



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR
EXPERIMENTAL PARA SÓLIDOS CON CONTROL DE FLUJO Y
TEMPERATURA DE AIRE”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTO TÉCNICO

Presentado para optar por grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES: INCA CANDO ALEX MARCELO

OÑATE MOREANO MARCELA KAROLINA

DIRECTORA: ING. ZOILA VALERIA TAPIA GONZÁLEZ

Riobamba-Ecuador

2019

© 2019, Inca Cando Alex Marcelo, Oñate Moreano Marcela Karolina.

Autorizamos la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de los Autores.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo técnico: **“Diseño y construcción de un secador experimental para sólidos con control de flujo y temperatura de aire”**, de responsabilidad de los señores **Inca Cando Alex Marcelo** y **Oñate Moreano Marcela Karolina**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Zoila Valeria Tapia González. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	<u>2019-27-06</u>
Ing. César Arturo Puente Guijarro. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	<u>2019-27-06</u>

Nosotros, **INCA CANDO ALEX MARCELO** y **OÑATE MOREANO MARCELA KAROLINA** somos responsables de las ideas aplicadas en el diseño, cálculos, procesos y resultados expuestos y la propiedad intelectual del Trabajo de Titulación de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

INCA CANDO ALEX MARCELO

OÑATE MOREANO MARCELA KAROLINA

DEDICATORIA

A Dios, por permitir que siga con vida y lleno de salud. Por darme las fuerzas suficientes para seguir avanzando y no rendirme ante los problemas que se presenten en mi vida tanto personal como profesional. **A mi madre BILMA CANDO**, por ser la mujer que me dio la vida; educó y protegió con todas sus fuerzas hasta el último día de su vida. **A mi padre IVÁN INCA**, por no permitir que nos falte nada para vivir. **A mis abuelitos ROSITA, LALITA Y SEGUNDO**, por ser actores directos en conjunto con mis padres en mi educación, por enseñarme los valores que necesita una persona para llegar al éxito y por su gran amor. **A mi segunda madre MARTHA JARA**, por asumir la gran responsabilidad de continuar con las enseñanzas que dejó mi madre, por brindarme su amor y paciencia. **A mis hermanos IVETTE, CATERINE, BRYAN Y ALDRIN**, por ayudarme a superar todos los problemas que se han presentado hasta ahora, por su apoyo incondicional y por amarme tanto como yo a ellos.

Inca Cando Alex Marcelo

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por ser la esencia de mi vida. Quien me ha dado sabiduría y fortaleza, por haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, para poder forjar un futuro para mis hijas.

A mis hijas, quienes son el motor de mi vida, sin ellas éste esfuerzo no tendría valor. Por ser quienes cada día de mi carrera han compartido conmigo sacrificios, penas y alegrías; durante ésta incansable lucha por cumplir ésta meta.

A mi madre por ser quien me ha ayudado en cada etapa de mi vida, especialmente en mi formación académica.

Oñate Moreano Marcela Karolina

AGRADECIMIENTO

Agradezco con todo mi corazón a mis padres, hermanos, abuelitos, tíos, primos y amigos por acompañarme en este camino lleno de retos, alegrías y decepciones. Quienes con su apoyo incondicional supieron guiarme hacia el éxito. A todos mis profesores que durante mi camino por la Escuela de Ingeniería Química, supieron impartir sus conocimientos día a día para formar así, a un profesional al servicio del Ecuador y del mundo.

Inca Cando Alex Marcelo

Agradezco a Dios y a mi Madre del Cielo por bendecirme cada día, guiarme y darme fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad. Gracias a mis padres, por ser mis amigos en quienes siempre encuentro apoyo y amor. Mil gracias por ser los promotores de mi sueño al haber confiado y creído en mí. Agradezco también a mi amado esposo por ser mi compañero de vida y darme siempre sus palabras de aliento y ser mi sostén en esta alcanzada meta. Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento a mis distinguidos tutor y asesor. Quienes con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitieron el desarrollo de este trabajo.

Oñate Moreano Marcela Karolina

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xiii
CAPITULO 1	
1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Identificación del problema	1
1.2. Justificación del proyecto	1
1.3. Línea base del proyecto	2
1.3.1. Teoría de secado	2
1.3.2. Secadores	13
1.3.3. Materia prima (Alimentos).	19
1.4. Beneficios directos e indirectos	24
1.4.1. Directos.....	24
1.4.2. Indirectos	24
CAPITULO 2	
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	25
2.1. Objetivo General.....	25
2.2. Objetivos Específicos	25
CAPITULO 3	
3. ESTUDIO TÉCNICO.....	26
3.1. Localización del proyecto.....	26
3.2. Ingeniería del proyecto	27
3.2.1. Análisis experimental de secado de granos.	27
3.2.2. Determinación experimental de propiedades de secado	27
3.2.3. Cálculos de diseño estructural	44
3.2.4. Cálculos de dimensionamiento térmico.....	54
3.2.5. Dimensionamiento del sistema de control de temperatura	67
3.2.6. Procedimientos de operación	69
3.2.7. Datos Experimentales	70
3.3. Resultados de dimensionamiento.....	70
3.3.1. Estructural.....	70
3.3.2. Térmico.....	74
3.3.3. Validación del equipo	76
3.4. Discusión de resultados	79
3.4.1. Dimensionamiento estructural	79

3.4.2.	Dimensionamiento térmico.....	80
3.4.3.	Dimensionamiento del sistema de control.....	80
3.4.4.	Análisis físico químicos del producto (parte experimental)	80
3.4.5.	Discusión de Validación.....	81
3.5.	Costos del proyecto.....	81

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Diagramas de conducción para: a) pared plana vertical y b) Cilindro hueco (tubo).	4
Figura 2-1	Diagramas de conducción y convección para pared plana vertical.	5
Figura 3-1	Diagrama o carta psicométrica.	8
Figura 4-1	Diagrama de variación de la masa del sólido húmedo contra el tiempo.	9
Figura 5-1	Diagrama de variación de la humedad del sólido húmedo contra el tiempo.	10
Figura 6-1	Diagrama de variación de la velocidad del sólido húmedo contra la humedad absoluta.	11
Figura 7-1	Diagrama de ajuste de curva de velocidad del sólido húmedo contra la humedad absoluta.	12
Figura 8-1	Diagrama de secador de lecho fluidizado.	14
Figura 9-1	Vista frontal de secador de bandejas.	15
Figura 10-1	Vista frontal de secador rotatorio PTK PC-C Series para recubrimiento de píldoras, uso farmacéutico.	16
Figura 11-1	Vista frontal secador rotatorio de paletas al vacío.	17
Figura 1-3	Localización del proyecto	26
Figura 2-3	Diagrama de dimensiones del tambor del secador horizontal rotatorio por lotes- vista frontal.	45
Figura 3-3	Dimensiones para un levantador angulado.	46
Figura 4-3	Función para cálculo de ángulo gamma de diseño de levantadores secadores rotatorios	47
Figura 5-3	Función para cálculo de ángulo beta de diseño de levantadores secadores rotatorios.	48
Figura 6-3	Función para cálculo de ángulo phi de diseño de levantadores secadores rotatorios.	52
Figura 7-3	Diagrama de proceso del secador con variables y parámetros.	56
Figura 8-3	Función para cálculo del calor específico de materiales a condiciones específicas, ecuación de Shomate	57
Figura 9-3	Función para cálculo de la presión de vapor del agua o líquido contenido en el sólido.	58
Figura 10-3	Función para cálculo de actividad de agua del aire a condiciones de operación dadas.	59
Figura 11-3	Función para cálculo de la constante cinética de secado.	60
Figura 12-3	Función para aproximación de la humedad de equilibrio.	61
Figura 13-3	Función para cálculo del tiempo de secado del sólido con un secador rotatorio batch.	62
Figura 14-3	Función para cálculo de flujo de humedad vaporizada desde el sólido.	62
Figura 15-3	Función para cálculo del flujo de aire necesario para secar el material.	63
Figura 16-3	Función para cálculo del calor necesario para calentar el sólido.	64

Figura 17-3	Función para cálculo del calor necesario para evaporar el agua en el sólido.	65
Figura 18-3	Función para cálculo del calor necesario para evaporar el agua en el sólido.	65
Figura 19-3	Diagrama del sistema eléctrico del secador de tambor rotatorio.	67
Figura 20-3	Interface gráfica de software de adquisición de datos.	68
Figura 21-3	Vista isométrica de ensamblaje de horno rotatorio.	71
Figura 22-3	Vista isométrica y lateral de la cámara de secado, tambor y ventilación.	71
Figura 23-3	Vista isométrica del soporte del sistema de ventilación..	72
Figura 24-3	Vista isométrica del secador sin compuerta y vista de malla.	72
Figura 25-3	Vista isométrica y lateral de la compuerta del secador.	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3	Análisis sobre carga de levantadores del cilindro del secador	28-29
Gráfico 2-3	Análisis de sensibilidad para variaciones de ángulo de levantador (ψ) y posición de levantador (θ).	30-31
Gráfico 3-3	Diagrama masa vs tiempo para las muestras de: a) arveja, b) maíz y c) trigo	32-33
Gráfico 4-3	Diagrama humedad vs tiempo para las muestras de: a) arveja, b) maíz y c) trigo.	34-35
Gráfico 5-3	Diagrama velocidad vs tiempo para las muestras de: a) arveja, b) maíz y c) trigo.	35-36
Gráfico 6-3	Diagrama análisis de puntos de modelo desecado para las muestras de arveja.	37-38
Gráfico 7-3	Diagrama de integración para tiempo poscrítico para las muestras de arveja.	40-41
Gráfico 8-3	Diagrama de integración para tiempo poscrítico para las muestras de maíz.	41-42
Gráfico 9-3	Diagrama de integración para tiempo poscrítico para las muestras de trigo.	43-44
Gráfico 10-3	Diagrama de integración para tiempo poscrítico para las muestras de maíz.	53
Gráfico 11-3	Diagrama de integración para tiempo poscrítico para las muestras de trigo.	54
Gráfico 12-3	Datos experimentales de validación con maíz.	76
Gráfico 13-3	Curva de velocidad de secado para el maíz.	77
Gráfico 14-3	Datos experimentales de validación con maíz.	78
Gráfico 15-3	Curva de velocidad de secado para la arveja.	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1	Procedimiento para determinar el contenido de humedad método de balanza térmica.	21
Tabla 2-1	Procedimiento para la determinación del contenido de humedad método de la estufa.	22
Tabla 3-1	Procedimiento para la determinación curva de secado método secador rotatorio	23
Tabla 1-3	Descripción geográfica del proyecto.	26
Tabla 2-3	Resultados del análisis de curvas de velocidad de secado.	39
Tabla 3-3	Posición y carga longitudinal de cada levantador.	50
Tabla 4-3	Análisis de sensibilidad para variaciones de ángulo de levantador (ψ) y posición de levantador (θ).	53
Tabla 5-3	Resultados del análisis de variables de diseño de secador.	56
Tabla 6-3	Resultados del análisis de especificaciones del diseño de secador.	56
Tabla 7-3	Procedimientos presentes en el manual de operación del equipo.	69
Tabla 8-3	Resultados de dimensionamiento estructural.	70
Tabla 9-3	Datos técnicos para diseño de proceso de secado.	74
Tabla 10-3	Resultados de dimensionamiento del proceso de secado.	75
Tabla 11-3	Presupuesto para equipos y maquinaria.	82
Tabla 12-3	Cronograma de ejecución del proyecto.	83

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	Hoja de cálculo para diseño estructural.
ANEXO B	Hoja de cálculo para el balance de masa y energía.
ANEXO C	Diseño de CAD del secador.
ANEXO D	Secador rotatorio construido.
ANEXO E	Diagrama P&ID del sistema de control.
ANEXO F	Diagrama de secuencia del proceso de control ON/OFF.
ANEXO G	Diagrama eléctrico del panel de control, primera parte.
ANEXO H	Diagrama eléctrico del panel de control, segunda parte.
ANEXO I	Diagrama eléctrico de potencia del secador.
ANEXO J	Código en MATLAB para cálculos de curva de secado.
ANEXO I	Código en MATLAB para cálculos de curva de secado.
ANEXO K	Tablas de datos experimentales de análisis de secado por método de estufa.
ANEXO L	Informe de Practica de Laboratorio.
ANEXO M	Plano del Equipo.

RESUMEN

El presente trabajo condensa el procedimiento para diseñar un secador rotatorio experimental, para uso del laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias. Este se divide en procesos de: diseño estructural, térmico, procesos de secado y diseño del sistema de control. El diseño estructural se limitó al diseño del tambor y los levantadores o paletas. Se afrontó el diseño usando Microsoft Excel y Macros de VBA. Entre los parámetros calculados se encuentran: diámetro del tambor del secador, velocidad de giro del tambor, longitud de los levantadores, número de levantadores, etc. El diseño térmico y de proceso de secado se basa en el estudio de balance de materia y energía. El objetivo fue determinar parámetros como: temperatura de aire de secado, flujo de aire de secado, potencia térmica necesaria para realizar la operación de secado, flujo de agua retirado del sólido, humedad de salida teórica del material, etc. Para el sistema de control se utilizó un microcontrolador basado en tecnología Arduino, como tarjeta de adquisición de datos e interfaz software/hardware. Se usó MATLAB para la construcción del software de adquisición de datos. Para el estudio del comportamiento del material en el proceso de secado, se seleccionó tres materiales: arveja, trigo y maíz. A través del método de secado en la estufa que permitió obtener de forma experimental sus parámetros de secado: humedad crítica, humedad de equilibrio y tiempo de secado. Al final se evaluó el funcionamiento del equipo a través de la validación con dos materiales: arveja y maíz, que obteniendo sus curvas de velocidad de secado. Se puede concluir que el secado por método rotatorio en comparación con el método de secado por estufa, es mucho más rápido, necesitándose únicamente la cuarta parte del tiempo.

PALABRAS CLAVE: <<INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <<PROCESOS INDUSTRIALES>>, <SECADO>>, <<SECADOR ROTATORIO>>, <<ARDUINO (SOFTWARE)>>, <<MATLAB (SOFTWARE)>>.

ABSTRACT

The present work summarizes the procedure to design an experimental rotary dryer, for use of the Industrial Process laboratory of the Faculty of Sciences. This is divided into processes of: structural, thermal design, drying processes and design of the control system. The structural design was limited to the design of the drum and the lifters or pallets. The design was done using Microsoft Excel and VBA Macros. Among the parameters calculated are: diameter of the dryer drum, speed of the drum rotation, length of the lifters, number of lifters, etc. The thermal and drying process design is based on the study of matter and energy balance. The objective was to determine parameters such as: drying air temperature, drying air flow, thermal power needed to perform the drying operation, water flow withdrawn from the solid, theoretical exit moisture of the material, etc. A microcontroller based on Arduino technology was used for the control system, as a data acquisition card and software / hardware interface. MATLAB was used for the construction of the data acquisition software. To study the behavior of the material in the drying process, three materials were selected: peas, wheat and corn. Through the drying method in the stove that allowed to obtain experimentally its drying parameters: critical humidity, equilibrium moisture and drying time. Finally, the operation of the equipment was evaluated through the validation with two materials: peas and corn, which obtained its drying speed curves. It can be concluded that the drying by rotary method in comparison with the method of drying by stove, is much faster, requiring only a quarter of the time.

