170[\mu m]$  que corresponden a la atomización con el transductor de  $6[kHz]$  se obtuvo la distribución de tamaños que se muestra en la figura (13).

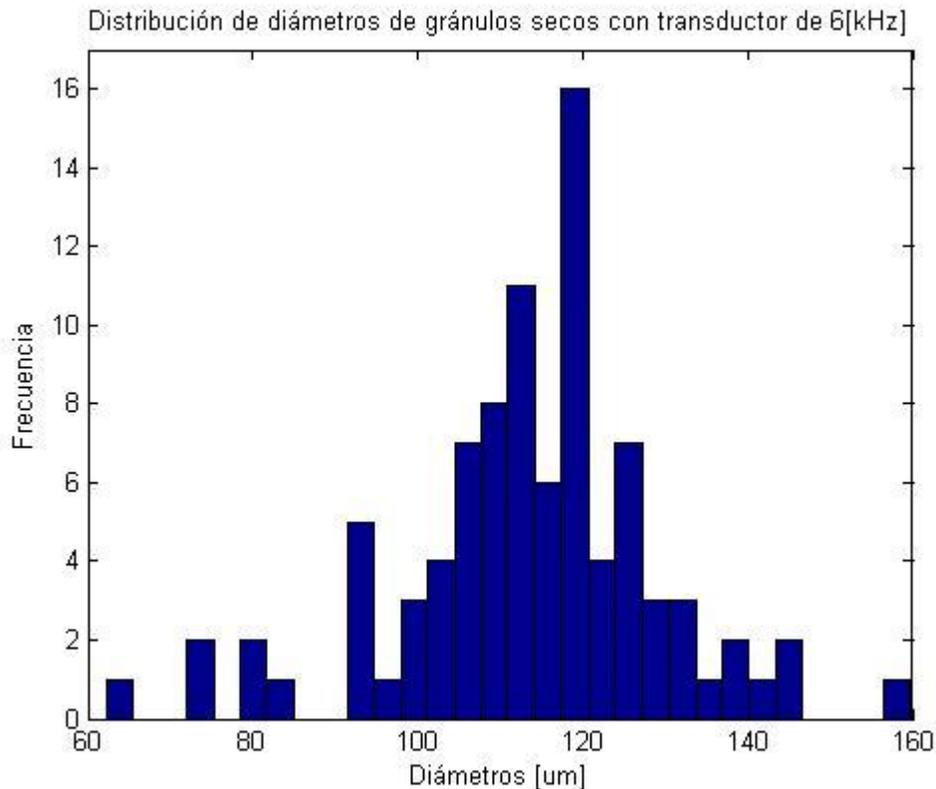


Figura (13): Distribución de diámetros de gránulos obtenidos del proceso de secado de gotas de HydroCup generadas con el transductor de  $6[kHz]$ .

Del Histograma podemos observar que el valor del diámetro que se presenta con mayor frecuencia dentro de la muestra analizada, es de  $120[\mu m]$  aproximadamente, mientras que en segundo lugar se encuentra el diámetro de  $110[\mu m]$ .

Por otra parte realizamos el mismo análisis de medición de diámetros para el caso de los gránulos obtenidos del sistema de secado de laboratorio con el

atomizador de 17[kHz] correspondientes a 105[ $\mu\text{m}$ ] de tamaño inicial de gota, obteniendo la distribución de tamaños que se muestra en la figura (14).

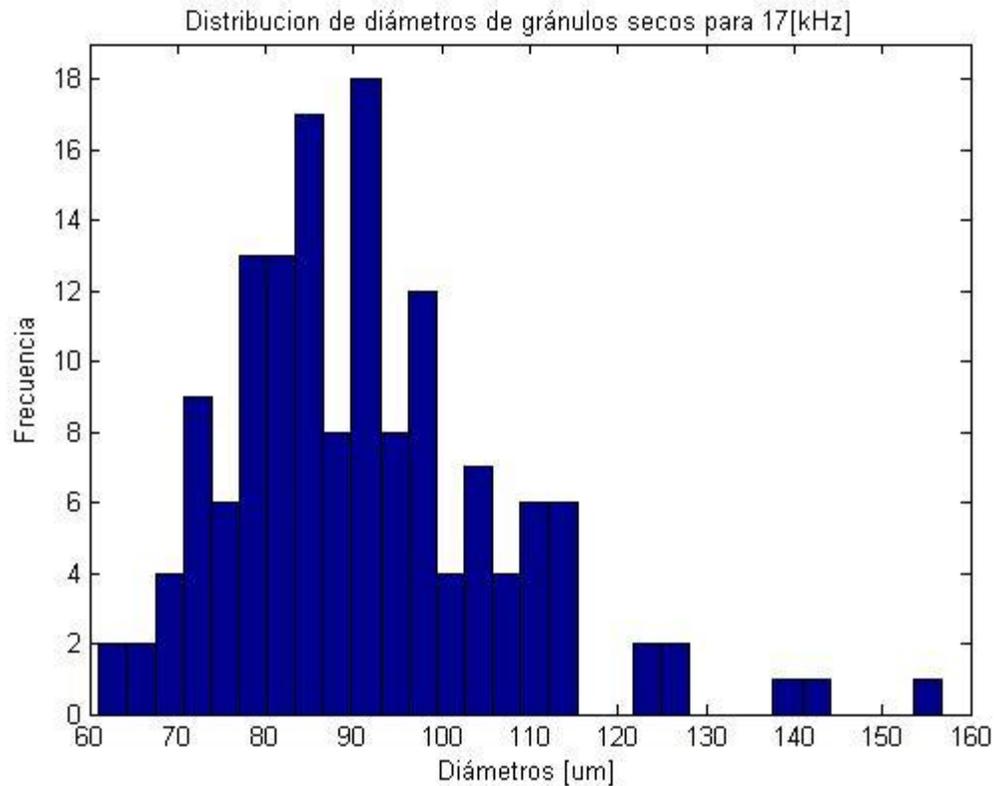


Figura (14): Distribución de diámetros de gránulos secos con el sistema de secado de laboratorio de HidroCup atomizado con el transductor de 17[kHz].

Del Histograma podemos observar que el diámetro que se presenta con mayor frecuencia es el de 91[ $\mu\text{m}$ ] seguido del diámetro de 85[ $\mu\text{m}$ ].

En la tabla VI se muestra una comparación de los valores de diámetros iniciales para las gotas generadas por los dos transductores atomizadores de 6[kHz] y 17[kHz] y los diámetros finales estimados teóricamente y medidos de forma experimental.

Tabla VI: Tabla comparativa de diámetros iniciales y finales para dos transductores atomizadores estimados de forma teórica y medidos experimentalmente.

Frecuencia de Operación [kHz]	Diámetro inicial [ $\mu m$ ]	Diámetro final estimado [ $\mu m$ ]	Diámetro final medido [ $\mu m$ ]	Promedio [ $\mu m$ ]	Desviación Estándar. [ $\mu m$ ]
6	170	74	120	114	21
17	105	67	91	91	26

Podemos observar que el diámetro final medido es siempre mayor al diámetro final estimado de forma teórica. Esto puede explicarse principalmente por dos motivos. El primero corresponde a que en la estimación teórica al considerar el volumen final como una porción del volumen inicial que depende del porcentaje de sólidos presente en la gota, se está considerando que los sólidos se ordenan de manera casi perfecta para formar un gránulo compacto y sólido de un volumen final que corresponde, en el caso del hidróxido de cobre, a un 54% del volumen inicial, mientras que para el agua de mar corresponde a un 4,8% del volumen inicial. En cambio, en la realidad, pareciera que ese ordenamiento de los sólidos durante el proceso de secado no logra formar un gránulo perfectamente sólido y compacto de un volumen final proporcional al porcentaje de sólidos, si no que posiblemente se genera un gránulo que puede contener algunos pequeños meniscos de vapor de agua atrapados en su interior que contribuyen a un volumen final del gránulo mayor al estimado de forma teórica. Además en la práctica la evaporación del agua de la gota no es total, ya que el gránulo obtenido presenta una humedad que varía entre 2 y 7%.

El segundo motivo posible, que hace que los diámetros de los gránulos medidos experimentalmente sea mayor al diámetro estimado de forma teórica es que al momento de atomizar el líquido dentro de la cámara de secado, se genere una coalescencia entre las gotas generadas por el atomizador, producto del

movimiento del flujo de aire al que se ven expuestas, esto produciría un diámetro inicial de gotas mayor al considerado al momento de realizar la estimación teórica.

## **Capítulo 4: Simulaciones**

### **4.1 Simulación del secador de laboratorio:**

Existen condiciones dentro del proceso de secado spray que hacen que no sea fácil de observar, por ejemplo, los experimentos pueden presentar dificultades de espacio o condiciones ambientales como altas temperaturas que harían dificultosa la observación. Por ejemplo, no siempre se pueden instalar cámaras de video o sensores con las condiciones técnicas necesarias para observar ciertos comportamientos durante el desarrollo del fenómeno estudiado. Por eso se hace necesario realizar simulaciones, con programas adecuados, que permitan modelar el fenómeno en estudio y simular la respuesta de este modelo frente a condiciones similares a las del fenómeno real.

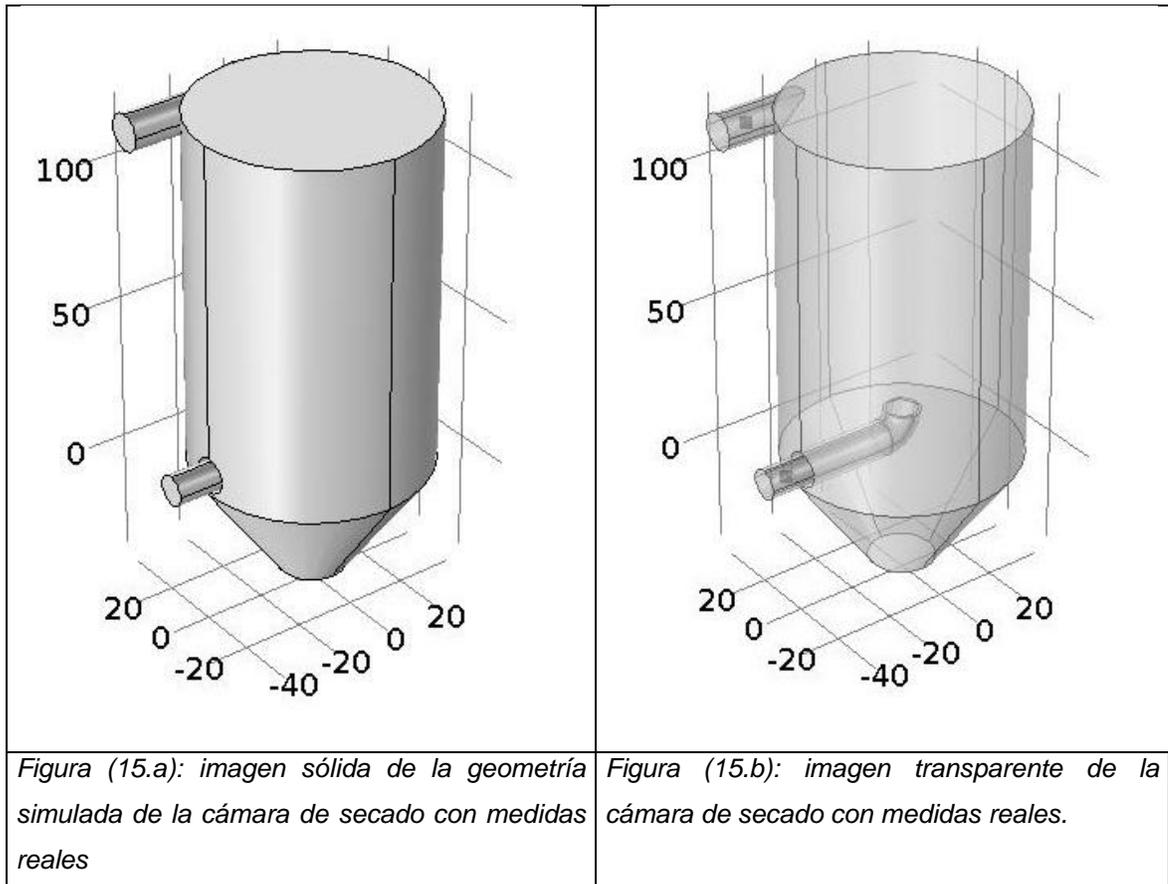
Por ejemplo, podemos estar interesados en saber cómo se comporta el aire dentro de la cámara de secado. También podría ser de interés saber cómo se distribuye el calor de este aire caliente (aire de secado) dentro de la cámara, etc.