KEY WORDS: << CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, << INDUSTRIAL PROCESSES >>, <DRYING >>, << ROTATING DRYER >>, << ARDUINO (SOFTWARE) >>, << MATLAB (SOFTWARE) >>.

CAPITULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ubicada en Riobamba 1½ Km de la Panamericana Sur, en el laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias no posee una forma adecuada para el secado de sólidos, donde se puede relacionar la temperatura y velocidad del aire que incide sobre los sólidos entrantes a la cámara versus su velocidad de secado. Este comportamiento se ajusta a los modelos matemáticos de la cinética de secado. Los laboratorios de la Facultad de Ciencias únicamente cuentan con balanzas de humedad, que no permiten la monitorización de pérdida de masa versus humedad, la velocidad de secado y factores que son necesarios para el diseño de secadores como: la humedad crítica, humedad de equilibrio, modelo cinético ante-crítico y pos-crítico. Los secadores de tipo túnel o bandeja existentes en el laboratorio, no miden de manera precisa la humedad y pérdida de peso. Donde se pueda evaluar el efecto de la temperatura y la velocidad del aire, sobre la velocidad de secado del sólido, ajustándose a modelos matemáticos que describen la cinética de secado. Por tal motivo se plantea el “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR EXPERIMENTAL PARA SÓLIDOS CON CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA DE AIRE.”

Este secador experimental que será implementado en el laboratorio de Procesos Industriales, tendrá como fin ser un medio práctico para aplicar los conocimientos adquiridos en las cátedras de Control de Procesos y Operaciones Unitarias. Con objeto de brindar una mejor comprensión sobre el comportamiento de la velocidad de secado en sólidos.

1.2. Justificación del proyecto

El objetivo de la propuesta va dirigido a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Química proporcionando un secador rotatorio con funciones que permiten la captura y procesamiento de datos del proceso de secado. Usando tecnología basada en Arduino, el sistema de control utiliza programación secuencial que emula el funcionamiento de un PLC y MATLAB para la construcción del software. El conocimiento generado en el uso de estas herramientas tecnológicas

marca la base para futuros diseños de equipos y plantas piloto, que empleen sistema de adquisición de datos y sistemas de control.

En los estudios del diseño y construcción del secador rotatorio, se usaron ecuaciones basadas en el trabajo realizado por C.G.J. Baker, sobre la estructura de secadores rotatorios en 1987. Donde muestra como dimensionar la estructura del tambor o cuerpo de un secador rotatorio con levantadores o paletas que mueven el material. Esto amplía el conocimiento sobre diseño estructural de este tipo de secadores.

Es por eso, que se propone el diseño y la construcción de un “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR EXPERIMENTAL PARA SÓLIDOS CON CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA DE AIRE”, para determinar las curvas de secado, humedad crítica y proscritica en cualquier tipo de muestra sólida.

1.3. Línea base del proyecto

1.3.1. Teoría de secado

La operación de secado es uno de los procesos más comunes, en uso en la industria. Su campo de aplicación es amplio, por ejemplo, se tiene aplicaciones en la industria alimenticia como: el secado de granos para la fabricación de harinas, el secado de materiales de origen animal para crear concentrados, la fabricación de conservas de frutas, etc. En la industria cerámica, se emplea en la “cocción” de las láminas cerámicas o etapas de pre-secado para adoquines y tejas. Otro campo de aplicación es la industria farmacéutica para el control de humedad de los polvos que contiene el agente químico activo o en el recubrimiento de las píldoras.

Algunos autores se refieren a esta operación como: “El secado es un arte comúnmente practicado, pero es una ciencia descuidada”(Keey 1972); “El secado se define como la operación unitaria en la cual una separación líquido-sólido se lleva a cabo, por acción térmica, resultando la evaporación del líquido”(Van't Land 2011). El proceso de secado está relacionado con otros procesos de separación, como: la evaporación, cristalización, destilación, esto se debe a que en estas operaciones existen las tres fases, con la excepción de la destilación. En el proceso de secado se toman en cuenta dos puntos de equilibrio entre las fases, equilibrio sólido-líquido y líquido-vapor.

1.3.1.1. Descripción del proceso de secado

El secado se describe como un proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad), para producir un producto sólido y seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro del sólido, es decir; en la microestructura del mismo. Cuando un sólido húmedo es sometido a un secado térmico, dos procesos ocurren simultáneamente.

A continuación, se presenta algunos de los procesos físicos y químicos relevantes, que se dan en el proceso de secado de materiales.

1.3.1.2. Proceso térmico

Durante el secado, uno de los procesos físicos más importantes es la transferencia de calor. Este aumento de la energía del sistema (sólido húmedo), permite que la humedad contenida en el interior del sólido cambie de estado líquido a vapor, que por su alta volatilidad se mezcle con el aire y de esa forma sea “extraído”. Existen otros limitantes para la remoción de la humedad relacionadas con el aire, pero no se profundiza más allá de este punto, con el objetivo de enfocar únicamente el proceso de ingreso y salida de calor.

Existen tres formas en las que el calor es transferido en un sistema, estas son: conducción, convección y radiación. Cada una tiene su propio comportamiento y por ello sus propias ecuaciones y parámetros. La más sencilla de ellas es la transferencia de calor por conducción. La conducción de calor se da en elementos sólidos o fluidos, solo en el interior de estos. Por ejemplo, si se calienta una lámina gruesa de un metal por una de sus caras el calor se transfiere distribuyéndose en relación con el espesor de la lámina de forma dinámica, hasta alcanzar el equilibrio, momento en el cual ambas caras de la lámina tienen diferente temperatura (láminas muy gruesas) pero constante en el tiempo. Pero que es lo que mantiene diferente la temperatura entre una y otra cara, que hace que no sean iguales las temperaturas. Este parámetro del modelo de conducción se conoce como coeficiente de conductividad, es la resistencia del material a transferir el calor. Esta resistencia hace que exista un gradiente de temperatura entre ambas caras. En el caso de secado de materiales, si se utiliza aire caliente como medio de secado, este aire entrega calor a la superficie del sólido y luego este por conducción es diseminado en todo el material. Esto inicia el proceso de calentamiento del material hasta alcanzar la temperatura de cambio de fase del líquido que contiene. Hasta este punto solo se calienta el material y su

humedad, nada del líquido se ha convertido en vapor. Por tanto, el calor específico del sólido y el líquido, y sus ecuaciones juegan papel importante en el balance de energía.

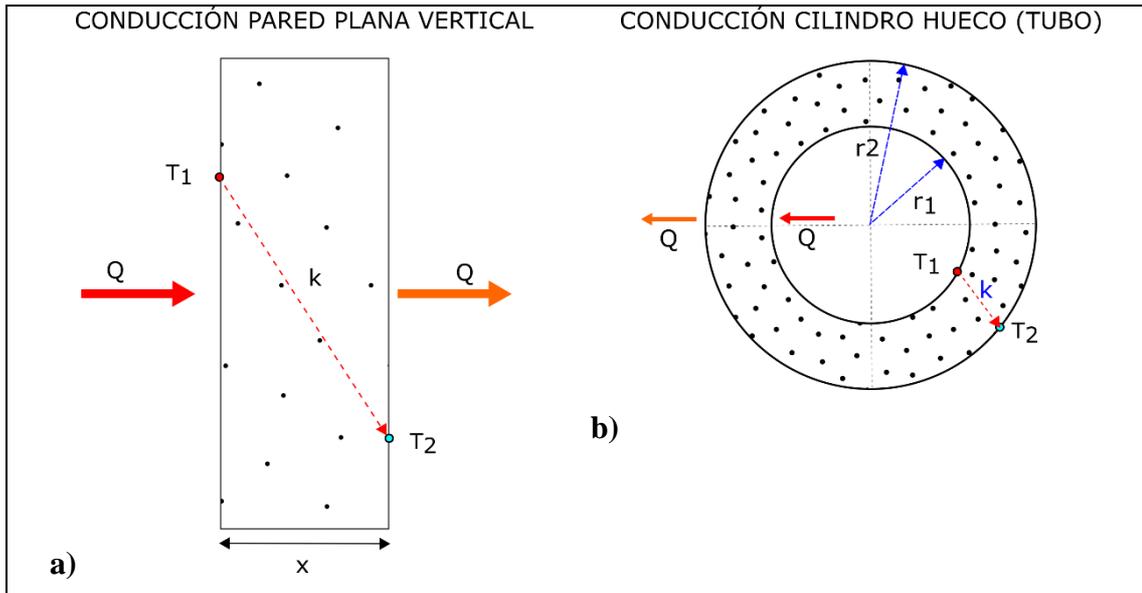


Figura 1-1. Diagramas de conducción para: a) pared plana vertical y b) Cilindro hueco (tubo).

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

En la figura 1-1, se muestran los diagramas para análisis del proceso de conducción en paredes planas verticales y cilindro hueco, en una dimensión. De estos diagramas se puede abstraer las siguientes ecuaciones:

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Q = -kA_r \frac{dT}{dr} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- Q Flujo de calor que entra o sale del material. [kJ/s]
- k Coeficiente de conductividad del material. [W/m K]
- A Área de transferencia de calor, en pared plana es la longitud por el ancho. En el cilindro corresponde a la longitud del cilindro por el área circular. [m²]
- T Temperatura de las paredes interior y exterior. [K]
- x, r Espesor o radio de pared plana o cilindro, respectivamente. [m]

En el caso de convección, sus ecuaciones dependen del régimen de flujo del material que realiza la transferencia de calor. Normalmente se analiza en el punto de contacto entre una superficie y un fluido. La transferencia de calor se realiza desde el fluido al sólido o viceversa. Debido, a que el

fluido tiene un régimen de flujo dado por la velocidad de movimiento. La selección del modelo de cálculo del llamado coeficiente de convección, es dependiente de dicho régimen. Existen muchas variantes de ecuaciones para la aproximación de dicho coeficiente. Pero se podría agruparlos en dos conjuntos, estos son: los modelos para convección natural y para los de convección forzada. Dependiendo de cómo el fluido se mueve se puede optar por un gran número de modelos que dependen de otras condiciones, como: la geometría del sólido, las propiedades reológicas del fluido, el rango de temperatura de trabajo, el tipo de fluido, etc.

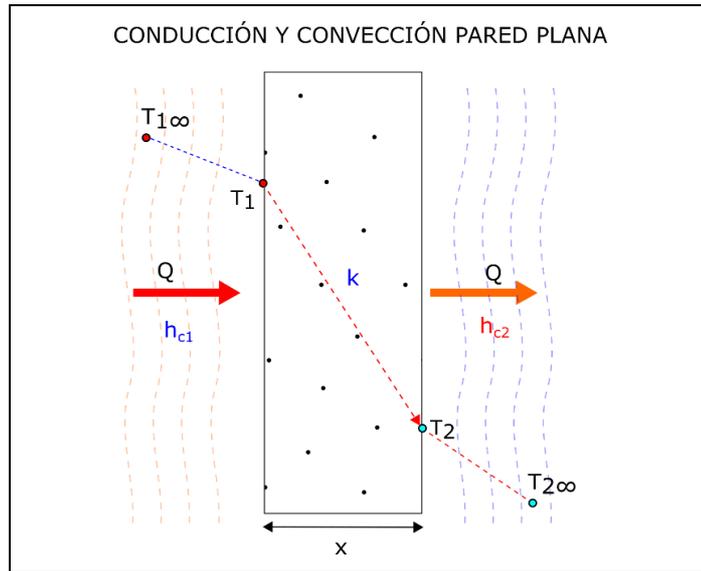


Figura 2-1. Diagramas de conducción y convección para pared plana vertical.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

En el caso de tener sistemas combinados de conducción convección, se representa las ecuaciones como un sistema análogo a un circuito con resistencia eléctricas (Van't Land 2011). En la figura 2-1, se tiene un sistema combinado de transferencia de calor por convección y conducción. Para este sistema las ecuaciones que representa el sistema de resistencia con un símil a los circuitos eléctricos.

$$R_T = R_{h1} + R_c + R_{h2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{h_{c1}A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_{c2}A}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{h_{c1}A} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{kA} + \frac{1}{h_{c2}A}}$$

Ecuación 5

Donde:

R_T Resistencia térmica total. [$m^2 K/W$]

h_{c1}, h_{c2} Coeficiente de convección del fluido. [$W/m^2 K$]

L Longitud de placa o cilindro. [m]

Habiendo calculado la resistencia térmica en las paredes del secador, se puede estimar el coeficiente global de transferencia de calor, que es igual al inverso de la resistencia total de las paredes.

1.3.1.3. Humedad

Se define como la cantidad de agua contenida en un sólido, aunque muchos autores también tratan al contenido de agua en soluciones líquidas como humedad. En este caso, solo se refiere como humedad, a la relacionada con un sólido. Existen, dos tipos de humedad contenida en un sólido la humedad ligada y la desligada. La **humedad desligada** se define como la cantidad de agua contenida en un sólido que no tiene ningún enlace químico o físico fuerte con el sólido. Se podría decir que es la humedad más sencilla de retirar. Dada esta característica de facilidad de remoción por medio de un fluido caliente, como medio de arrastre. La velocidad de remoción de masa de agua es constante (de forma ideal), o tiene una tendencia de decrecimiento constante. Existe humedad ligada superficial e interna, la superficial se origina por sobre la saturación del sólido. Esto deja sobre la superficie del sólido una capa de líquido. La interna comprende el agua contenida en el sólido, normalmente suele aparecer en materiales porosos.

La **humedad ligada** es el agua que se encuentra ligada a la estructura de forma química o física, esto quiere decir que es difícil retirarla. Hay que diferenciar entre el agua adherida a las moléculas y la humedad ligada. La humedad ligada no está unida a las moléculas del material. Solamente se mantiene dentro del sólido, mediante alguna fuerza, como puentes de hidrógeno, lo que hace más difícil su remoción.

Ambas humedades son removibles del sólido, el agua que no se puede remover del sólido es la que mantiene o forma parte de la estructura química del material.

1.3.1.4. Equilibrio líquido vapor y carta psicométrica

En el proceso de secado se ven involucrados varios estados de la materia: sólido, líquido y gas. Es por ello, que es necesario tomar en cuenta el equilibrio que se forma entre estos estados. Es de vital importancia conocer en qué punto bajo las condiciones de operación el sólido húmedo y el aire de secado llegan al equilibrio y ya no intercambian calor y materia.

La forma de conocer el comportamiento del aire como mezcla de gases y agua, se lo obtiene por las ecuaciones psicrométricas y termodinámicas que describen el comportamiento de esta mezcla en fase gaseosa. El resultado de estas ecuaciones es la llamada carta psicrométrica, se puede observar en la figura 3-1, un ejemplo de una carta psicrométrica. En el eje de las “y”, se tiene el contenido de humedad en forma de humedad absoluta, es decir: masa de agua por masa de aire seco. En el eje de las “x”, se tiene la temperatura de bulbo seco, que podría definirse como la temperatura medida del aire con un termómetro en contacto directo con aire seco. Existen otros parámetros como el volumen húmedo, la entalpía de saturación, humedad relativa, temperatura de bulbo húmedo, factor de calor sensible, entre otros. Parámetros que se usan para el diseño de secadores, evaporadores, cristalizadores, extractores que emplean aire como medio de difusión de los componentes gaseosos, etc.

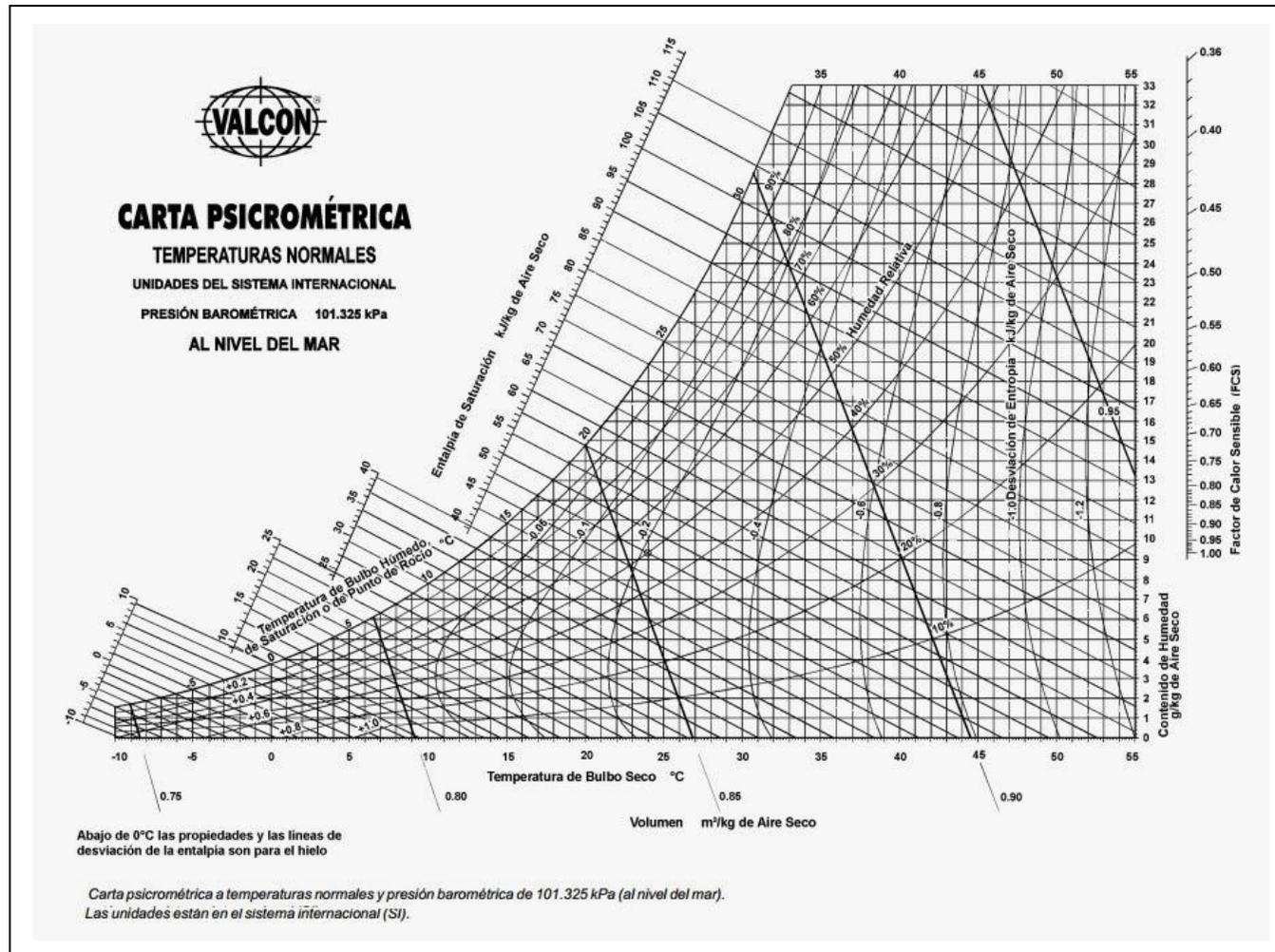


Figura 3-1. Diagrama o carta psicrométrica.

Fuente: psicrometría.blogspot.com, <https://bit.ly/2oU5dfR>

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

1.3.1.5. Curva de secado – Masa vs tiempo

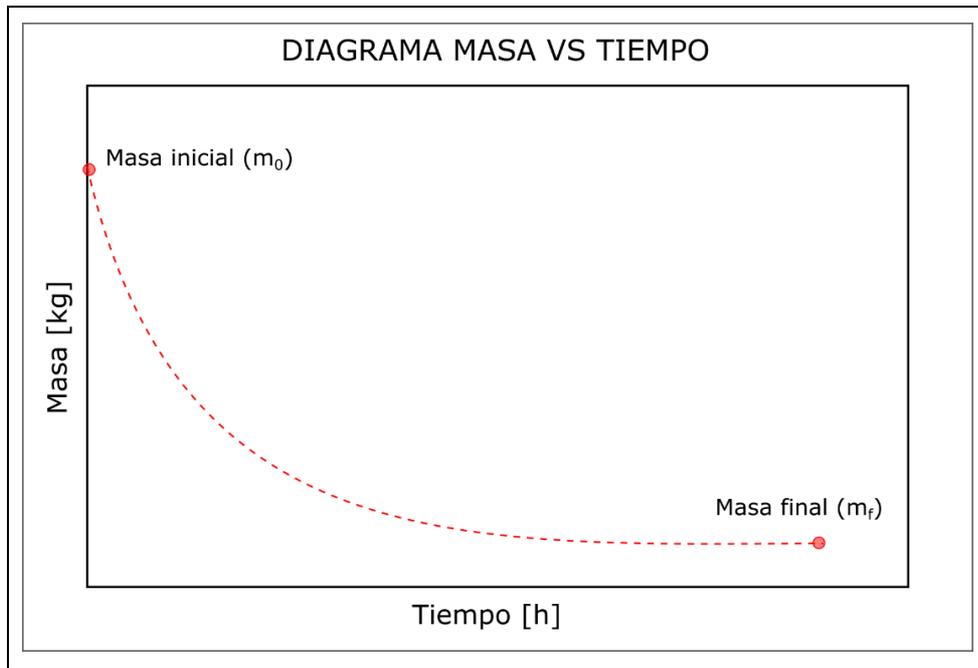


Figura 4-1. Diagrama de variación de la masa del sólido húmedo vs el tiempo.
Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Parte del diseño de un secador, es el análisis de las curvas de secado de los materiales para los que se diseña el equipo. Comprender como se comportan los materiales da pautas para diseñar: las resistencias térmicas, el caudal de aire, capacidad másica del equipo, entre otras variables de diseño. Los datos obtenidos deben representarse en varios diagramas, estos permiten observar los valores necesarios para el diseño. El diagrama masa vs tiempo presenta el cambio de la masa del sólido a secar en relación con el tiempo. En esta curva se puede observar las condiciones de partida del material y las finales. Se observa la forma de la curva, que me indica de forma indirecta si tiene o no al modelo ideal. El modelo ideal tiene una forma exponencial decreciente, con una tendencia asintótica hacia un valor de masa final. Si existen variaciones en la forma como puntos que segmenten la curva en varias partes, podría deberse a un comportamiento no ideal o un fallo en el procedimiento de toma de datos. En la figura 4-1, se observa un ejemplo de un diagrama de masa vs tiempo, en él se observa una curva ideal.

1.3.1.6. Curva de secado-Humedad vs tiempo

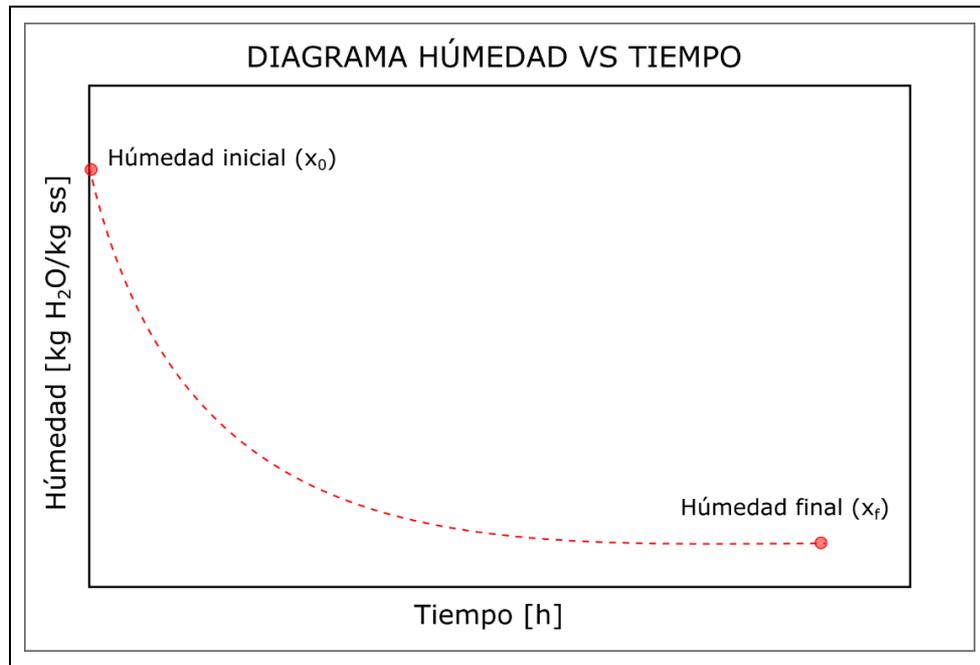


Figura 5-1. Diagrama de variación de la humedad del sólido húmedo vs el tiempo.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Otro diagrama que sirve para comprender el comportamiento de un material en el proceso de secado, es el diagrama de humedad vs tiempo, con él se comprende como la humedad se evapora desde el sólido, y dependiendo de la forma de la curva se comprende si tiene un comportamiento que tiende al modelo ideal. En la figura 5-1, se muestra una curva de humedad vs tiempo ideal.

1.3.1.7. Curva de secado-Velocidad vs humedad absoluta

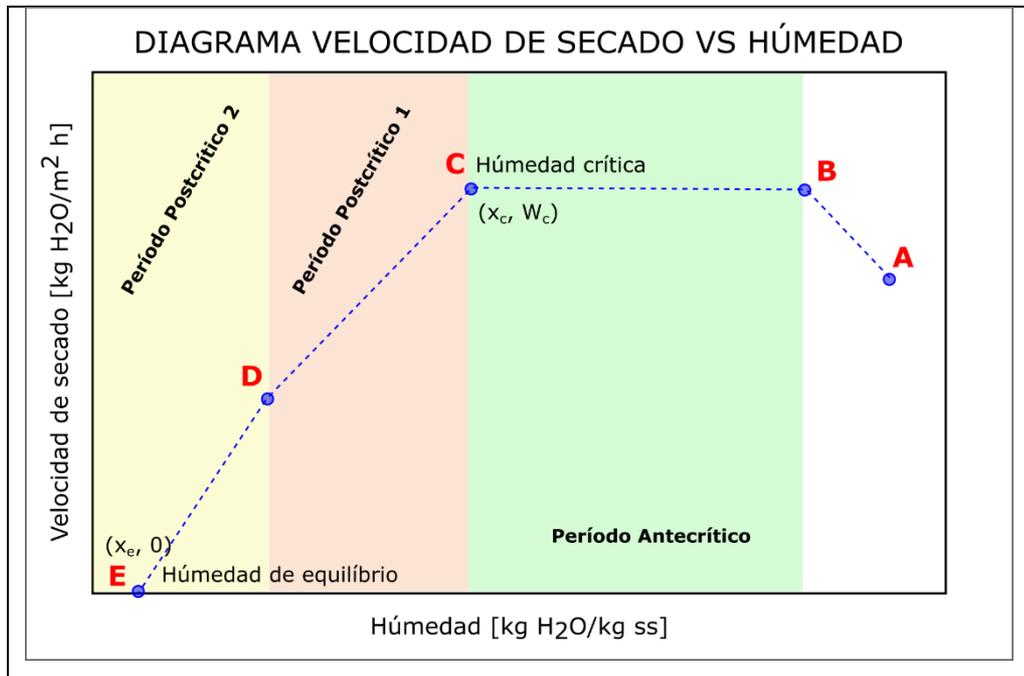


Figura 6-1. Diagrama de variación de la velocidad del sólido húmedo vs la humedad absoluta.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

El diagrama más importante en el estudio del comportamiento del secado es el diagrama de velocidad vs humedad. Aquí se presentan los puntos importantes que permiten comprender como se seca el material. Valores como la humedad crítica y velocidad crítica (punto C), determinan las dos secciones del proceso de secado: período ante crítico y poscrítico. Otro valor importante es la humedad de equilibrio del sólido o humedad final (punto E), esta determina cuanto líquido no se puede retirar del material en las condiciones de secado. Se obtiene como el punto de cruce entre la recta del período poscrítico (segmento CDE) y el eje de la humedad. La humedad crítica se obtiene con el cruce de la recta de velocidad del período antecrítico (recta BC) y el período poscrítico (segmento CDE). Junto con las ecuaciones de integración del tiempo de secado para cada período se puede estimar el tiempo total de secado.

En algunos casos, el material puede tener más secciones en su curva de velocidad. Por ejemplo, el segmento AB, comprende el calentamiento del material hasta la temperatura de secado. El punto A no coincide con una velocidad de secado igual a cero, porque en condiciones ambientales la humedad se evapora, secado natural. Una vez alcanzado el punto B, la humedad no ligada (libre) se evapora a una velocidad constante (en un modelo ideal de secado) hasta alcanzar el punto C. De aquí la humedad ligada empieza a salir del material a una tasa decreciente. Aquí, puede haber dos secciones en el período post-crítico, que depende del proceso de transferencia de

calor y masa dentro del material. En el caso de presentarse un comportamiento similar en los datos experimentales, se puede realizar una buena aproximación analizando únicamente los datos del segundo período poscrítico. En la parte de diseño se hace esto, debido a que los materiales parecen tener dos períodos poscríticos, pero se observa que el error producido por la aplicación de este procedimiento es muy pequeño.