Es por ello que se realiza una simulación de la cámara de secado del laboratorio considerando su geometría y medidas reales.

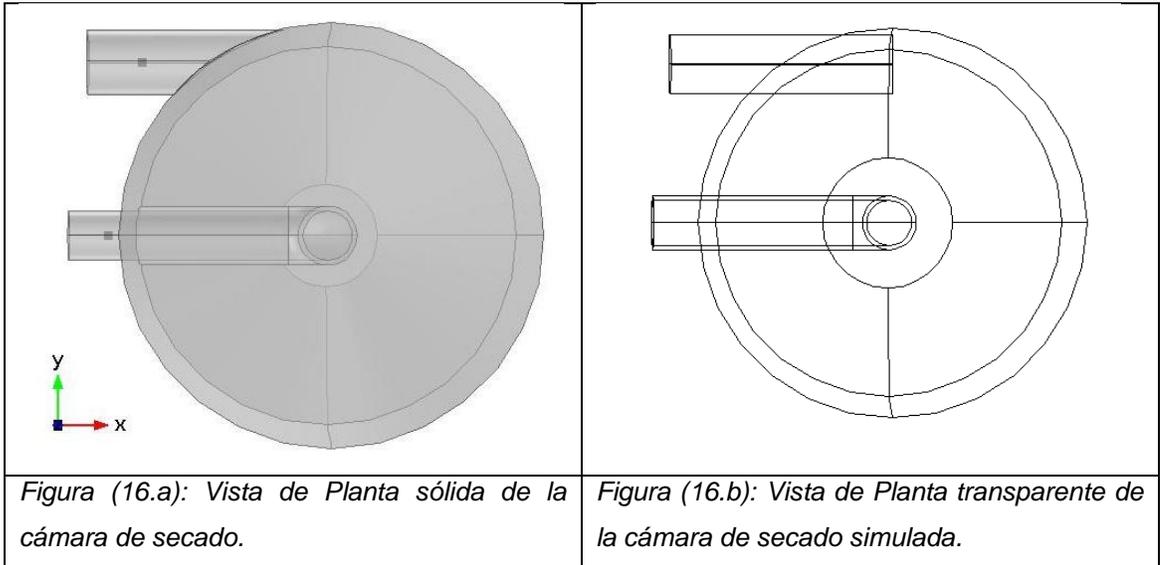
El método más idóneo para este tipo de fenómenos como comportamiento de fluidos, intercambios de calor, es el Método de Elementos Finitos (MEF).

La simulación se realiza con el programa COMSOL Multiphysics. Dicho programa utiliza el método de elementos finitos para simular cómo se comportan las variables que se deseen estudiar.

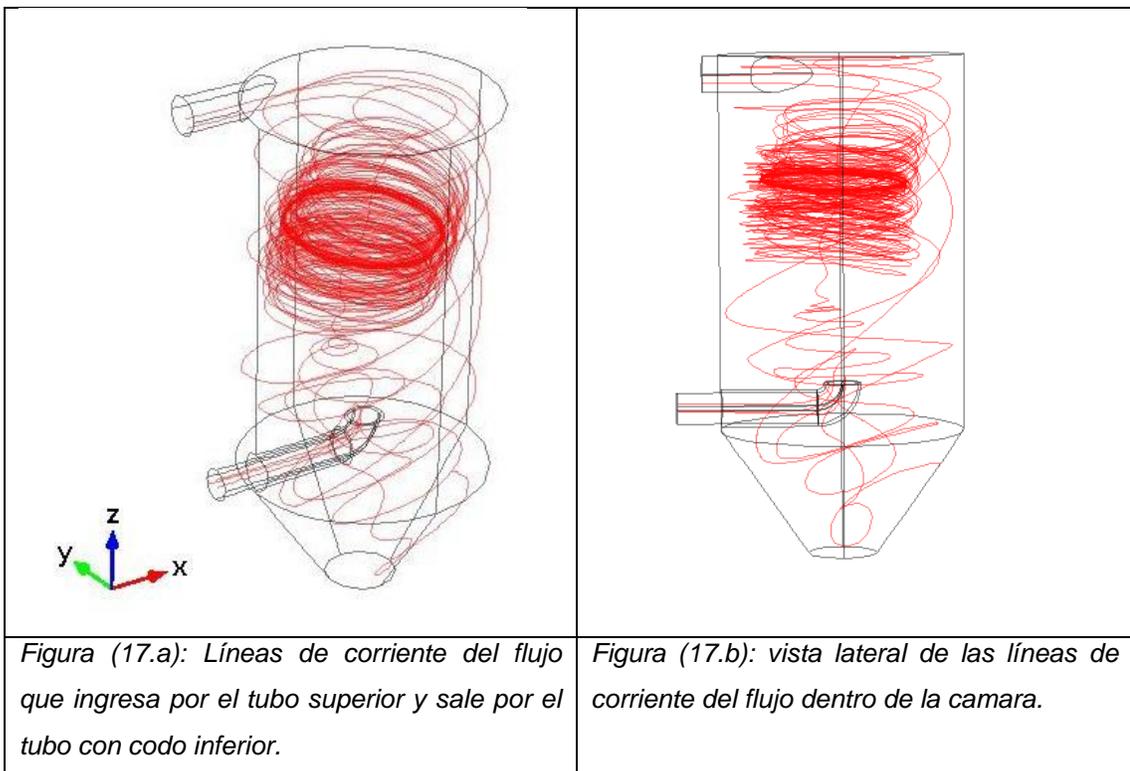
En las figuras (15a) y (15b) se muestran algunas imágenes de la geometría de la cámara de secado de laboratorio simulada con las medidas reales.



En la figura (16) se muestra una vista de planta de la geometría de la simulación:

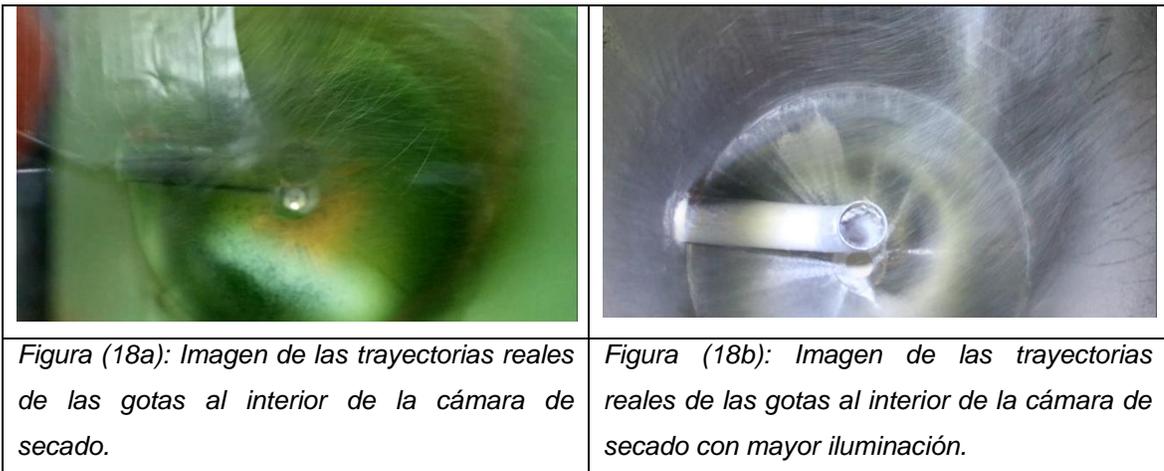


En la figura (17) se muestran los resultados de la simulación en COMSOL en donde se busca observar cómo se comporta el flujo dentro del secador.



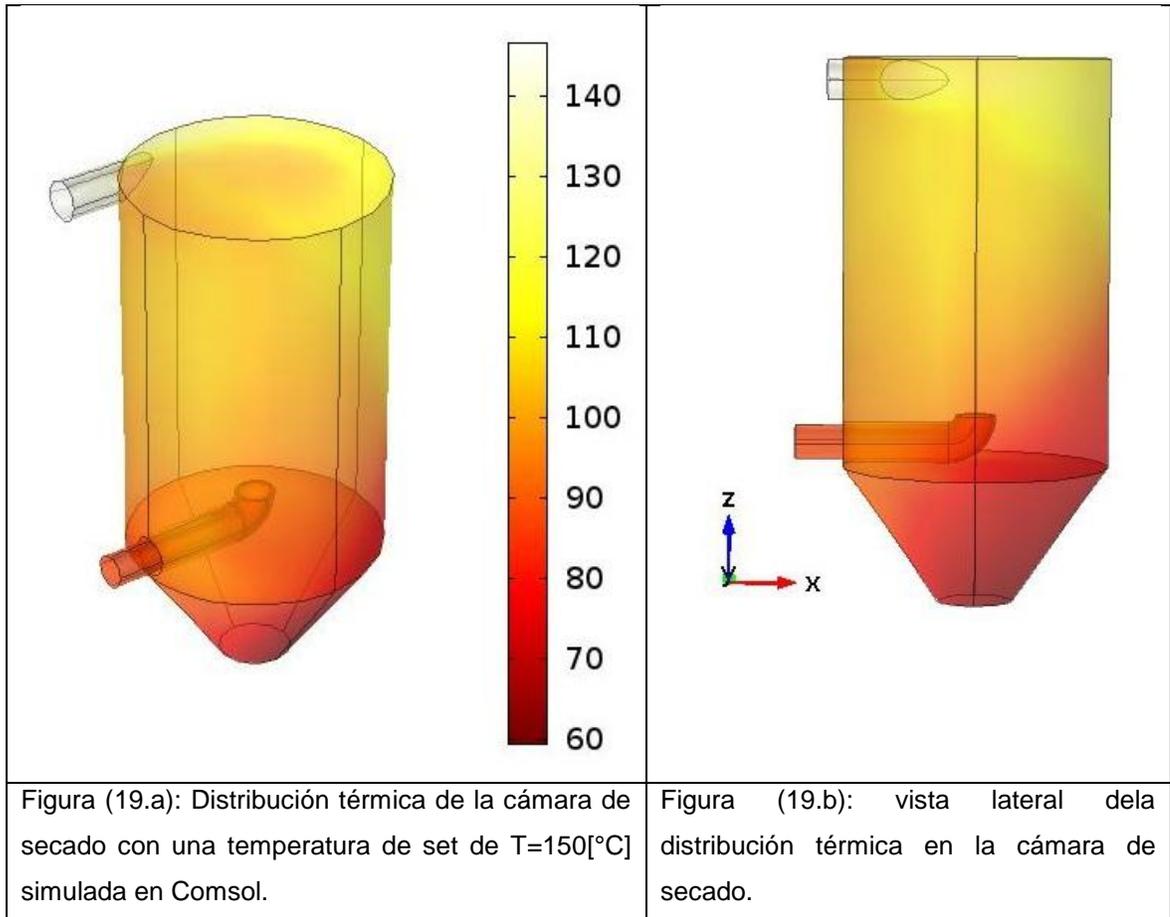
De la figura (17) podemos observar que el flujo dentro de la cámara entra por el tubo superior, realiza movimientos circulares mientras realiza el descenso, y sale por el tubo con el codo inferior.

En la figura (18) se muestran imágenes del interior del secador, donde se puede apreciar, en parte, el movimiento real que tienen las gotas.



Podemos observar que las trayectorias de las gotas siguen un movimiento circular o helicoidal en su descenso por la cámara.

En la figura (19) se muestra una simulación de la distribución térmica dentro de la cámara de secado con un estudio dependiente del tiempo en un rango de (0[s]-1000[s]), considerando el comportamiento de la temperatura de entrada entregada por el sistema de control de temperatura, que fue medido y ajustado en Matlab como se muestra en el capítulo 5.



En la figura (20) se muestra una gráfica de temperatura versus tiempo obtenida de la simulación en Comsol, esta gráfica muestra la temperatura en la entrada y en la salida del sistema de secado en conjunto con el ajuste de temperatura de entrada y salida obtenidos de la medición mostrada en el capítulo 5.

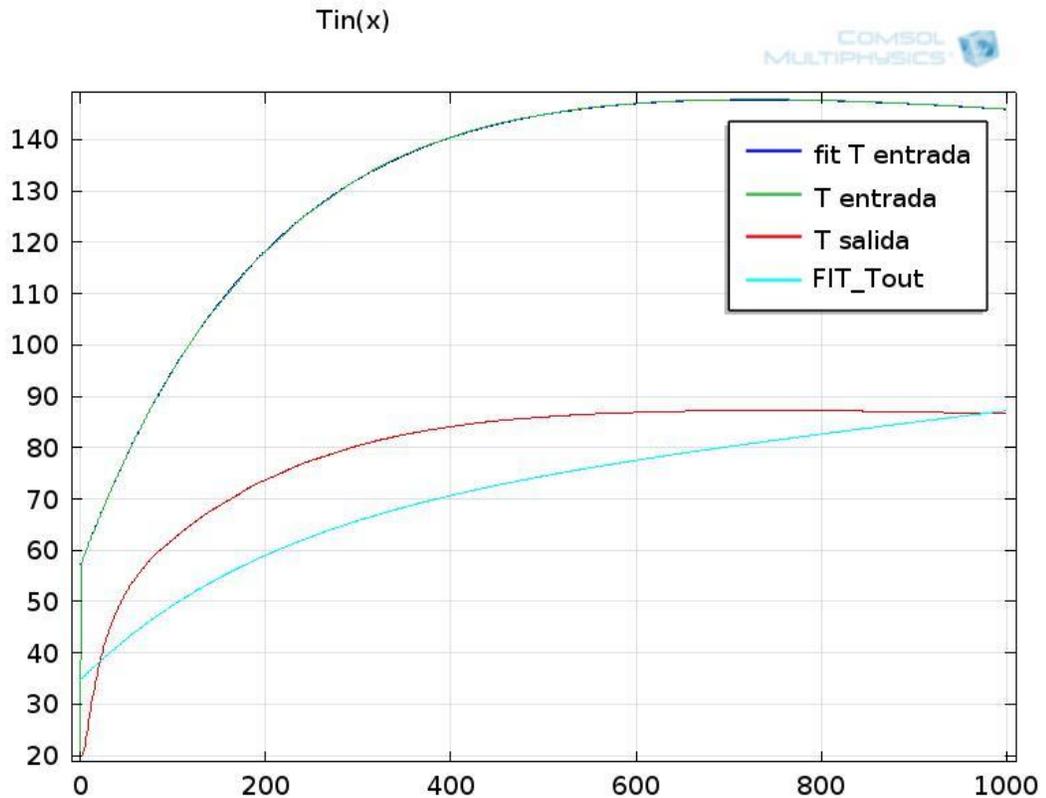


Figura 20: Curvas de temperatura de entrada y salida de la cámara de secado en función del tiempo obtenidas de la simulación en COMSOL.

De la figura (20) se observa que la temperatura de salida simulada se comporta de manera similar a la medida, lo que indica que la simulación térmica de la cámara de secado, se asimila al comportamiento térmico de la cámara real, a pesar de que muestra una estabilización de la temperatura de salida a partir de los 500[s] aproximadamente que en la realidad demora más tiempo en alcanzar. En la figura (21) se muestra una secuencia del comportamiento térmico en el tiempo de la simulación de la cámara de secado.

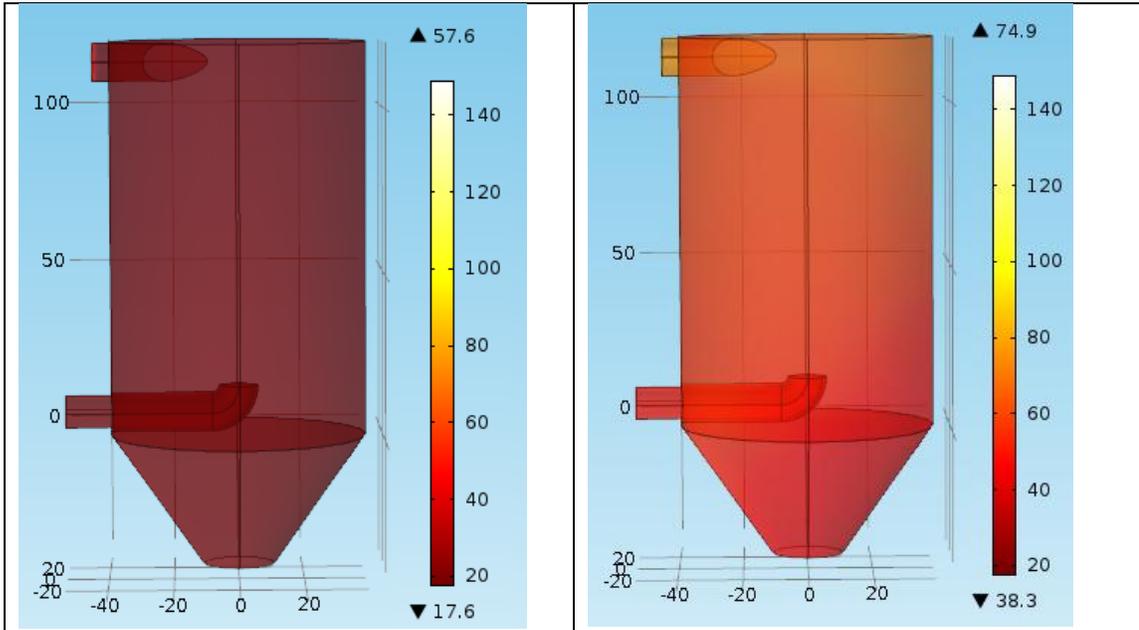


Figura (21.a): Distribución térmica en la cámara de secado a tiempo 0[s].

Figura (21.b): Distribución térmica en la cámara de secado a tiempo 40[s].

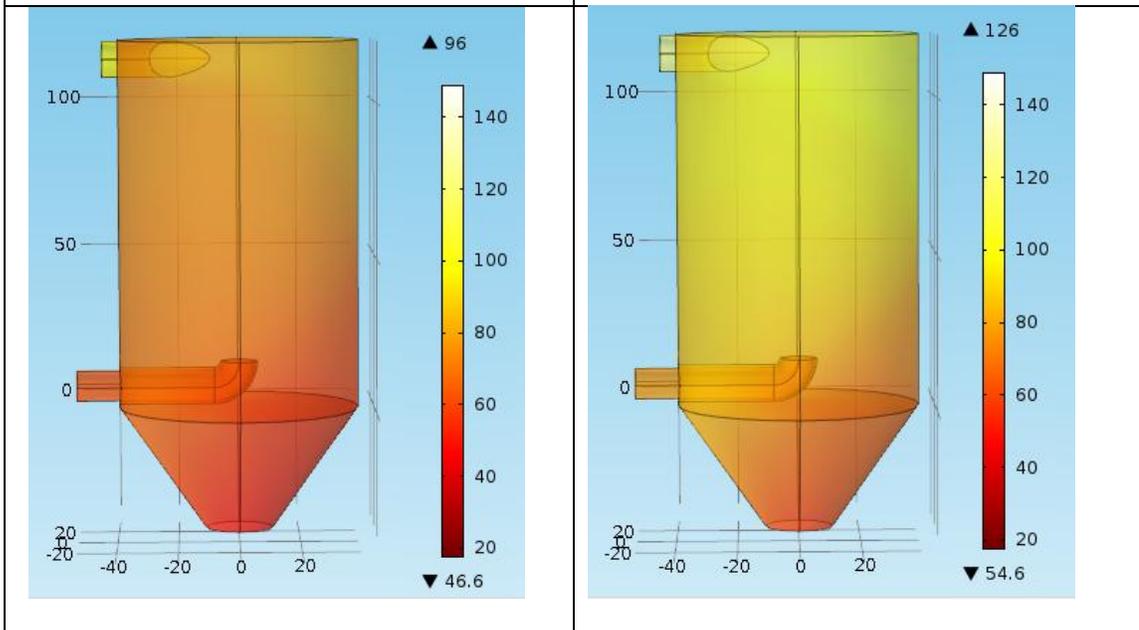
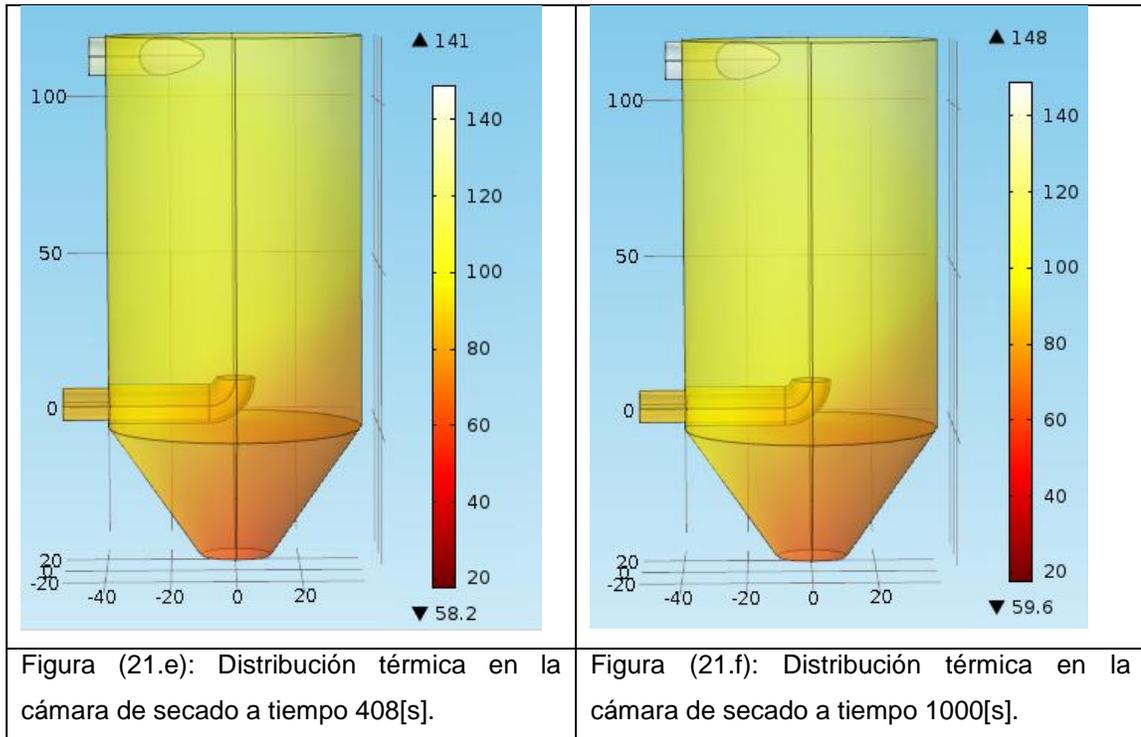


Figura (21.c): Distribución térmica en la cámara de secado a tiempo 100[s].