1.3.1.8. Ajuste del modelo de secado

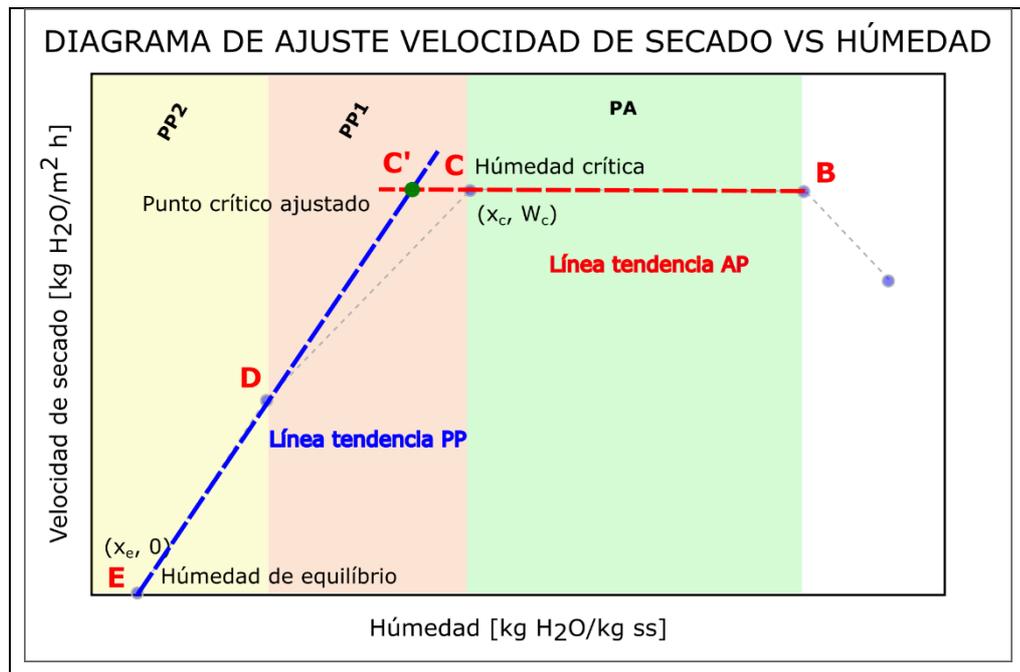


Figura 7-1. Diagrama de ajuste de curva de velocidad del sólido húmedo contra la humedad absoluta.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

El análisis de los datos se centra en encontrar un punto crítico aproximado, mediante un método matemático sencillo. Por ello, el método más fácil de aplicar es la regresión lineal de los datos experimentales. Se divide previamente los datos, por tendencia en dos grupos: datos del período antecrítico y poscrítico. Luego se aplica regresión lineal simple a cada subconjunto de datos para obtener dos rectas. El punto donde se interceptan estas rectas, es nuestra aproximación al punto crítico (C'). Con los datos de la recta del período poscrítico se procede a calcular el punto de humedad de equilibrio. Como se está trabajando con datos experimentales, habrá datos que estarán fuera del rango de tolerancia. Para detectar estos datos y eliminarlos del proceso de regresión se usa un método estadístico. Se usa la media y los valores del cuartil 25 y 75, como referencia para calcular los límites inferior y superior del rango de validación de datos. Todo esto se presenta como el algoritmo codificado en MATLAB.

1.3.1.9. Tiempo de secado.

Con los datos segmentados y reconocidos los puntos de humedad, velocidades críticas y de equilibrio, es necesario calcular el tiempo de secado en los dos períodos. El tiempo de secado ante crítico se calcula usando la ecuación 8. Para el período poscrítico se requiere aplicar bien el método gráfico-integral o el método analítico. El método gráfico integral consiste en aplicar sumas de Riemman, dividiendo en rectángulos el área bajo la curva de forma que aproximen la forma del área bajo la curva que relaciona el inverso de la velocidad de secado vs la humedad. Esta área multiplicada por el cociente de la masa seca del material y la superficie de secado, permite calcular el tiempo de secado. Se observan diagramas del método gráfico-integral en los gráficos 9-3, 10-3 y 11-3.

1.3.2. Secadores

El secado es uno de los procesos más usados en la industria y en la vida cotidiana. Se aplica desde nivel doméstico (secado de ropa, secado del cabello, etc.) y a nivel industrial (tratamiento de minerales, cristalización de azúcar y sal, secado de alimentos). Para llevar a cabo este proceso se requieren de equipos especialmente diseñados para cumplir esta tarea con eficiencia, cuidando la calidad del producto. Estos equipos se conocen como secadores o secaderos, y su selección depende de: las características del material a secar, criterios de costo, funcionalidad, durabilidad, facilidad de mantenimiento, entre otros. A continuación, se presentan algunos tipos de secadores comúnmente usados en forma industrial.

1.3.2.1. Clasificación

Existen un gran número de tipos de secadores, que se pueden diferenciar por: la forma en la que secan el material, las condiciones de secado, la geometría estructural, la fuente de calor, la condición de movilidad del material, etc. Muchos criterios localizan a un secador en más de un grupo de secadores. En términos generales, se puede decir que existen únicamente dos tipos de secadores, diferenciados por su tiempo de operación: por lotes (batch) y continuos. En nuestro caso se obvian los continuos, porque nuestro objetivo es diseñar y construir un secador para cargas pequeñas.

Secador de lecho fluidizado

Es uno de los más utilizados en procesos de menos de 100 kg/h, su principio de funcionamiento es, dotar de características de fluido a un sólido granular. Esto se obtiene mediante la acción del flujo de un gas entre las partículas del material. El principio de fluidización se emplea en otros tipos de operaciones y procesos químicos. Para el caso de secadores se usa un fluido gaseoso caliente, que pasa a través de los gránulos del material, extrayendo su humedad. Si el aire afecta de forma química al material a secar, se puede hacer uso de un gas inerte o uno que no tenga acción química sobre el material. Como se observa en la figura 8-1, se requieren más equipos para poner en funcionamiento un secado de lecho fluidizado, tales como: compresores de aire, recuperadores térmicos, calefactores, ventiladores de succión, ciclones para polvo, sistemas de agitación mecánica, etc. Si el material tiene un límite de temperatura de descomposición bajo, se puede emplear presiones de vacío.

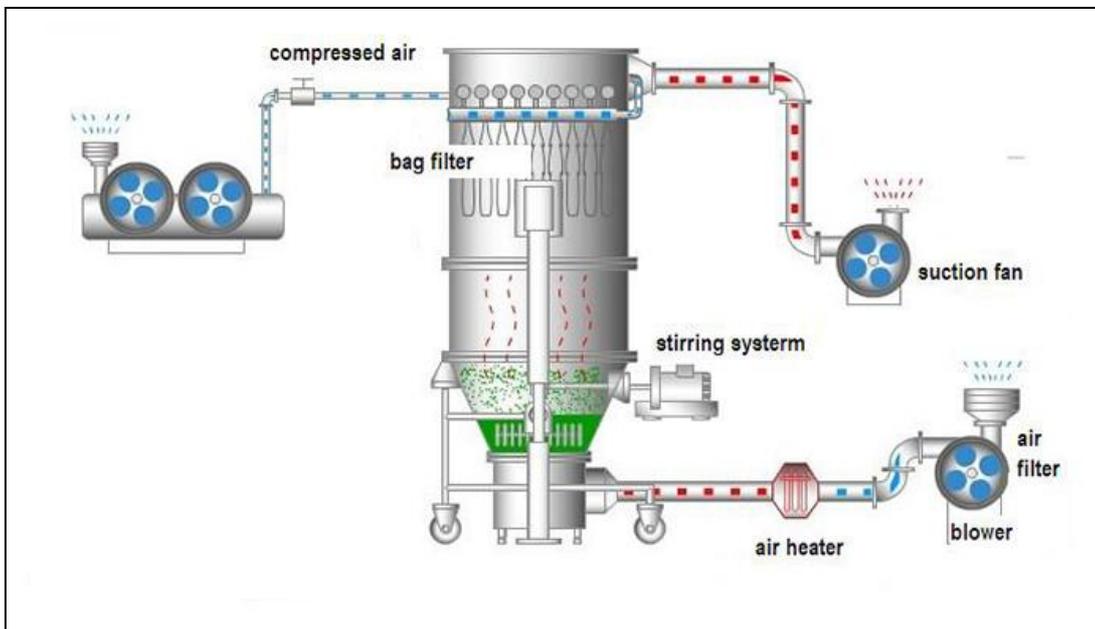


Figura 8-1. Diagrama de secador de lecho fluidizado.

Fuente: CHANGZHOU YIMIN DRYING EQUIPMENT CO. LTD., <http://ym-dryers.com>

Secador de bandejas

Un secador de bandejas es otra opción viable para cargas pequeñas y con tiempos largos de tratamiento, su eficiencia térmica es promedio, siendo posible mejorar el rendimiento con recuperadores térmicos y un adecuado aislamiento. El secado se realiza por convección de un fluido caliente (normalmente aire), sobre una capa del material con una forma definida. Es el tipo de secador más usado en la industria de alimentos, por su sencillez de construcción y

mantenimiento. También se puede modificar para permitir presiones de vacío, y adaptaciones para el uso de gases inertes o no reactivas con el sólido. En la figura 9-1, se observa un secador de tipo bandeja, está construido con acero inoxidable, con el ingreso de aire caliente por la parte inferior, esto permite que el aire caliente pase entre las bandejas hasta la más alta. Un problema de esta forma de secado es la contaminación cruzada, ya que se puede estar secando más de un material al mismo tiempo. Otro problema suelen ser las pérdidas de calor por las paredes, al ser normalmente cuadrado tienen un área externa muy grande.



Figura 9-1. Vista frontal de secador de bandejas.

Fuente: CHANGZHOU YIMIN DRYING EQUIPMENT CO. LTD., <http://ym-dryers.com>

Secador rotatorio

Los secadores rotatorios son usados normalmente en procesos continuos, con cantidades superiores a 100 kg/h. Pero se puede reducir el largo del cilindro y adecuarlo para una carga menor. En la industria farmacéutica se usa para el recubrimiento de las píldoras, un tipo de secador híbrido que es: secador y rociador del material de recubrimiento. En este tipo de secadores el tambor o cilindro interno gira, con la ayuda de paletas internas, mueven el material que es granular. El movimiento del tambor genera un efecto de caída en cascada del material granular, es en este punto donde se aplica un flujo de aire caliente. El contacto del aire mientras cae el

material emula el efecto de lecho fluidizado, lo que aumenta el área de secado por cada partícula del sólido, aumentando a su vez la eficiencia en el proceso de secado.



Figura 10-1. Vista frontal de secador rotatorio PTK PC-C Series para recubrimiento de píldoras, uso farmacéutico.

Fuente: PTK CO., <http://www.ptk4u.com>

En la figura 10-1, se muestra un secador de tipo rotatorio para recubrimientos de la empresa PTK, construido completamente en acero inoxidable por ser orientado al tratamiento de fármacos.

Secadores rotatorios horizontales de paletas

En este tipo de secadores, el material se mueve dentro de un tambor o cilindro estático. El aire o fluido de secado es soplado desde el centro del tambor o la parte inferior. Suele ser común ingresar el aire caliente por la parte inferior, dando mayor tiempo de contacto al aire con el sólido removido. Está orientado a sólidos granulares y tiene muchas más aplicaciones en la industria alimenticia. Es un equipo que trabaja por cargas menores a los 50 kg/h. También permite la adaptación de sistemas de vacío y recuperadores térmicos. En la figura 11-1, se muestra un secador rotatorio horizontal de paletas del fabricante COSMODRY Construido enteramente en acero inoxidable. Está equipado con un sistema de vacío, que se puede notar por la puesta tipo

escotilla con seguros para trabajos a baja presión. Siendo destinado mayormente al tratamiento de alimentos con bajas temperaturas de degradación.



Figura 11-1. Vista frontal secador rotatorio de paletas al vacío.

Fuente: COSMODRY CO., <http://www.cosmodry.it>

1.3.2.2. *Diseño – balance de masa.*

Para el diseño de cualquier proceso es necesario realizar el balance de materiales, energía y momento, con el objetivo de describir de mejor manera como este se comporta, en relación con los flujos de masa que entran y salen del proceso. A continuación, se detalla la temática del balance de masa en un secador. Primero se describe el proceso que se quiere implementar. Partiendo de lo general, se enfoca en el comportamiento de un proceso por lotes. Esto quiere decir que se realiza una carga de material y se procesa durante el tiempo que dure un ciclo de operación. Luego tiene que ser retirado el material, una vez termine el proceso, se prepara nuevamente el equipo (limpieza, calibración, etc.). Continuando, nuevamente con otra carga, repitiendo el proceso las veces necesarias. Esto reduce el número de términos necesarios para balance de masa. Se anula los términos de entrada, generación y consumo, La eliminación del término de entrada se debe a que el material se carga una sola vez por ciclo. En el caso de la generación y consumo

no existen reacciones químicas que se tomen en cuenta. Los términos que aún se mantienen, describen el proceso de secado. La acumulación es un término que decrece con el tiempo, a causa de tener una salida y ninguna entrada. Esta salida es el flujo de humedad retirada por el proceso de secado. Siendo así, expresada la acumulación de la humedad del material en razón del tiempo, como se observa en la ecuación 2.

Balance de masa sobre el material a secar:

$$A = E - S + G - C$$

$$A = -S$$

Ecuación.1

$$\frac{dX}{dt} = -g_x(t, T, X)$$

Ecuación 2

Siendo $\frac{dX}{dt}$, la humedad del material X el tiempo de secado t y $g_x(t, T, X)$ el flujo de humedad evaporada y capturada por el aire de secado. Esta función depende de la temperatura y la humedad retenida por el sólido. Estas variables definen los procesos de transferencia de calor y masa, entre las fases en equilibrio. Este término puede ser complejo de resolver, dependiendo del material y las condiciones de secado. Cuando se define la función como independiente de la temperatura y el tiempo se obtiene la ecuación 3.

$$W = \left(\frac{F_s}{1 + x_0} \right) \left(\frac{x_0 - x_f}{\theta_s} \right)$$

Ecuación 3

Donde W es el flujo másico de humedad retirada del sólido, F_s es el flujo másico o masa del sólido, x_0 es la humedad inicial del sólido, x_f es la humedad final del sólido y θ_s es el tiempo de secado.