Figura (21.d): Distribución térmica en la cámara de secado a tiempo 244[s].



Observamos que entre las figuras (21e) y (21f) no existe una gran diferencia entre sus distribuciones de temperatura, esto se debe a que en la simulación realizada, la temperatura de salida logra una cuasi estabilización al tiempo 500[s] aproximadamente.

## **Capítulo 5: Sistema de Secado spray de Laboratorio**

Las mediciones que se mostrarán en capítulos posteriores fueron realizadas en un sistema de secado desarrollado en el Laboratorio de Ultrasonidos de la Universidad de Santiago de Chile.

Dicho sistema de secado de laboratorio se compone de:

### **5.1 Cámara de secado**

Una cámara de secado de fierro diseñada en el laboratorio y enviada a fabricar a un lugar externo a la universidad. Posteriormente, la cámara es aislada térmicamente en el laboratorio recubriéndola con fibra de alúmina y otros materiales aislantes térmicos. Ésta cámara posee una entrada superior de aire caliente (aire de secado), una salida en la parte media-baja donde se extrae el vapor de agua y una salida del gránulo seco en la parte inferior.

### **5.2 Calefactor eléctrico trifásico**

Adosado a la entrada de aire se encuentra un calefactor eléctrico trifásico, diseñado por el laboratorio de ultrasonidos y fabricado en el departamento de metalurgia.

### **5.3 Sistema de Control de Temperatura**

Para controlar la temperatura del calefactor se diseñó en el laboratorio un sistema de control PID que lleva el calefactor a la temperatura deseada ( $T^{\circ}$  set) manteniéndola en un rango de temperaturas programado, debido a que se trata de un sistema “on-off”. Para monitorear estas temperaturas, la cámara de secado ha sido dotada de dos termopares tipo K, uno de los sistemas se encuentra instalado en el tubo de entrada del aire caliente, y el otro se encuentra en el tubo de salida.

#### **5.4 Extractor de aire**

En el conducto de salida de la cámara de secado, situado en la parte media baja de la cámara, se encuentra una turbina, éste es el elemento encargado de succionar el aire para generar la circulación del mismo y la presión negativa dentro de la cámara de secado, aproximadamente 80[mm] columna de agua por debajo de la presión atmosférica.

#### **5.5 Sistema de Potencia Transductor Ultrasónico**

La atomización del líquido se produce con un transductor ultrasónico de potencia diseñado y fabricado en el laboratorio de ultrasonidos, para alimentar y hacer funcionar el transductor se necesita de un sistema de generación de señales y amplificación controlables.

#### **5.6 Bomba de alimentación al transductor**

Para llevar el líquido a secar desde el depósito hasta donde se encuentra el atomizador (una altura de 2 metros aproximadamente respecto del depósito) se necesita de una bomba de alimentación adecuada para la naturaleza de los líquidos a secar, (abrasivos o no abrasivos, con sólidos en suspensión o no, etc). Para nuestro caso, se utiliza una bomba de cavidad progresiva.

#### **5.7 Bomba de sistema de refrigeración para el transductor**

Por el hecho de tener parte del cuerpo del transductor en contacto con el aire de secado a alta temperatura y producto del propio calentamiento debido a su funcionamiento, es necesario un sistema de refrigeración que se encargue de mantener el transductor dentro de la temperatura óptima de funcionamiento. La bomba que se utiliza para la circulación de la refrigeración es de tipo peristáltica.

## **Capítulo 6: Caracterización experimental del secador de laboratorio.**

### **6.1 Parámetros que influyen en el proceso de secado**

Los parámetros más relevantes que influyen en el proceso de secado corresponden a: la velocidad y temperatura del aire de secado, la presión interna de la cámara, el caudal de alimentación del líquido a secar y el tamaño inicial de las gotas atomizadas.

### **6.2 Medición de velocidad de flujo con tubo de Pitot.**

El tubo de Pitot es un instrumento que mide de forma indirecta la velocidad de un fluido, a través de la medición de la presión diferencial en dos puntos, un punto de medición está en la punta del tubo y de frente al fluido que se desea medir (Presión total), mientras que el otro punto de medición está alrededor del tubo situándose de forma perpendicular al flujo a medir (Presión estática), la diferencia entre estas dos presiones nos entrega la presión dinámica, con la cual se puede estimar la velocidad del flujo.

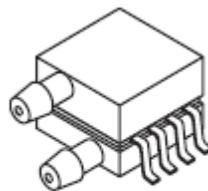
El tubo de Pitot que se construyó en el laboratorio fue basado en las dimensiones y proporciones que entrega la norma (ANSI/AMCA 210-85) [8]. Para facilitar la construcción en el taller mecánico, no se construyó un tubo de Pitot idéntico al que se sugiere en dicha norma, debido a que no se realizó la curva en el doblez sino que se reemplazó por un ángulo recto. Esta modificación en la geometría podría generar pérdidas de carga en la presión del flujo a medir, lo que podría generar una medición menor a la real.

A continuación se muestra en la figura (22) una imagen del tubo de Pitot construido:



Figura (22): imagen del tubo de Pitot de cabeza semi-esférica construido en el laboratorio.

Por otra parte es necesario contar con un instrumento con el que se calcula la velocidad del aire a partir de las diferencias de presión que nos entregan el tubo de Pitot. Para ello se utiliza un Sensor de Presión Diferencial **MPXV7002DP** que se muestra en la figura (23):



**MPXV7002DP**  
**CASE 1351-01**

Figura (23): Sensor Diferencial de Presión MPXV7002DP utilizado para medir la presión entregada por el tubo de Pitot.

Este sensor mide la presión diferencial entre las dos entradas que posee, donde en una llega la presión total proveniente del tubo de Pitot y en la otra la presión estática proveniente del mismo y al hacer la diferencia entre las dos presiones entrega el voltaje de salida correspondiente.

En la figura (24) se muestra el circuito que recomienda el fabricante para el uso del sensor de presión.

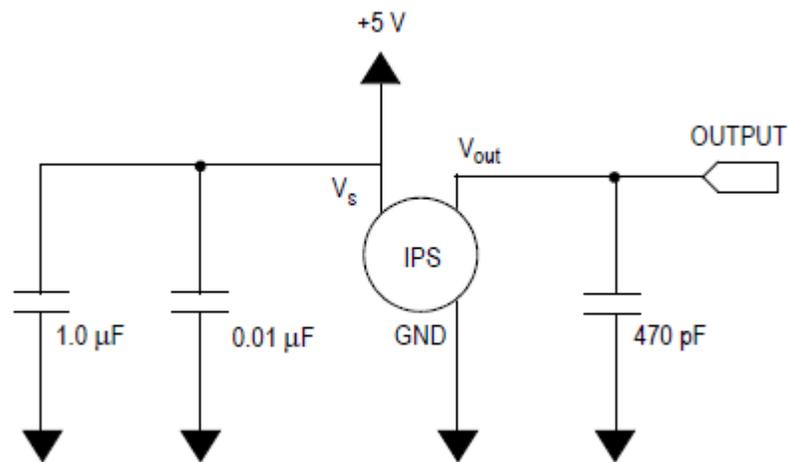


Figura (24): circuito sugerido por el fabricante para el funcionamiento del sensor de presión MPXV7002DP.

Para realizar las mediciones, se coloca el tubo de Pitot de frente al tubo de entrada de aire, pocos centímetros antes de que el aire entre a la cámara de secado.

Después de ajustar el aire de entrada con un limitador de flujo en la toma de aire del calefactor, se realiza la medición, arrojando un valor promedio de velocidad de entrada del flujo de 5[m/s].

## **6.3 Medición de Temperatura**

### **6.3.1 Curva de calentamiento del secador:**

Para medir la curva de calentamiento del secador se realizan mediciones de la temperatura del flujo de entrada y de salida sin líquido atomizado y en condiciones similares a las de secado.

Las curvas de calentamiento del aire de entrada y salida son importantes para poder determinar las pérdidas de calor del sistema, ya sea, absorbido por el metal del secador o emitidas hacia el exterior. Este calor no estará disponible para ser absorbido por las gotas en el proceso de secado.

Para la medición, se configuró la temperatura del calefactor a 200[°C] y se monitorearon los parámetros de temperatura de entrada y salida del aire en función del tiempo. Estos datos fueron registrados para posteriormente ser graficados y así obtener la curva de calentamiento del secador. Los resultados se muestran en la figura (25):

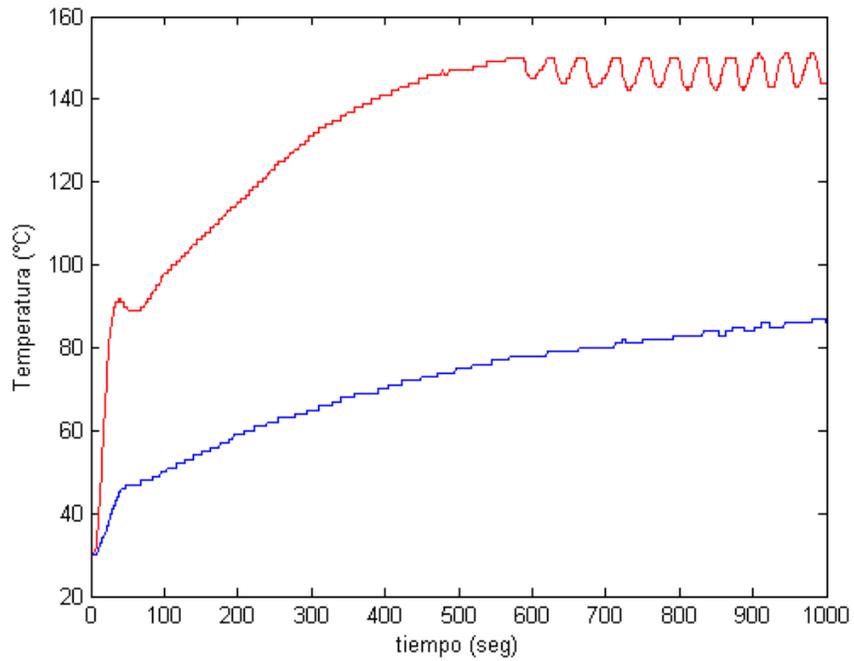


Figura (25): Curvas de calentamiento Temperatura entrada (curva roja), Temperatura de salida (curva azul).

### 6.3.2 Curva de ajuste de temperatura de entrada

En la figura (26) se muestra el ajuste realizado en Matlab de la curva de calentamiento del secador correspondiente a la temperatura de entrada.

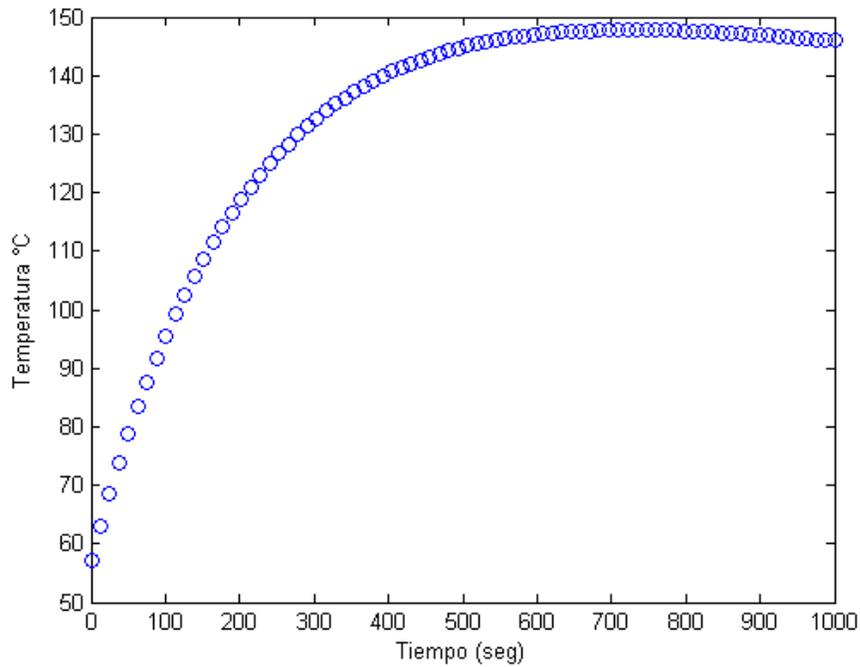


Figura (26): Curva de ajuste realizada con Matlab según los datos experimentales medidos de temperatura de entrada.

La ecuación que describe esta curva es la siguiente:

$$T_{in}(t) = Ae^{Bt} + Ce^{Dt} \quad Ec(16)$$

Donde los factores A, B, C, D tienen los siguientes valores:

$$A = 164$$

$$B = -0,00011$$

$$C = -106,8$$

$$D = -0,004662$$

En la figura (27) se muestra ambas curvas para observar de mejor forma el ajuste.

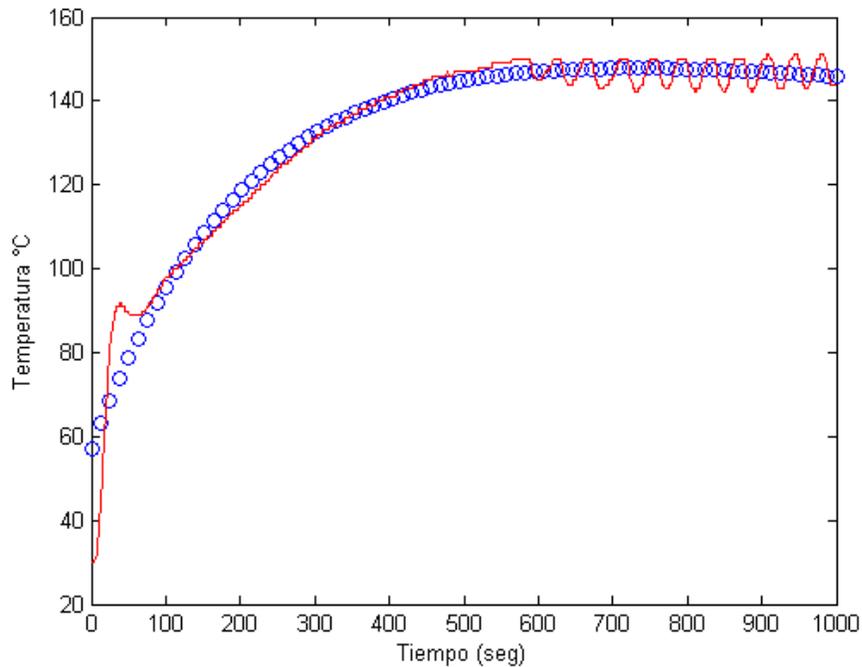


Figura (27): Curvas de calentamiento de Temperatura de entrada medida experimentalmente (Línea continua roja) y curva obtenida del ajuste de Matlab (círculos azules).

Según los datos entregados por el ajuste en Matlab, esta curva tiene un coeficiente de correlación de  $R = 0,95$ .

Además observamos que el sistema alcanza la temperatura deseada aproximadamente a los 600[s] desde el inicio, 10[*min*]. Luego de esto comienza a oscilar en torno a la temperatura de set, que para esta medición fue de  $T = 150[^\circ\text{C}]$ .

### 6.3.3 Curva de ajuste de temperatura de salida

En la figura (28) se muestra la curva de ajuste realizada en Matlab para los datos de temperatura de salida durante el calentamiento del secador obtenidos experimentalmente.

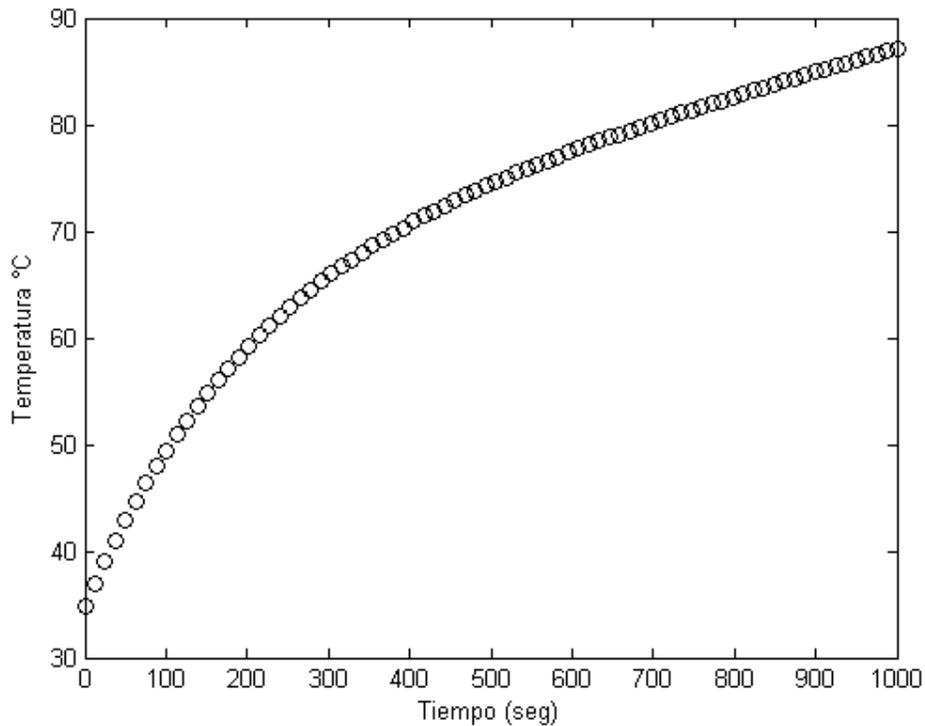


Figura (28): Curva de ajuste realizada con Matlab según los datos experimentales de temperatura de salida medidos.

La ecuación, que describe esta curva de calentamiento correspondiente a la temperatura de salida, tiene una forma similar a la que describe la temperatura de entrada *Ec.(16)*, sólo difiere en los valores numéricos de los factores que componen la ecuación:

$$T_{out}(t) = Ee^{Ft} + Ge^{Ht} \quad Ec. (17)$$

Para este caso, los valores de los factores son los siguientes:

$$E = 68,91$$

$$F = 0,0002387$$

$$G = -34,14$$

$$H = -0,004734$$

En la figura (29) se muestran ambas graficas juntas, el ajuste de los datos experimentales de la temperatura de salida junto con los datos medidos.

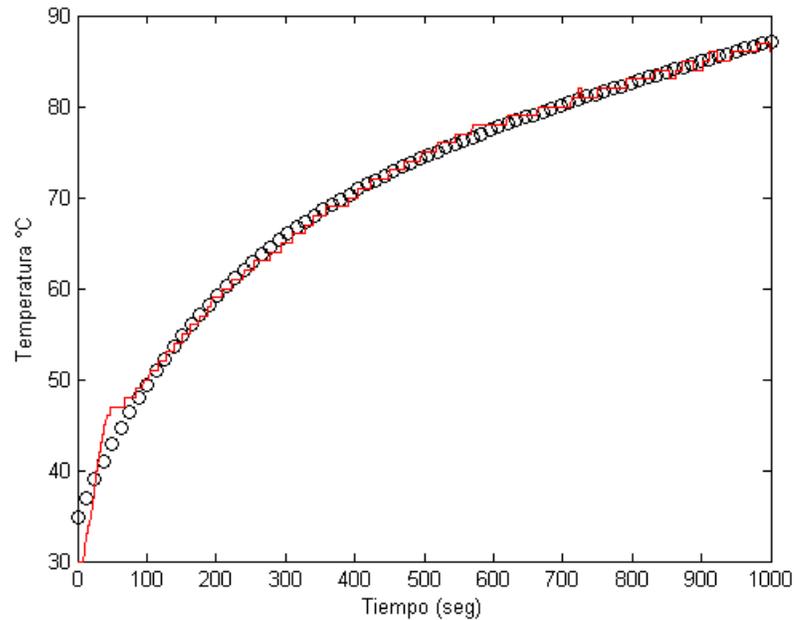


Figura (29): Curvas de calentamiento de Temperatura de salida medida experimentalmente (Línea continua azul) y curva obtenida del ajuste de Matlab (círculos negros).

De la figura podemos observar que el ajuste realizado en Matlab se ajusta de manera satisfactoria a la curva medida experimentalmente, además la temperatura de salida del sistema de secado llega a un valor de 87[°C] al tiempo de 1000[s], al igual que el ajuste realizado. El coeficiente de correlación para este ajuste es de  $R = 0,993$ .

## **6.4 Medición de Potencia del sistema de secado.**

La medición del consumo de potencia del sistema completo de secado, es necesaria para poder determinar el gasto de recursos en términos energéticos que implica el funcionamiento del sistema.

Los elementos que realizan un gasto energético dentro del sistema de secado de laboratorio son los siguientes:

- Sistema de calefacción.
- Sistema de potencia y enfriamiento del atomizador.
- Sistema de extracción de aire.
- Sistema de alimentación de líquido.

Para medir el consumo de potencia del calefactor se emplea un Power meter Marca Hioki-3161. La elección de los materiales para la construcción del calefactor permite tener una potencia eléctrica de 16[kW].