1.3.2.3. Diseño – balance de energía.

El balance de energía por el contrario es dinámico, ya que existen entradas, salidas y acumulación. El proceso comienza con el ingreso de material al secador, este entra con una temperatura inicial. Luego cuando se empieza el ciclo de secado, en una primera etapa este se calienta hasta el punto donde empieza a evaporar la humedad. Este proceso está gobernado por la transferencia de calor del aire al sólido, y la transferencia de masa del sólido al aire. El vapor generado por la humedad evaporada, a su vez aumenta la masa del flujo de aire. En términos generales por análisis bajo la ley de conservación de la energía y las leyes de la termodinámica, el flujo de salida de aire tiene

menor entalpía que el de entrada aun teniendo mayor cantidad de material. Los balances se pueden simplificar por ser un proceso batch, obteniendo de esta forma las ecuaciones 4, 5, 6 y 7.

$$Q_{ah} = \frac{F_a (C_{pa} + Y_0 C_{pv}) (T - T_0)}{3600} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q_{sh} = \frac{\left[\frac{F_s}{(1+x_0)\theta_s} \right] (C_{ps} + x_0 C_{pv}) (T_s - T_0)}{3600} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Q_{we} = \left[\frac{F_s}{(1+x_0)\theta_s} \right] (x_0 - x_f) \left[\frac{H_v - (C_{pl} - C_{pv})T}{3600} \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

$$Q_T = Q_{ah} + Q_{sh} + Q_{we} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Q_{ah} Gasto térmico para calentar el aire. [kW]

Q_{sh} Gasto térmico para calentar el sólido a secar. [kW]

Q_{we} Gasto térmico para evaporar la humedad del sólido. [kW]

C_{pa} Calor específico del aire a las condiciones especificadas. [kJ/kg K]

C_{pv} Calor específico del vapor de agua a las condiciones especificadas. [kJ/kg K]

C_{pl} Calor específico del agua líquida a las condiciones especificadas. [kJ/kg K]

T_s Temperatura del sólido. [K]

T_0 Temperatura de referencias. (0°C) [K]

H_v Entalpía de vaporización del agua. [kJ/kg]

1.3.3. *Materia prima (Alimentos).*

Los estudios de secado se realizan usando varios materiales de origen alimenticio. Con el objetivo de obtener las curvas de secado y el resto de parámetros para el diseño.

1.3.3.1. Arveja

Con nombre científico *Pisum sativum*, también llamada alverja. Es una planta leguminosa perteneciente al grupo herbácea. Es originaria de la cuenca del mediterráneo, pero se encuentra distribuida por todo el mundo. Se cultiva para obtener su semilla (guisantes). Son consumidos como granos, al igual que el frejol, maíz, etc. Los guisantes tienen una forma esférica y una humedad del 80%, razón por la cual fue elegida como material de secado.

1.3.3.2. Maíz

Con nombre científico *Zea Mays*, también llamado choclo. Es una gramínea de ciclo anual domesticada por pueblos del norte y centro América y posteriormente llevado a Europa en el siglo XVII. Los granos de maíz, tienen una forma irregular comparada con las arvejas, pero es un alimento común, al cual se le aplica secado. Para usarlo, se requiere que se encuentre casi seco (dureza intermedia). Esto porque al estar demasiado “tierno”, contiene demasiada agua y al estar demasiado seco, no se notaría una variación de peso considerable.

1.3.3.3. Trigo

Con nombre científico *Triticum*, es un nombre que engloba un grupo de cereales, perteneciente a la familia de las gramíneas. Es de las más cultivadas en el mundo y base de la alimentación del ser humano y los animales que cría. Los granos de trigo tienen una forma definida e irregular. Se escogió como material de estudio por tener un porcentaje de humedad media en torno al 50%, en su forma comercial.

1.3.3.4. Determinación de humedad mediante método de la balanza de humedad.

Tabla 1-1 Procedimiento para determinar el contenido de humedad método balanza de humedad

HUMEDAD NTE INEN 1513 (MOD. BALANZA HUMEDAD)	Equipos/ materiales/ reactivos	Parámetro a analizar	Procedimiento	Cálculos e interpretación de resultados
	<p>EQUIPOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Balanza térmica para humedad ○ Canastilla de aluminio <p>REACTIVOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Ninguno 	<p>HUMEDAD DE ALIMENTOS (GRANOS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prepara la muestra de trabajo, esto incluye reducción de tamaño, eliminación de cáscara y epitelios. • Pesar aproximadamente de 1-5 gramos de muestra. (No es necesario un peso exacto) • Codificar y rotular las muestras. • Colocar la muestra en la balanza térmica para humedad, anotar el peso inicial. • Correr el ciclo de secado, en modo estándar. Salto unitario de temperatura a 120°C, y criterio de finalización de 0,5% en variación de peso. • Anotar los resultados de humedad absoluta, porcentaje de sólidos y masa perdida. 	$x = \frac{m_i - m_s}{m_s}$ <p>x= humedad absoluta del material. [kg H₂O/kg ss] <i>m_i</i>= masa en el tiempo i de la muestra. [kg] <i>m_s</i>= masa del sólido seco. [kg]</p>

Fuente: (INEN, 2013)

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019.

1.3.3.5. Determinación de curva de secado de materiales método de la estufa.

Tabla 2-1 Procedimiento para la determinación el contenido de humedad método de la estufa.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL - CURVA DE SECADO (BASADO EN NTE INEN 1513)	Equipos/ materiales/ reactivos	Parámetro a analizar	Procedimiento	Cálculos e interpretación de resultados
	EQUIPOS: Balanza analítica Caja Petri Estufa Desecador Pinzas metálicas.	CURVA DE SECADO DE MATERIALES	<ul style="list-style-type: none"> • Prepara la muestra de trabajo, esto incluye reducción de tamaño, eliminación de cáscara y epitelios. • Pesar aproximadamente 40 gramos de muestra. (No es necesario un peso exacto) • Codificar y rotular las muestras. • Tomar el primer peso de la muestra. • Colocar en la estufa a la temperatura de trabajo necesaria (70°C) y un flujo de aire mínimo. • Pasado el tiempo de muestreo t=30 min. Realizar una nueva toma del peso de la muestra y anotar el tiempo y peso. • Repetir el procedimiento anterior hasta peso constante. 	$x = \frac{m_i - m_s}{m_s}$ $W = -\frac{m_s}{A} \frac{dx}{dt}$ <p>x= humedad absoluta del material. [kg H₂O/kg ss] m_i= masa en el tiempo i de la muestra. [kg] m_s= masa del sólido seco. [kg]</p>

Fuente: (INEN, 2013)

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019.

1.3.3.6. Determinación de la curva de secado método secador rotatorio.

Tabla 3-1 Procedimiento para la determinación curva de secado método secador rotatorio

ANÁLISIS EXPERIMENTAL - CURVA DE SECADO MÉTODO SECADOR ROTATORIO (BASADO EN NTE INEN 1513)	Equipos/ materiales/ reactivos	Parámetro a analizar	Procedimiento	Cálculos e interpretación de resultados
	EQUIPOS: Balanza de humedad Balanza técnica Pinzas metálicas Vidrio de reloj o recipiente	CURVA DE SECADO DE MATERIALES	<ul style="list-style-type: none"> • Prepara la muestra de trabajo, esto incluye reducción de tamaño, eliminación de cáscara y epitelios. • Pesarse aproximadamente 5-15 kilogramos de muestra. (No es necesario un peso exacto) • Tomar el primer peso de la muestra. • Tomar una cierta cantidad de materia para llevar a la balanza térmica para determinar la humedad inicial del mismo. • Colocar el secado a la temperatura de trabajo necesaria (70°C) y un flujo de aire mínimo. • Comprobar que el software de adquisición de datos (srtamMonitor) este guardando los datos. • Parar el secado hasta que el software detecte que ya no exista variación de humedad. • Tomar una pequeña cantidad de producto final y llevarlo hasta la balanza térmica para determinar la humedad final. 	$x = \frac{m_i - m_s}{m_s}$ $W = -\frac{m_s}{A} \frac{dx}{dt}$ <p> x= humedad absoluta del material. [kg H₂O/kg ss] m_i= masa en el tiempo i de la muestra. [kg] m_s= masa del sólido seco. [kg] </p>

Fuente: (INEN, 2013)

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

1.4. Beneficios directos e indirectos

1.4.1. Directos

Con este proyecto el secador experimental tiene como beneficiario directo, el Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias.

1.4.2. Indirectos

Los beneficiarios indirectos del desarrollo del proyecto son los estudiantes y docentes de las cátedras de Operaciones Unitarias y Control de Procesos. Que están relacionadas con el secador rotatorio para el estudio del proceso de secado. Además de los beneficios que aporta el secador rotatorio a la Facultad, como el conocimiento sobre: diseño de secadores rotatorios, sistemas de control, procesamiento de datos experimentales y análisis de una operación unitaria.

CAPITULO 2

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. Objetivo General

Diseñar y construir un secador experimental para sólidos con control de flujo y temperatura de aire.

2.2. Objetivos Específicos

- Simular experimentalmente la operación de secado para obtener datos que permitan graficar las curvas de secado tradicional y diferencial (Temperatura, Presión, Humedad y Velocidad).
- Identificar las variables del proceso en base a los datos experimentales de simulación, temperatura y flujo de aire.
- Realizar el diseño de ingeniería que involucra los cálculos técnicos, el dimensionamiento, capacidad del equipo, materiales, tipo de control y financiamiento presupuestario.
- Validar el diseño de ingeniería, realizando pruebas finales de secado en el secador experimental.

CAPITULO 3

3. ESTUDIO TÉCNICO

3.1. Localización del proyecto

El laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias, se encuentra en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la ciudad de Riobamba 1 ½ km Panamericana Sur.

Tabla 1-3 Descripción geográfica del proyecto.

UBICACIÓN	VALOR
País:	Ecuador
Provincia:	Chimborazo
Cantón:	Riobamba
Parroquia:	Lizarzaburu
Coordenadas GMS:	1°39'20.2"S 78°40'43.0"W

Fuente: Google Maps

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

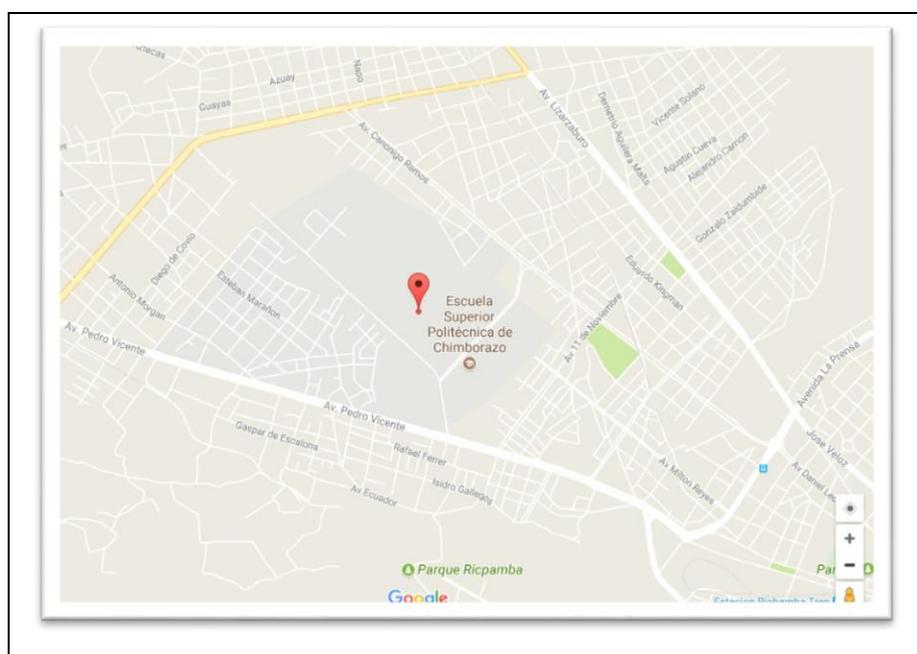


Figura 1-3 Localización del proyecto

Fuente: Google Maps ®

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

3.2. Ingeniería del proyecto

3.2.1. Análisis experimental de secado de granos.

Los procedimientos, técnicas y métodos utilizados en la parte experimental de este trabajo son tan basados en las siguientes normas técnicas: *NTE INEN 1513 (1987) (Spanish): Granos y cereales. Maíz. Determinación del contenido de humedad*, *NTE INEN 1462 (1987) (Spanish): Granos y cereales. Determinación del contenido de humedad. (Método de arbitraje)*.