Debido a la necesidad de poder adquirir estos datos, se realiza un programa en Matlab para la adquisición de los datos analógicos entregados por el medidor. Dicho programa muestra los resultados de la medición en “tiempo real” en un gráfico dinámico que se va completando a medida que transcurre el tiempo y las mediciones.

### **6.4.1 Cálculo de Potencia Nominal del Calefactor Trifásico**

La potencia eléctrica disipada por un artefacto eléctrico se puede calcular conociendo el valor de su resistencia y el voltaje al que es sometido. La resistencia de cada una de las 3 ramas del calefactor tienen un valor de 9,5[Ω]

y considerando que el voltaje al que están sometidas es 220[V] obtenemos una potencia nominal en cada rama de 5,1[kW], lo que nos entrega finalmente una Potencia Nominal Total de 15,3[kW].

#### **6.4.2 Medición del consumo de Potencia del Calefactor trifásico con HIOKI-3161 (Clamp on Power meter)**

Este medidor muestra en un display digital el valor de la potencia en tiempo real medida y el valor promedio en el tiempo que dura la medición. Para poder registrar los valores de potencia medidos a lo largo del tiempo, se realiza un programa en Matlab para la adquisición de datos analógicos, usando la salida analógica de voltaje que posee el medidor de potencia. Esta salida varía entre 0 y 2[V], que de acuerdo a la escala utilizada en la medición corresponde a valores de potencia entre 0 y 20[kW]. Para llevar estos datos analógicos del medidor de potencia al computador se utiliza un cable con conexión banana por un extremo y BNC en el otro, en conjunto con un adaptador BNC-2110 de la compañía National Instrument, posteriormente los datos pasan por una tarjeta de adquisición de datos PCI-6123 de la misma empresa. Estos datos son adquiridos, procesados y mostrados en la pantalla del computador “tiempo real”.

### 6.4.3 Montaje del medidor de potencia trifásico.

Se realiza el montaje para realizar la medición como lo indica el Manual de Uso:

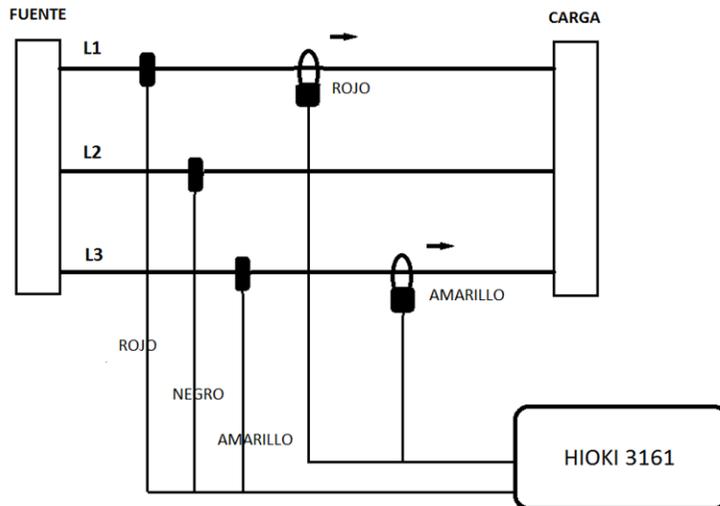


Figura (30): Forma correcta de conectar el medidor HIOKI-3161 para una medición de potencia de alimentación trifásica según su manual de uso.

El medidor Hioki cuenta con dos tenazas para medir corriente y tres caimanes para medir voltaje, las tenazas o pinzas se conectan a los terminales L1 y L3 de la alimentación trifásica, mientras que los caimanes se deben conectar a cada una de las 3 líneas, L1, L2 y L3, tal como se indica en la figura (30). Se debe tener precaución para que las tenazas estén colocadas en la posición correcta, es decir, que el sentido de circulación de la corriente por el cable coincida con el sentido de la flecha indicada en la tenaza, si la conectamos al revés, obtendremos valores de potencia negativos.

Se desarrolla un programa en Matlab para adquisición de datos analógicos, con la tarjeta de adquisición antes mencionada, que grafica los datos al mismo

tiempo que son adquiridos. El programa realizado en Matlab se muestra en el Anexo 1.

#### 6.4.4. Resultados de mediciones de Potencia con Relé Mecánico

El sistema de control de temperatura diseñado en el laboratorio se compone principalmente de unos controladores PID modelo REX-C400 que controlan la conexión o desconexión de unos Relés. En un principio, estos Relés eran mecánicos, pero posteriormente debido a una falla de material por límite de conmutaciones fueron reemplazados por Relés de estado Sólido (SSR).

A continuación se muestra una gráfica típica entregada por el programa durante la adquisición de datos de potencia con el sistema de control con Relés Mecánicos (figura 31).

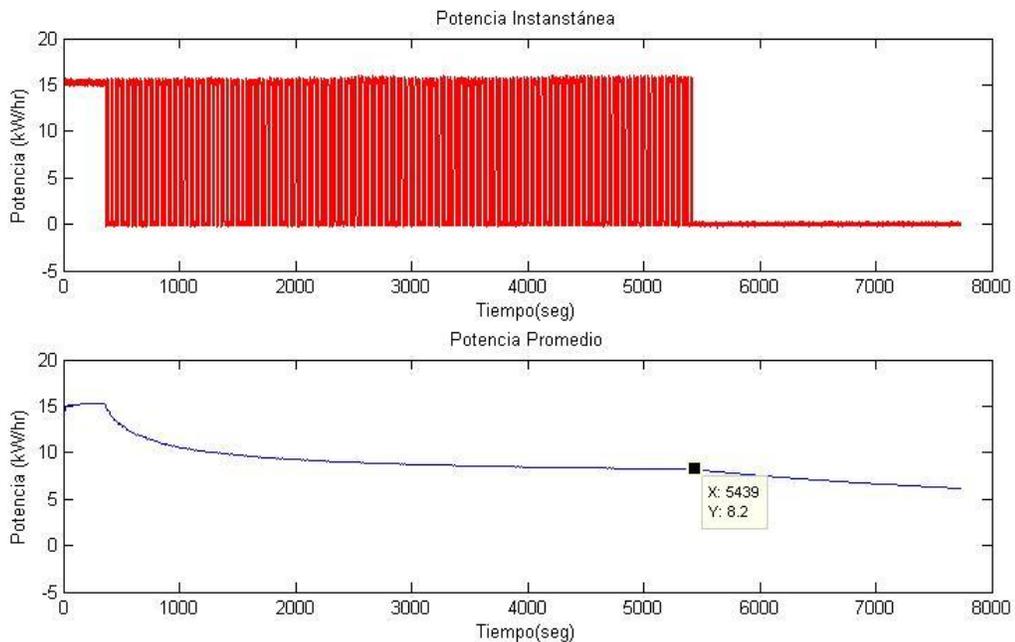


Figura (31): Gráfica en tiempo real de medición de potencia instantánea y promedio, mediante adquisición de datos analógicos con Matlab.

La gráfica superior corresponde a la potencia instantánea medida, mientras que la gráfica inferior muestra la potencia promedio.

El sistema de control del calefactor es un sistema PID retroalimentado, se establece la temperatura deseada (set) y el sistema mide la temperatura del aire mediante termopares y realiza la conexión o desconexión del calefactor mediante los relés, según se requiera aumentar o disminuir la temperatura del aire.

En la figura (31), los máximos corresponden a los momentos en que el calefactor se encuentra encendido para aumentar la temperatura del aire y por consiguiente los valores 0 corresponden al momento en que el sistema de control desconecta el calefactor para que la temperatura del aire disminuya.

También podemos notar que al principio del ensayo, cuando el calefactor se encuentra encendido de forma constante aumentando la temperatura del aire para llevarla a la temperatura de set (temperatura deseada), consume aproximadamente una potencia levemente superior a los 15[kW]. Medición que se correlaciona con la entrega de manera digital por el instrumento y con la Potencia Nominal total calculada.

Por otra parte considerando que el sistema de control del calefactor está constantemente conectando (consumiendo 15[kW]) y desconectando (consumiendo 0[kW]), es más informativo tener el dato de la potencia promedio consumida durante el ensayo, la que en este caso toma el valor final de:

$$P.Prom = 8,2[kW].$$

Este ensayo fue realizado a una temperatura de secado de  $T = 150[^\circ\text{C}]$ . El tiempo de duración de la medición de potencia se encuentra cercano a los 5400 segundos, es decir 90 minutos de medición.

#### **6.4.5 Medición de potencia consumida por el calefactor con sistema de control con Relés de estado sólido (SSR) Para distintas Temperaturas de secado.**

Como se mencionó anteriormente, con los ensayos realizados en el sistema de secado de laboratorio, se produjo un fallo en el sistema de control de temperatura, por lo que se decidió cambiar los relés mecánicos por relés de estado sólido (SSR).

Una vez instalados, se procede a realizar mediciones de consumo de potencia del calefactor, para distintas temperaturas de secado, comenzando desde los 100[°C] hasta los 160[°C]

Se realiza la configuración del sistema de control, ajustando los controladores a las siguientes temperaturas:

$$T = 100 [^{\circ}C], 110[^{\circ}C], 120[^{\circ}C], 130[^{\circ}C], 140[^{\circ}C], 150[^{\circ}C] \text{ y } 160[^{\circ}C].$$

Se establece un tiempo de medición de 90 minutos, tiempo considerado como suficiente para lograr una estabilización de la temperatura de entrada en la cámara de secado.

A continuación se muestra una figura que corresponde a una gráfica típica obtenida de la medición de consumo de potencia instantánea del calefactor y del consumo de potencia promedio.

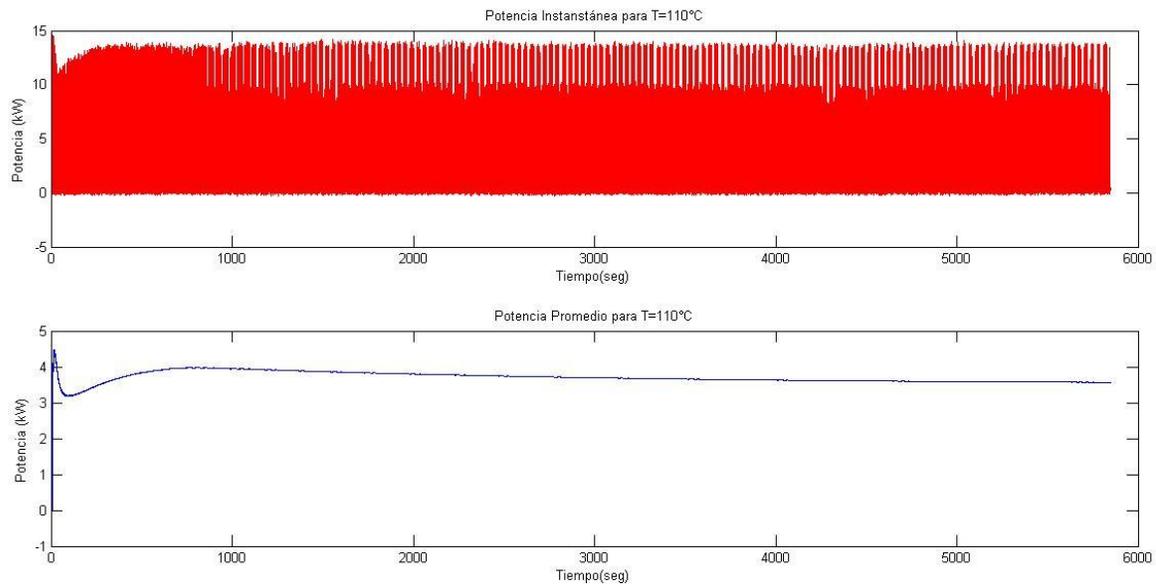


Figura (32): Gráfica completa de 90 minutos de medición de la potencia instantánea y promedio consumida por el calefactor eléctrico del sistema de secado, para una temperatura de secado de  $T=110[^\circ\text{C}]$ .

En este ensayo se obtuvo una potencia promedio de  $P_{prom} = 3,5[kW]$

En la Tabla VII se muestra los resultados de las mediciones de potencia realizadas a distintas temperaturas de secado.

Tabla VII: Resultados de mediciones de Potencia Promedio para distintas temperaturas de secado.

Temperatura de secado [ $^\circ\text{C}$ ]	Potencia Promedio [kW]
100	3,3
110	3,5
120	4,1
130	4,3
140	4,5
150	4,7
160	5,5

En la figura (33) se muestra una gráfica en la que se representa el consumo promedio de potencia del calefactor en función de la temperatura de secado.

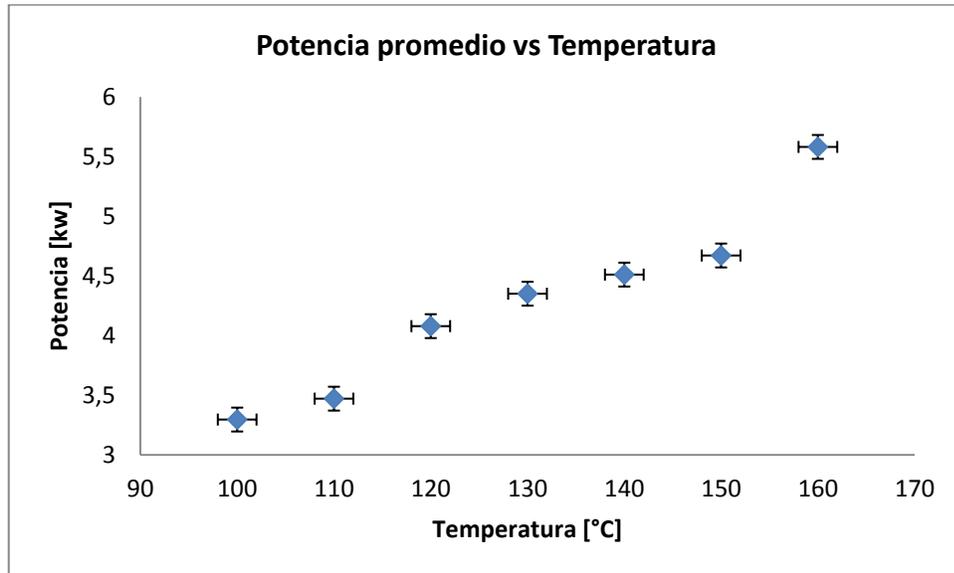


Figura (33): Potencia promedio consumida por el calefactor eléctrico en función de la temperatura de secado.

Podemos suponer, según lo mostrado en la figura (33) que la potencia en función de la temperatura tiene una relación directamente proporcional.

#### 6.4.6 Comparación de la potencia consumida por el calefactor con sistema de control de temperatura con relés mecánicos y con relés de estado sólido

Si realizamos una comparación de las potencias promedio consumidas por los dos sistemas de control utilizados, es decir, sistema de control con relés mecánicos y sistema de control con relés de estado sólido, a una temperatura de secado fija de  $T = 150[°C]$ . Podemos observar que el consumo promedio para el sistema de control de temperatura con relés mecánicos es mucho mayor al consumo promedio del sistema con relés de estado sólido (Tabla (VIII)). Esto se puede justificar debido a que el sistema de control con relés mecánicos mantiene el contacto cerrado de manera continua cuando quiere aumentar la temperatura de entrada, consumiendo también de manera continua la potencia. Mientras que el sistema de control con relés de estado sólido va alternando la

conexión y desconexión de los relés cuando desea aumentar la temperatura con un periodo de 1 segundo y un “*duty cycle*” de un 50%. Gracias a esto el sistema de control de temperatura con relés de estado sólido consume una potencia promedio bastante menor que el sistema de relés mecánicos. Por lo tanto, con el cambio de relés se introdujeron principalmente dos mejoras al sistema, la primera corresponde a un mayor número de conmutaciones posibles por parte del relé y la segunda corresponde a un ahorro en la potencia promedio consumida por el sistema.

Tabla VIII Comparación de potencia consumida por los sistemas de control con relés mecánicos y relés de estado sólido.

<b>Sistema de control de Temperatura</b>	<b>Potencia promedio consumida[kW]</b>
Relés Mecánicos	8,2
Relés de estado sólido	4,7

## Capítulo 7: Cálculo de la Energía específica consumida por el Sistema de Secado.

### 7.1 Energía Específica para el secado de agua de mar.

El ensayo de secado de agua de mar fue realizado bajo los parámetros listados en la Tabla IX.

Tabla IX: Parámetros del ensayo de secado de agua de mar.

Producto a secar	Agua de mar
T. de secado	200[kHz]
Caudal Líquido de entrada	2 [l/h]
Frecuencia Atomizador	17 [kHz]
Duración ensayo	2 [h]

Para obtener la energía específica debemos contar con la potencia consumida durante el ensayo y con la masa de polvo generado. Para obtener la potencia total consumida consideramos los valores listados en la Tabla X.

Tabla X: Elementos del sistema que consumen potencia.

Elemento del sistema de secado	Potencia consumida [kW]
Calefactor eléctrico	10,20
Extractor de aire	0,37
Bomba de cavidad progresiva	0,37
Bomba enfriamiento del transductor	0,37
Sistema de Potencia Transductor	0,14
<b>Potencia total consumida</b>	<b>11,45</b>

### 7.1.2 Energía Específica considerando la masa seca obtenida.

Si consideramos la masa seca obtenida durante el ensayo, es decir, sin considerar lo que se queda pegado en las paredes, que no es posible recuperar, obtenemos un total de 42 gramos. Al aplicar la expresión que nos entrega la energía específica tenemos:

$$E_{esp} = \frac{Potencia * t}{masa\ generada}$$

$$E_{esp} = \frac{11,45[kW] * 2[h]}{0,042[kg]}$$

$$E_{esp} = 545[kWh/kg]$$

### 7.1.3 Energía específica considerando la masa de producto procesado.

Si en vez de considerar la masa de producto que se obtiene a la salida del sistema, consideramos la masa de producto que se procesa, es decir, la masa de producto sólido que ingresa al sistema, tendríamos entonces la siguiente energía específica:

Según el 4,8% de sólidos medido del agua de mar, tenemos una concentración de sólidos de 0,048[kg/l], que si lo multiplicamos por el caudal de entrada del líquido de 2[l/h] obtenemos una tasa de entrada de sólidos de 0,096[kg/h] aproximadamente. Esta tasa nos dice que en el tiempo que duró el ensayo, ingresaron 192[gr] de masa sólida. Al dividir la potencia consumida por el

sistema por esta tasa de ingreso de producto sólido tenemos la siguiente energía específica:

$$E_{esp} = \frac{11,45[kW]}{0,096 \left[ \frac{kg}{h} \right]}$$

$$E_{esp} = 119[kWh/kg]$$

Observamos que la energía específica disminuye considerablemente al considerar la masa de producto procesado, es decir, pensando en que todo el producto sólido que ingresa es recuperado a la salida.

## 7.2 Energía Específica para el secado de HidroCup

Se realiza un ensayo de secado de una mezcla o slurry en forma líquida, el que se desea transformar a gránulo.

La experiencia de secado fue realizada bajo los parámetros mostrados en la Tabla XI.

Tabla XI: Parámetros de la experiencia de secado de HidroCup.

Producto a secar	HidroCup.
Temperatura de entrada	160[°C]
Caudal suministrado por la bomba	5,6 [l/h]
Frecuencia del transductor atomizador	6 [kHz]
Duración del ensayo	1 [h]

Primero necesitamos conocer el gasto de potencia del sistema completo considerando todos los elementos que aportan a su consumo. Esto se muestra en la Tabla XII.

Tabla XII: Potencia consumida por todos los elementos que componen el sistema de secado.

Elemento del sistema de secado	Potencia consumida [kW]
Calefactor eléctrico (T set 160[°C])	5,60
Extractor de aire	0,37
Bomba de cavidad progresiva	0,37
Bomba enfriamiento del transductor	0,37
Sistema de Potencia Transductor	0,14
<b>Potencia total consumida</b>	<b>6,85</b>

Podemos observar que el mayor gasto de potencia se lo lleva el calefactor trifásico, siendo aproximadamente un **82%** del consumo total de potencia del sistema de secado.

En los secadores comerciales el consumo de potencia para un secador industrial es del orden de los 39[kW], mientras que para un secador piloto es de 3,1[kW] aproximadamente. Es importante comentar que estos secadores poseen un sistema de calefacción a gas, por lo tanto el consumo de potencia considera sólo los componentes eléctricos del sistema como las bombas de alimentación, el sistema de extracción de aire y las bombas para el sistema de atomización.

### 7.2.1 Energía específica considerando la cantidad de gránulo obtenido.

Una forma de calcular la energía específica que consume el sistema de secado, es considerando la potencia total consumida por el sistema y la cantidad de gránulo utilizable obtenido en el proceso de secado.

$$E_{esp1} = \frac{\text{Potencia total.}}{T.S.G.} \quad Ec(18)$$

Por lo tanto se necesita obtener experimentalmente tasa de salida de gránulo del sistema de secado.

Una vez terminado el ensayo de secado, se recolecta todo el gránulo obtenido, tanto el acumulado en la zona inferior de recolección (Recipiente), como el acumulado en las paredes internas de la cámara de secado. A esta cantidad la denominaremos **Masa total de producto generado (M.t.g)**.