3.2.2. Determinación experimental de propiedades de secado

3.2.2.1. Selección de material a analizar

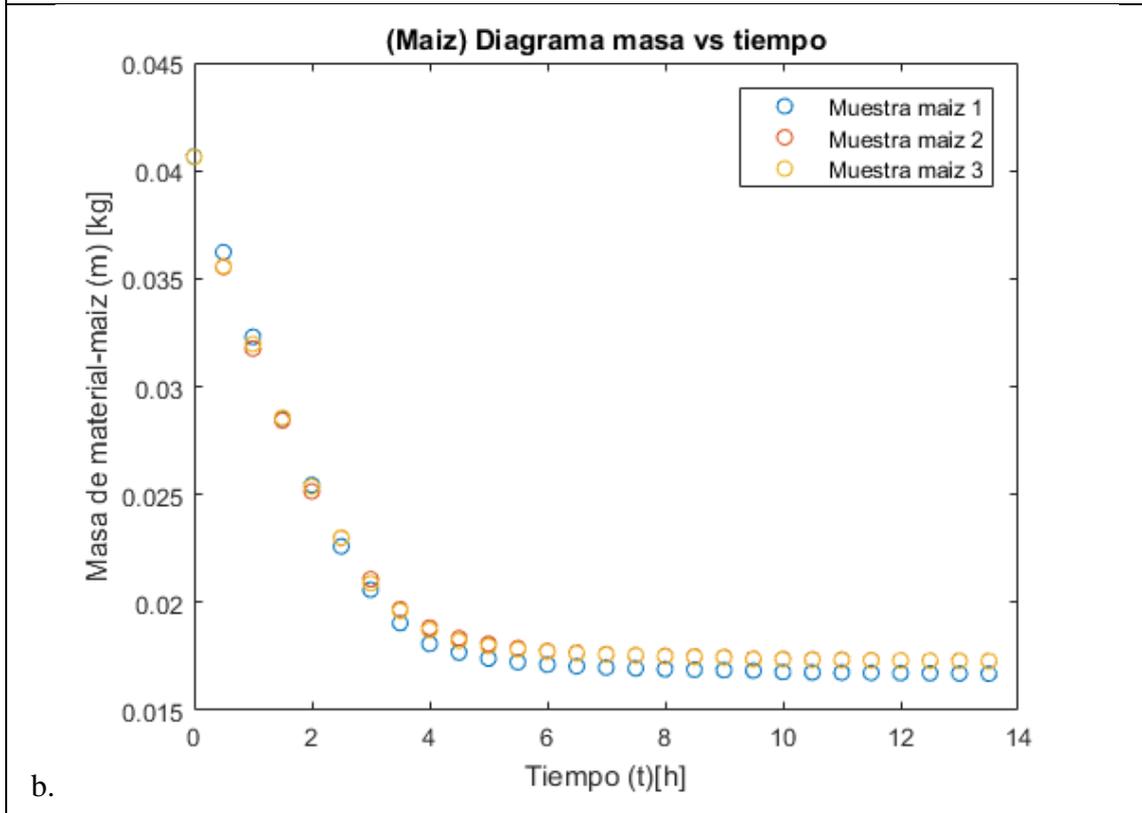
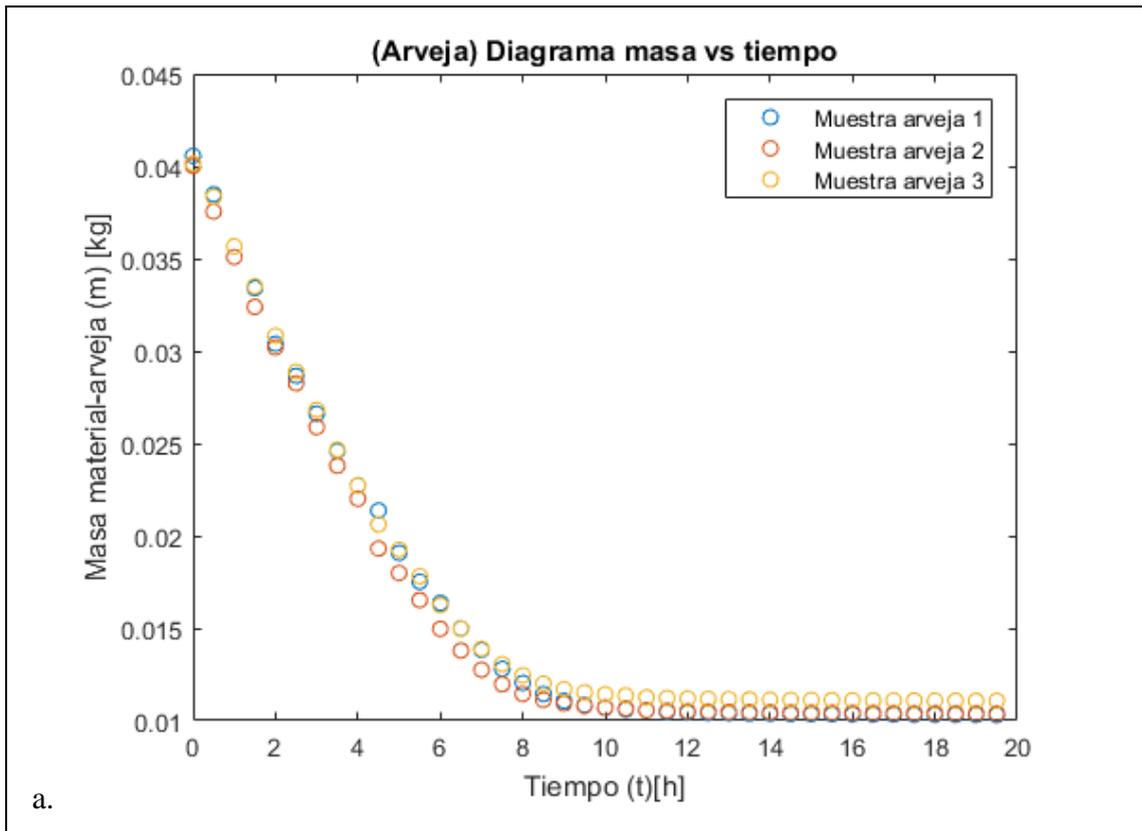
Los materiales a analizar seleccionados son granos con granulometría mayor a 3 mm, y que tengan un contenido de humedad mayor a 30%. Los granos seleccionados son: arveja, maíz y trigo remojado. Se selecciona como base de pesaje 40 g, el peso no va a ser exactos. El material se coloca en una caja de Petri, previamente pesada. El proceso se lleva a cabo por triplicado para constatar la validez de los resultados.

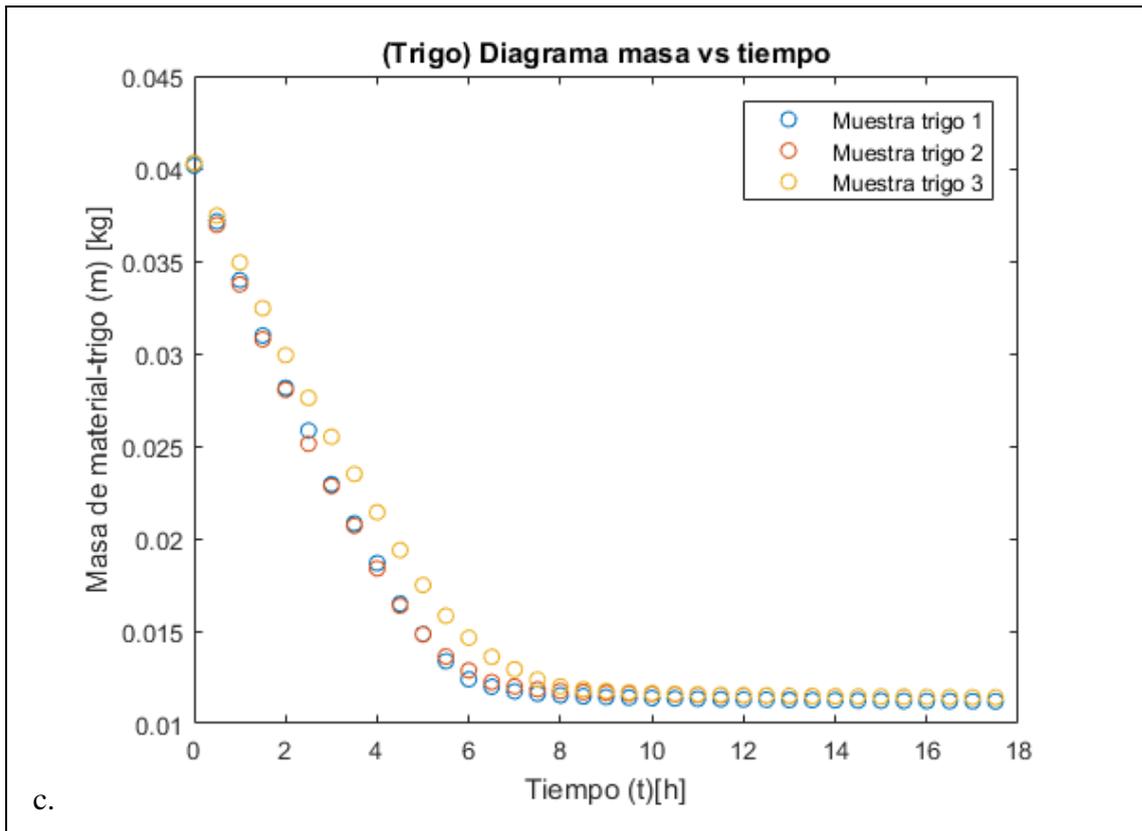
3.2.2.2. Toma de datos experimentales de secado

El procedimiento de obtención de los datos experimentales se presenta en la tabla 3-3, los datos necesarios para el análisis, son el peso de la muestra y el tiempo. A continuación, se presenta la tabla con los resultados de la toma de datos experimentales.

3.2.2.3. Curva de secado – Masa vs tiempo

De los datos experimentales se puede graficar varias curvas con las que se puede dilucidar el comportamiento del material en el proceso de secado. La primera curva a presentar es la de masa vs tiempo, en esta gráfica se observa la forma en que el sólido pierde humedad. El comportamiento describe un modelo exponencial, comenzando desde un punto cerca de los 40 gramos, hasta llegar a un límite inferior de 10 gramos. A continuación, se muestran los resultados de las tres muestras realizadas por cada material. Se observa que describen comportamientos similares. En el gráfico 1-3, se muestran los resultados de la pérdida de masa entre las tres muestras de arveja, maíz y trigo. Los cálculos se realizaron con MATLAB, versión 2017. (Lockhart y Tilleson 2018)





c. **Gráfico 1-3 Diagrama masa vs tiempo para las muestras de: a) arveja, b) maíz y c) trigo.**
 Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

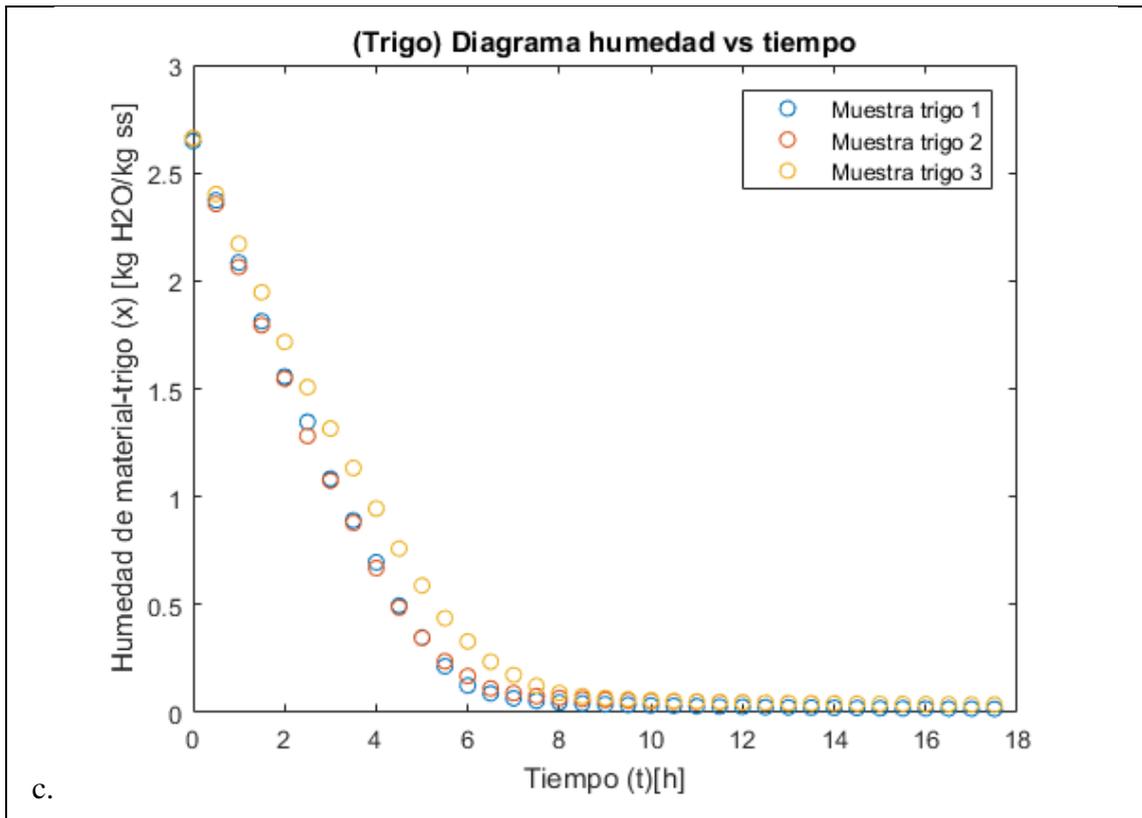
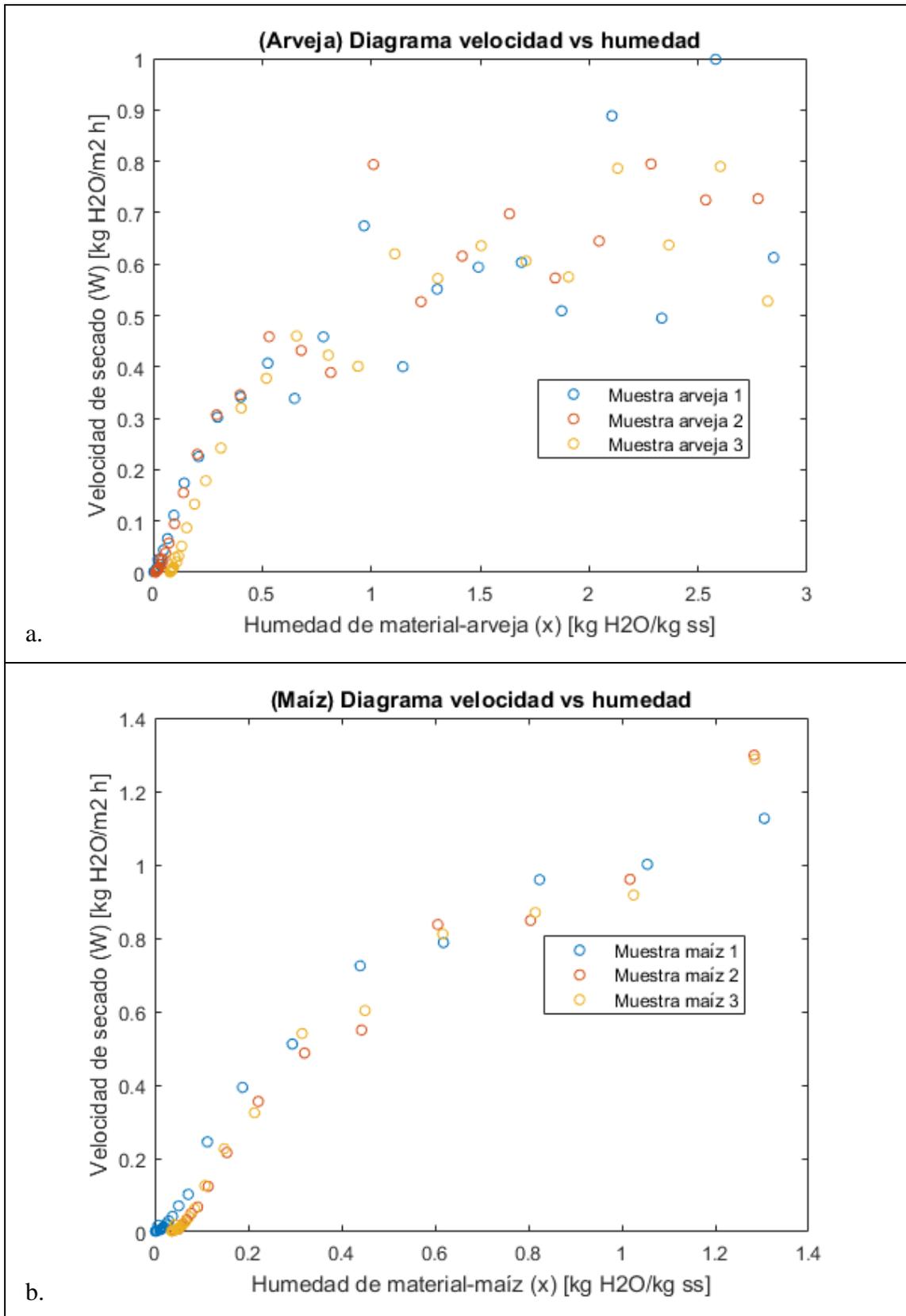


Gráfico 2-3 Diagrama humedad vs tiempo para las muestras de: a) arveja, b) maíz y c) trigo.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

En el gráfico 2-3, se observan los resultados de las muestras en evaluación del cambio de humedad de los tres tipos de grano. Igualmente describen un comportamiento exponencial con tendencia hacia un límite de humedad. Este punto final de humedad se conoce como humedad de equilibrio.

3.2.2.5. Curva de secado – Velocidad de secado media vs humedad media



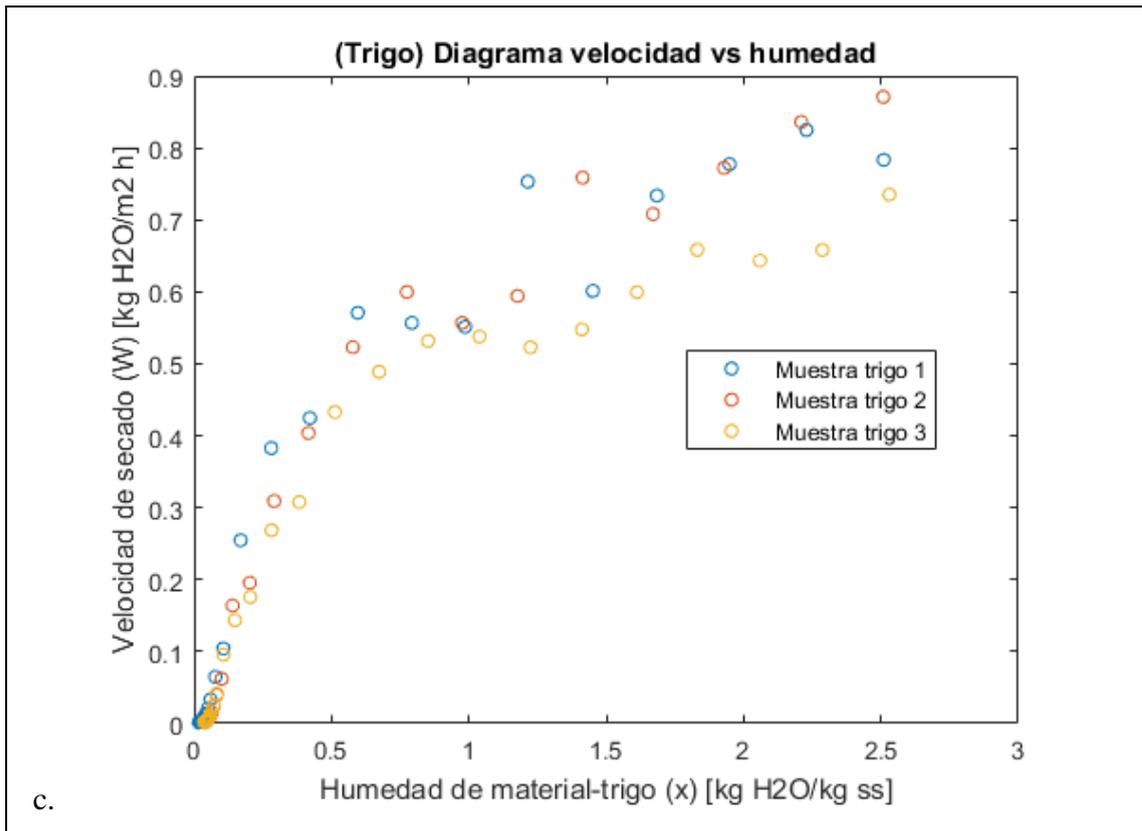
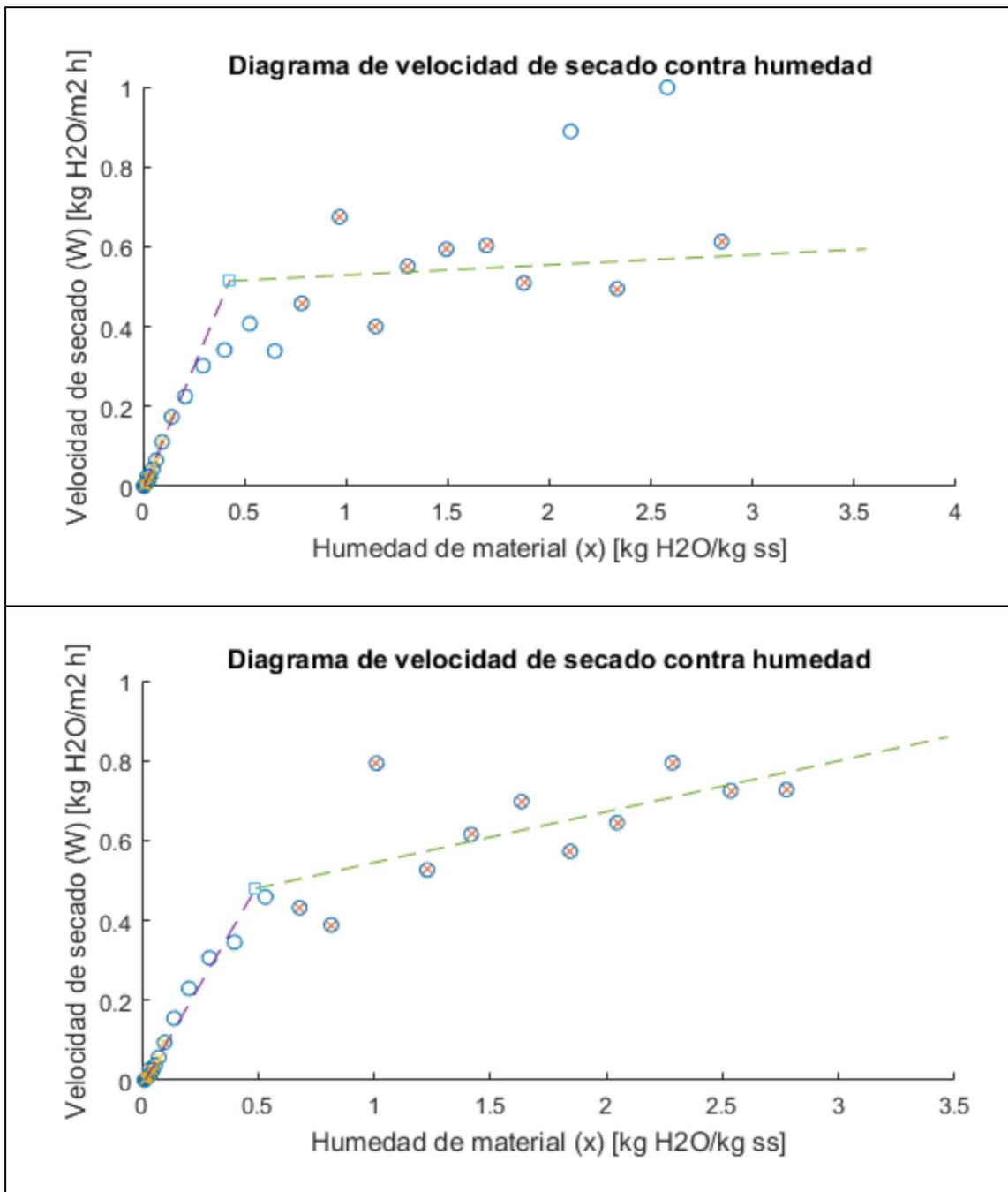


Gráfico 3-3 Diagrama velocidad vs tiempo para las muestras de: a) arveja, b) maíz y c) trigo.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

En el gráfico 3-3, se observa el resultado del cálculo de la velocidad de secado en los puntos de humedad media del proceso de secado. En el resultado de las tres muestras de material se observa que existen tres secuencias de puntos, con una tendencia semejante al modelo ideal de secado de un material. En la sección siguiente se presenta el análisis de las etapas del proceso de secado. Se determina mediante un método estadístico, los puntos que se encuentran por fuera de rango entre el segundo y tercer cuartil. Los puntos descartados no se encuentran marcados con una “x” en rojo.

3.2.2.6. Determinación de humedad crítica y de equilibrio



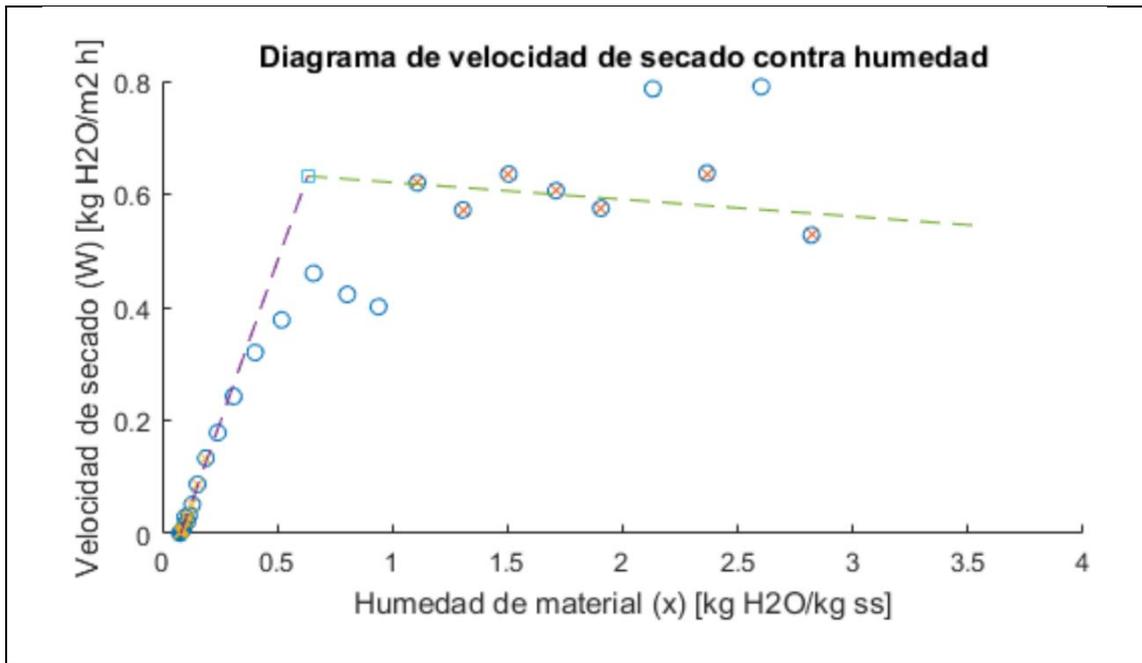
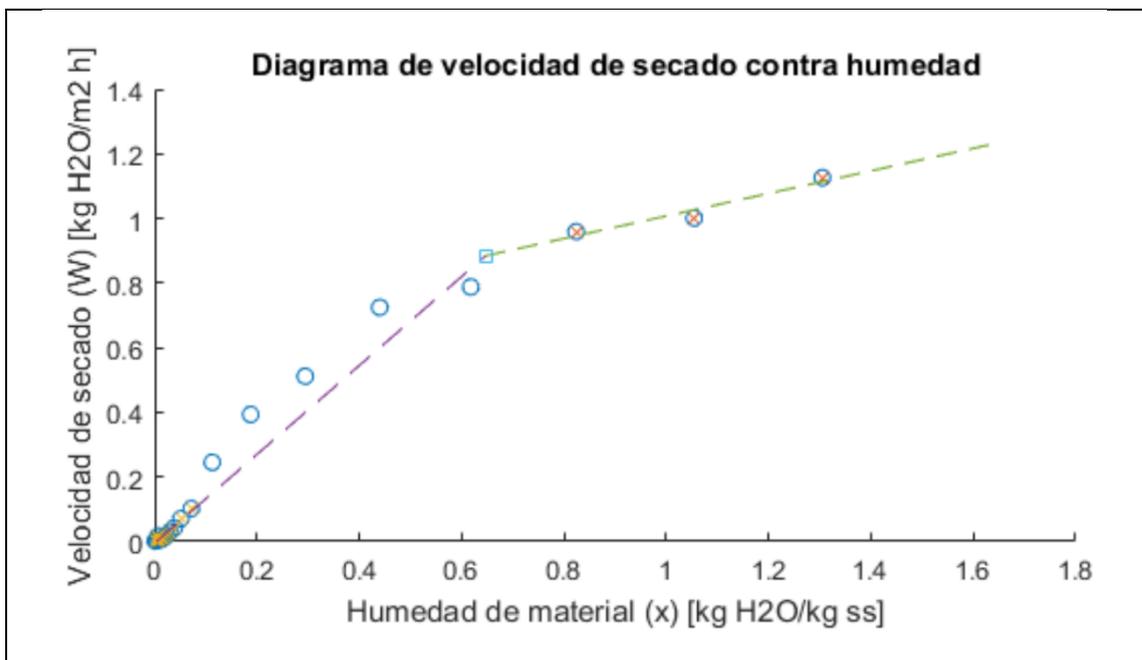


Gráfico 4-3 Diagrama análisis de puntos del modelo de secado para las muestras de arveja.
 Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

Marcado con líneas purpura se encuentra la aproximación de la línea de tendencia de los datos del período post crítico. Con una línea de color verde se encuentra la tendencia de los datos del período ante crítico. La intersección de estas dos líneas corresponde a la humedad crítica. El procedimiento es el mismo para todos los análisis. La intersección de la línea del período post crítico y el eje de la humedad, corresponde a la humedad de equilibrio.



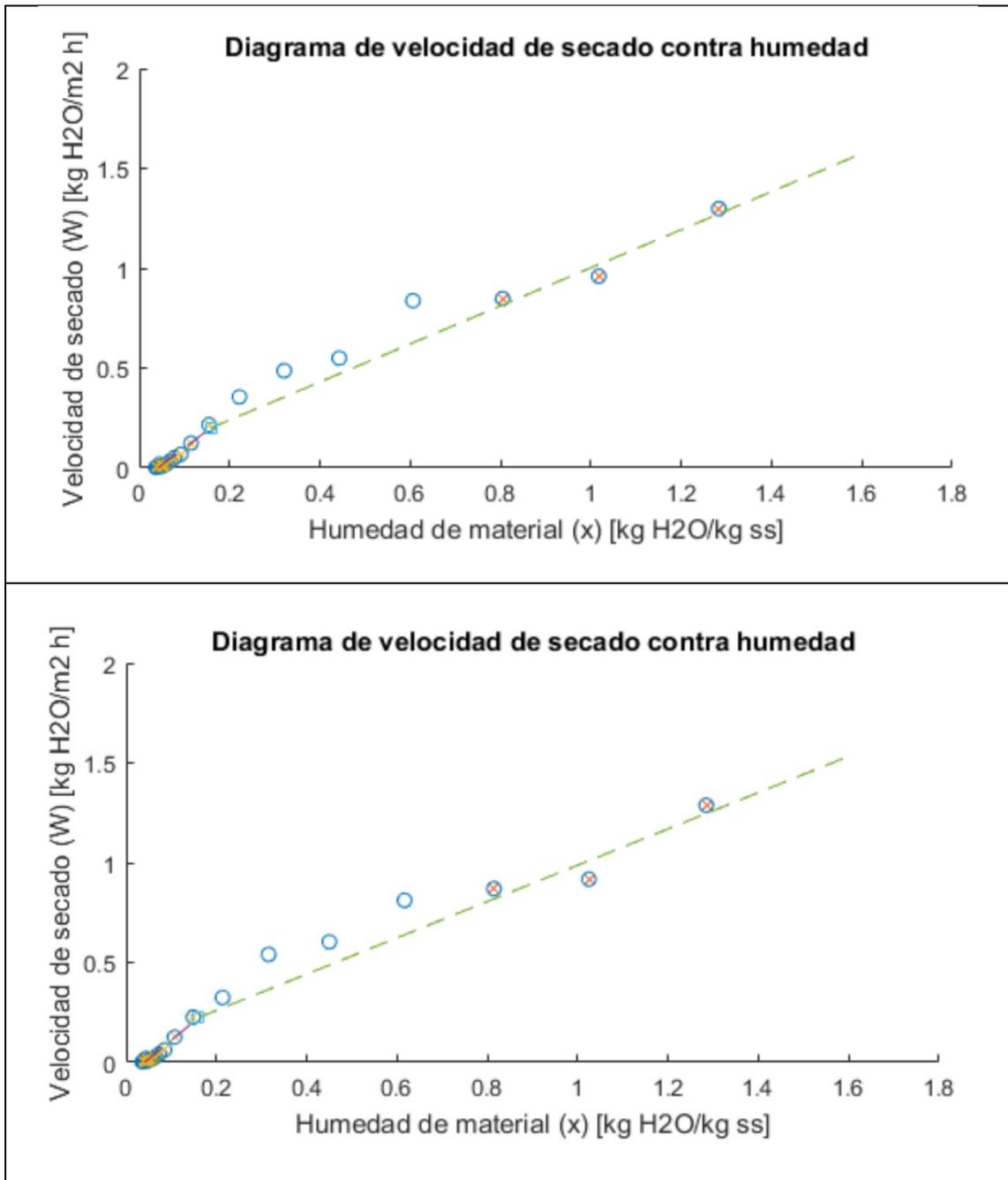
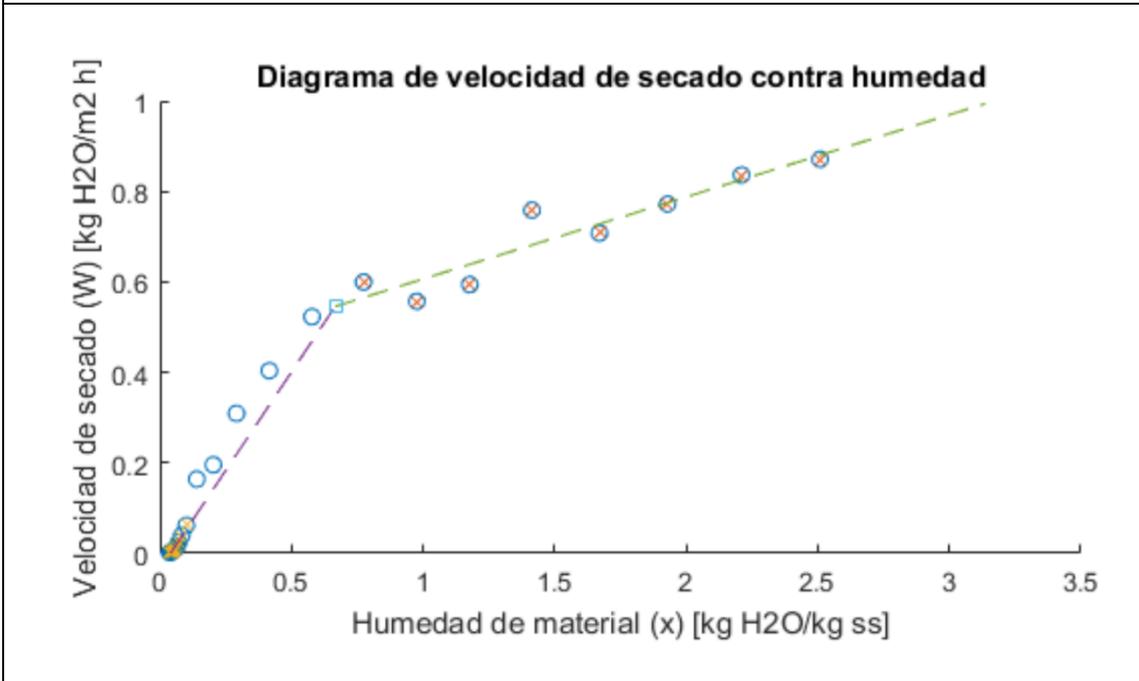
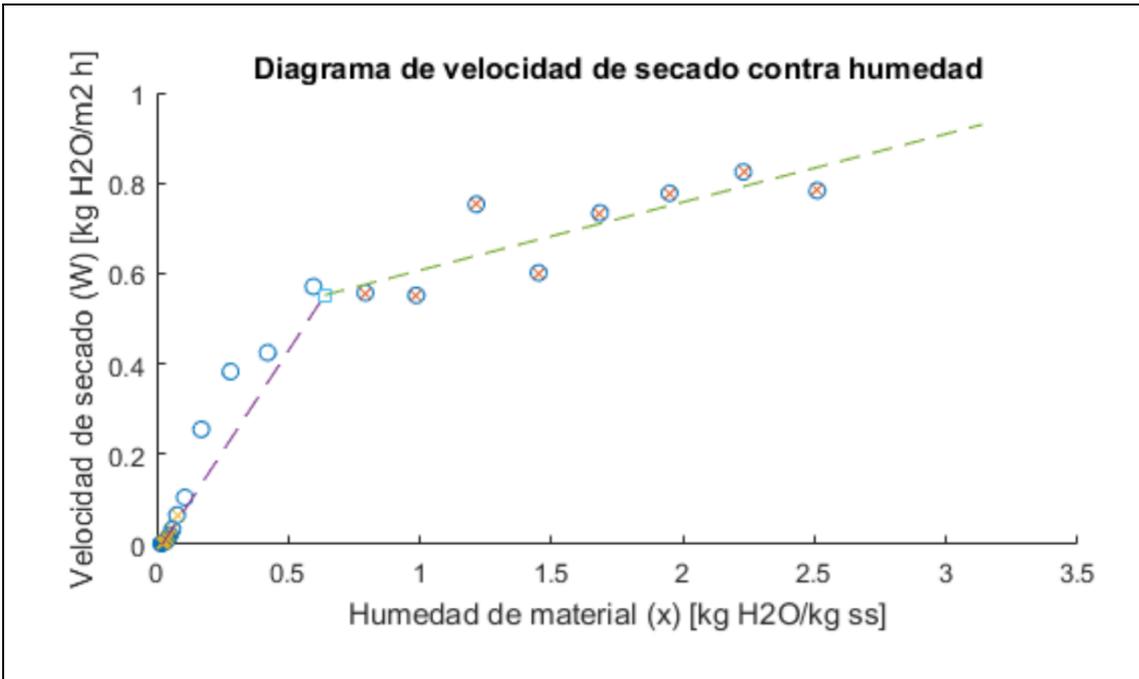


Gráfico 5-3 Diagrama análisis de puntos de modelo desecado para las muestras de maíz.
 Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

En el caso del maíz los datos son menos congruentes y la estructura de los datos de velocidad y humedad, muestran estar muy alejados del comportamiento ideal. Siendo demasiado variante en la primera muestra, alejándose completamente del comportamiento de las otras dos muestras.



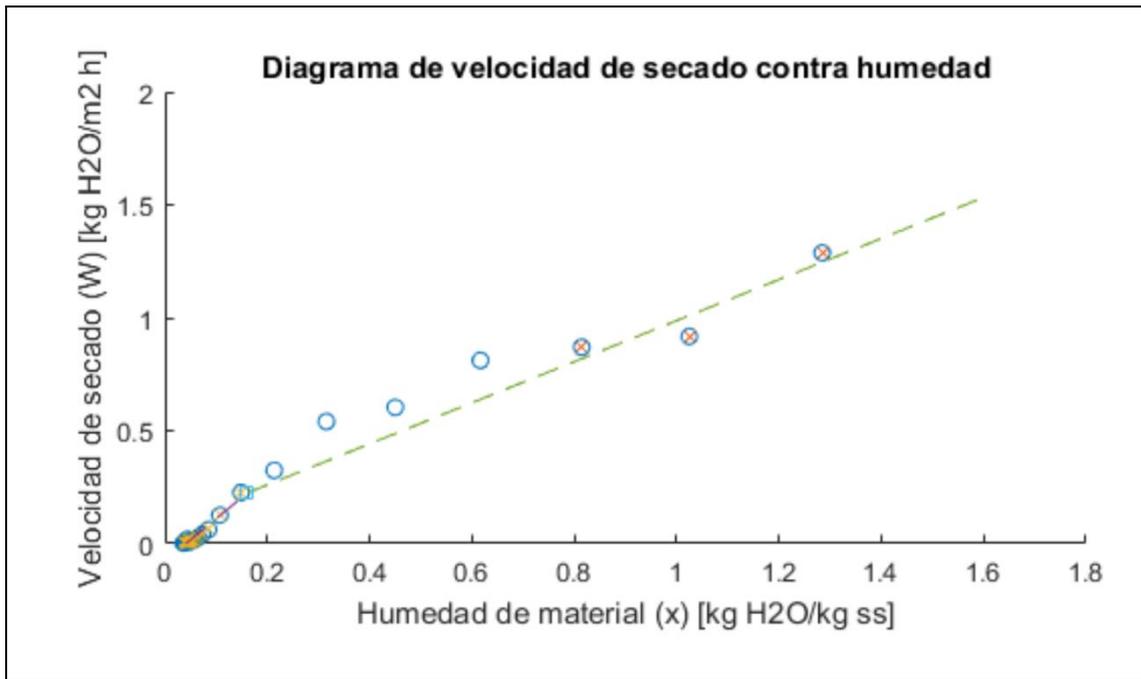


Gráfico 6-3 Diagrama análisis de puntos de modelo desecado para las muestras de trigo.
 Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Para las muestras de trigo el resultado son comportamientos muy parecidos de hecho en el cálculo del tiempo de secado post crítico los tiempos son casi iguales.

3.2.2.7. Cálculo del tiempo de secado – período ante crítico.

Para calcular el tiempo del período antecrítico se asume que, en este período se mantiene una velocidad de secado constante igual a la velocidad en el punto crítico, aunque los datos experimentales no reflejen esos resultados (Ocón García y Tojo Barreiro 1976). Para ello, se usa la ecuación que permite calcular el tiempo ante crítico:

$$\theta_{ac} = -\frac{m_s}{A} \left(\frac{x_c - x_0}{W_c} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Calculo del tiempo ante crítico para muestra de arveja 1, el resto de resultados se presentan en la tabla 4-3.

$$\theta_{ac} = -\frac{0,010275}{0,006793} \left(\frac{0,426533 - 0,612690}{0,514181} \right) = 7,12 \text{ h}$$

Donde:

θ_{ac} Tiempo de secado del período ante crítico. [h]

- m_s Masa seca de la muestra. [kg]
 A Área de secado. [m²]
 x_c Humedad crítica de material. [kg H₂O/kg ss]
 x_0 Humedad inicial de material. [kg H₂O/kg ss]
 W_c Velocidad crítica de secado. [kg H₂O/m² h]

Tabla 2-3 Resultados del análisis de curvas de velocidad de secado.

		x_c	x_e	W_c	θ_{ac}	A_{pc}	θ_{pc}	θ_t	Media θ_t
ARVEJA	m_1	0,4265	6,754E-03	0,5141	7,1188	-8,568	12,9598	20,0787	19,82
	m_2	0,4899	0,01388	0,4797	7,2042	-8,9221	13,4955	20,6997	
	m_3	0,6321	0,08046	0,6319	5,2356	-8,9022	13,4654	18,701	
MAÍZ	m_1	0,6467	0,003932	0,8843	1,5806	-5,8731	12,4732	14,0538	19,05
	m_2	0,1577	0,04159	0,1991	12,0034	-4,7706	10,1318	22,1352	
	m_3	0,1613	0,04117	0,2247	10,6103	-4,8792	10,3623	20,9727	
TRIGO	m_1	0,6389	0,02076	0,5522	4,8462	-9,3346	13,3525	18,1988	18,33
	m_2	0,6663	0,04031	0,5492	4,8269	-9,3469	13,3701	18,197	
	m_3	0,4392	0,04132	0,4572	6,541	-8,4344	12,0648	18,6059	

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

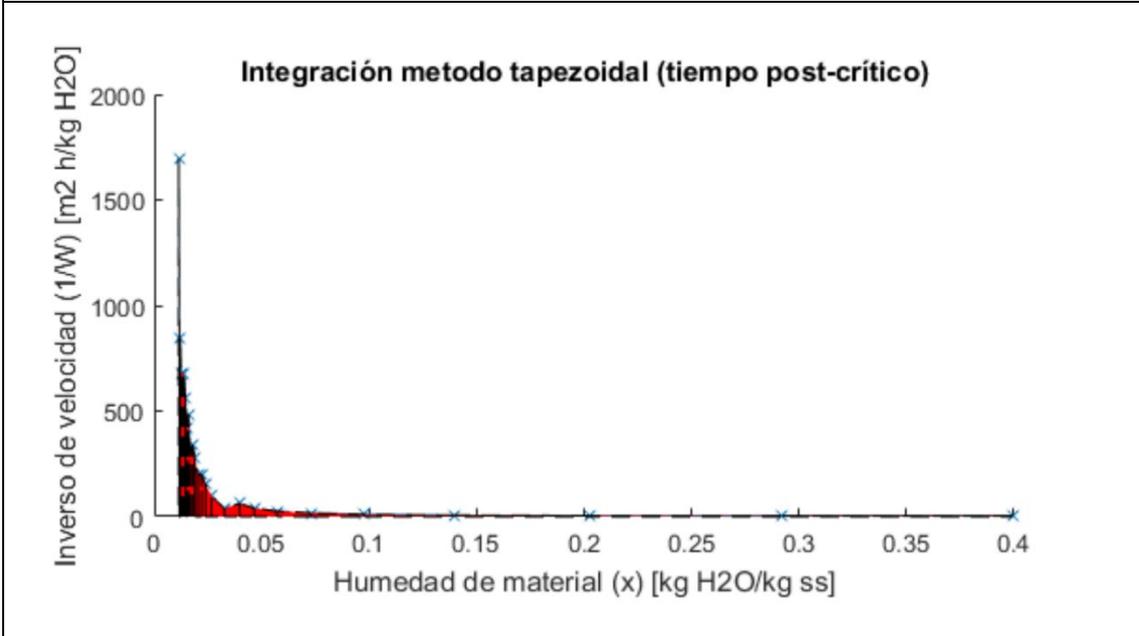