#### **Recipiente:**

En el recipiente de vidrio dispuesto para recibir el producto, se obtuvo producto en gránulo seco (producto que sirve) y producto aglomerado (producto no utilizable, no sirve), los que fueron separados manualmente, mediante tamizado. Se obtuvieron las siguientes cantidades:

$$M.g.r. = 1204 [g] \quad (Masa \text{ gránulo recipiente})$$

$$M.a.r. = 524 [g] \quad (Masa \text{ aglomerado recipiente})$$

$$M.t.r. = M.g.r. + M.a.r.$$

$M.t.r. = 1728 [g]$	$(Masa \text{ total recipiente})$
---------------------	-----------------------------------

#### **Paredes secador:**

Posterior al ensayo, se recolecta el producto que se encuentra pegado a las paredes del secador, de lo que también se obtiene producto seco en gránulo y aglomerado, separándolos mediante tamizado se obtienen las siguientes cantidades:

$$M.g.p. = 1305 [g] \quad (Masa \text{ gránulo paredes})$$

$$M.a.p. = 664,7[g] \quad (\text{Masa aglomerado paredes})$$

$$M.t.p. = M.g.p. + M.a.p.$$

$$\boxed{M.t.p. = 1970 [g] \quad (\text{Masa total paredes})}$$

Sumando estos dos resultados (Masa total paredes + Masa total recipiente) tenemos la masa total de producto generado.

$$M.t.g. = M.t.p + M.t.r.$$

$$\boxed{M.t.g. = 3968[g] \sim 3,7[kg] \quad (\text{Masa total producto generado})}$$

De todo esto, se considera sólo el producto que sirve, es decir, el gránulo del recipiente sumado con el gránulo de las paredes, sin considerar el producto aglomerado. Se le denomina Masa Total Utilizable (M.t.u.) De esto se tiene:

$$M.t.u. = M.g.r + M.g.p$$

$$M.t.u. = 1204 [g] + 1305 [g]$$

$$\boxed{M.t.u. = 2509 [g] \quad (\text{Masa total de producto utilizable})}$$

Si consideráramos esta cantidad como fija en el tiempo, es decir, como una tasa de salida de gránulo utilizable (T.S.G.), tendríamos lo siguiente:

$$T.S.G. = 2,509 \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

Luego, considerando esta tasa de salida de gránulo de producto utilizable en conjunto con la potencia total consumida **6,85[kW]** obtenemos el siguiente consumo de energía específica, usando la Ec.(18)

$$E_{esp1} = \frac{\text{Potencia total.}}{T.S.G.}$$

$$E_{esp1} = \frac{6,85[kw]}{2,509 \left[ \frac{kg}{h} \right]}$$

$$E_{esp1} = 2,73 \left[ \frac{kwh}{kg} \right]$$

Expresando la Energía específica por Tonelada de producto generado tenemos:

$$E_{esp1} = 2730 \left[ \frac{kwh}{ton} \right]$$

Por lo tanto, para esta medición, por cada tonelada de producto utilizable obtenido se utiliza una energía de **2730[kWh/ton]**.

### **7.2.2 Energía específica considerando la cantidad de producto procesado.**

Otra forma de obtener la energía específica que consume el sistema de secado, es considerando la cantidad de producto procesado por el sistema, es decir, en vez de considerar la tasa de salida de producto en gránulo generado, se considera la tasa de ingreso de producto sólido. Para ello debemos tomar en cuenta el caudal de alimentación suministrado por la bomba en conjunto con el porcentaje de sólidos presente en la pasta a secar y su densidad para poder obtener la masa que entra al sistema como una tasa de ingreso de producto sólido denominada con sus siglas, (T.I.P.S.).

A esta energía específica la denominaremos  $E_{esp2}$  y se define como se muestra a continuación:

$$E_{esp2} = \frac{Potencia\ total}{T.I.P.S.} \quad Ec. (19)$$

Consideramos el caudal de entrada del ensayo de secado:

$$Q = 5,6[l/h]$$

La densidad del líquido a secar:

$$\rho = 1,25[kg/l]$$

Y el porcentaje de sólidos presente en el líquido:

$$\%Sólidos = 54\%$$

Al multiplicar el caudal de entrada por la densidad del líquido obtenemos la tasa de ingreso en masa, podemos llamarlo Caudal másico  $Q_m$ :

$$Q_m = Q * \rho = 5,6 \left[ \frac{l}{h} \right] * 1,25 \left[ \frac{kg}{l} \right]$$

$$Q_m = 7[kg/h]$$

Ahora, si consideramos el porcentaje de sólidos que contiene este caudal, es decir, sin considerar la masa de agua presente en la mezcla, podemos encontrar la tasa de ingreso de producto sólido (T.I.P.S):

$$T.I.P.S. = Q_m * \%Sólidos$$

$$T.I.P.S. = 3,78[kg/h]$$

De esta forma obtenemos lo siguiente:

$$E_{esp2} = \frac{Potencia\ total}{T.I.P.S.}$$

$$E_{esp2} = \frac{6,85[kW]}{3,78 \left[ \frac{kg}{h} \right]}$$

$$E_{esp2} = 1,81 \left[ \frac{kWh}{kg} \right]$$

Expresando en Energía por tonelada de producto procesado:

$$E_{esp2} = 1810 \left[ \frac{kWh}{ton} \right]$$

Por lo tanto, según los cálculos realizados, tenemos que la energía específica consumida por el sistema completo de secado considerando el producto procesado por el sistema es de **1810[kWh/ton]**.

Podemos observar que este valor de energía específica considerando el producto procesado, es menor al valor de energía específica calculado considerando la tasa de salida de gránulo obtenido. Esto se debe a que, al considerar el producto procesado por el sistema, no estamos considerando las pérdidas de producto por concepto de aglomeración, pérdidas que si se consideran con el método descrito en el ítem 7.2.1.

### **7.3 Estimación de la eficiencia del sistema de secado en términos de masa sólida de entrada versus masa sólida de salida.**

#### **7.3.1 Para agua de mar**

Para estimar la eficiencia del sistema en términos de la masa, debemos considerar la masa sólida que ingresa y compararla con la masa sólida seca obtenida a la salida.

Para el caso del agua de mar, la tasa de ingreso de producto sólido era de 0,096[kg/h], como el ensayo tuvo una duración de dos horas, obtenemos una masa total ingresada de 0,192[kg], en contraste con la masa seca obtenida a la salida que fue de 0,042[kg] en total.

La masa seca de salida corresponde aproximadamente a un 22% de la masa sólida que entra. El resto de la masa se pierde al adherirse a las paredes internas de la cámara de secado. Ésta podría considerarse la eficiencia del sistema de secado para Agua de mar.

#### **7.3.2 Para HidroCup.**

Si consideramos la Tasa de Ingreso de Producto Sólido (T.I.P.S.) que es de **3,78 [kg/h]**, y la comparamos con la Masa total de producto generado (M.t.g.) en una hora de ensayo con un valor de **3,7[kg]**, obtenemos que el producto generado corresponde a un 97.9% de la masa sólida procesada, es decir, después del barrido del interior de la cámara post ensayo, se perdió un 2,1% de producto seco, por posibles fugas al exterior o remanentes dentro de la cámara.

Por otra parte, si realizamos una comparación entre la tasa de ingreso de producto sólido (T.I.P.S.) y la tasa de salida de gránulo seco (T.S.G.) que considera solo el producto utilizable, excluyendo toda la masa aglomerada, obtenemos que la tasa de salida de gránulo seco corresponde

aproximadamente a un 66,4% de la masa que entra. El porcentaje faltante, un 33,6% se considera como pérdidas, debido a la aglomeración en las paredes del secador.

En el recipiente de vidrio se recolectó el **48%** del total de producto en polvo utilizable, siendo el **52%** restante recolectado de las paredes internas del secador. Aquí se observa la importancia de barrer el interior de la cámara de secado, ya que, de ese lugar se recolectó una cantidad ligeramente mayor de producto utilizable que en el mismo recipiente.

## Conclusiones

- Se desarrolla una simulación del flujo de aire de secado y de la distribución térmica dentro de la cámara.
- Las temperaturas de salida y entrada a la cámara de secado simuladas ajustan bien con las medidas.
- Se realiza la instrumentación del sistema de secado para la medición de parámetros relevantes dentro del proceso
- El consumo de Energía específica para el sistema de laboratorio para el caso del HidroCup resultó ser de  $E_{\text{esp}} = 2,730 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]$ . Comparable al rendimiento a nivel industrial ( $1,118 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]$  [9]) si se considera que la masa recuperada es menos de la mitad de la masa verdaderamente secada.
- EL consumo de Energía específica para el secado de agua de mar resultó ser de  $E_{\text{esp}} = 545 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]$ .
- El consumo de potencia del calefactor eléctrico corresponde al 82% del consumo total del sistema.

## Bibliografía

### Referencias

- [1] Página web de la empresa GEA NIRO <http://www.niro.com/niro/cmsdoc.nsf/webdoc/webb7ezgp8>.
- [2] Página web de la empresa GEA NIRO <http://www.niro.com/niro/cmsdoc.nsf/WebDoc/webb8clfn4>
- [3] Mondragón Rosa, Julia J. Enrique, Barba Antonio, Jarque Juan Carlos. Boletín de la sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 52, 4, 159-168, Julio-Agosto 2013. ***“El proceso de secado por atomización, formación de gránulos y cinética del secado de gotas”***.
- [4] “Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles” W. C. Hinds.
- [5] Datos suministrados y medidos por Daniela Briceño como parte de su Tesis en el Laboratorio de Ultrasonidos de la Universidad de Santiago de Chile.
- [6] Documento de Oceanografía de la página web de desarrollo marítimo <http://www.desarrollomaritimo.cl/docum/oceanografiamarina.pdf>
- [7] Documento de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Rosario, Departamento de Ingeniería Química, Cátedra de Integración III, Tabla de vapor de agua
- [8]. American National Standard “Laboratory methods of testing fans for rating” ANSI/AMCA 210-85, ANSI/ASHRAE 51-1985.
- [9]. Valor de energía específica proporcionado por Quimetal Industrial S.A.

## Anexo 1

### Programa en Matlab para la Adquisición de Datos del Medidor de Potencia.

```
close all, clear all, clc

tic

d=5; %número de datos a promediar
Fs=500; %frecuencia de muestreo
t=90; %TIEMPO DE DURACION DEL ENSAYO (en minutos)
n=800*t; %número de capturas, 1 min de medición
      %equivalen a 800 capturas aproximadamente.

Ns=d; %número de muestras
p=zeros(1,n); %vector fila de ceros de n elementos

promedio=zeros(1,n);
tiempo=zeros(1,n);

ai=analoginput('nidaq','Dev1');
chan2=addchannel(ai,2);
set(ai,'SampleRate',Fs);
set(ai,'SamplesPerTrigger',Ns);
set(chan2,'InputRange',[-2.5 2.5]);

for k=1:n
    start(ai) %comienza la adquisición
    datos=getdata(ai); %guarda datos adquiridos en la variable "datos".
    prom=(sum(datos))/Ns;
    p(1,k)=prom; %valores de voltaje desde el sensor
    toc;
    tiempo(1,k)=toc; %vector tiempo con toc
    promedio(1,k)=(sum(p))/k;

    figure(1)
    title('Medicion de Potencia en funcion del tiempo')

    subplot(2,1,1),plot(tiempo(1:k),10*p(1:k),'r'),title('Potencia
Instanstánea')
    xlabel('Tiempo(seg)'),ylabel('Potencia (kW)'),

    subplot(2,1,2),plot(tiempo(1:k),10*promedio(1:k),'b'),title('Potencia
Promedio'),
    xlabel('Tiempo(seg)'),ylabel('Potencia (kW)')

end
```

## Anexo 2

### Estimación del Coeficiente de Difusión para HidroCup:

Al observar las paredes internas de la cámara de secado posterior al ensayo, se puede observar la zona en donde se han adherido los gránulos aún húmedos, así como la zona en donde no hay adherencia, lo que permite asumir que en dicha zona las gotas ya se han secado. Con esto se puede determinar la distancia que recorren las gotas al secarse junto con el tiempo aproximado de secado, considerando un radio de giro de las gotas de 30[cm] y suponiendo que realizan aproximadamente 3 vueltas hasta alcanzar el secado. Despejando el coeficiente de difusión de la Ec. (9) se tiene:

$$D_v = \frac{R\rho_p T (d_f^2 - d_i^2)}{8tM (p - p_s)}$$

Reemplazando los valores correspondientes se obtienen los valores estimados de los coeficientes de difusión para los distintos líquidos estudiados.

Tabla XIII: Valores de los coeficientes de difusión estimados.

Líquido	Coef. De Difusión Estimado [ $m^2/s$ ]
HidroCup	1,65E-07
Agua de mar	4,52E-08
Agua dulce	6,53E-08

: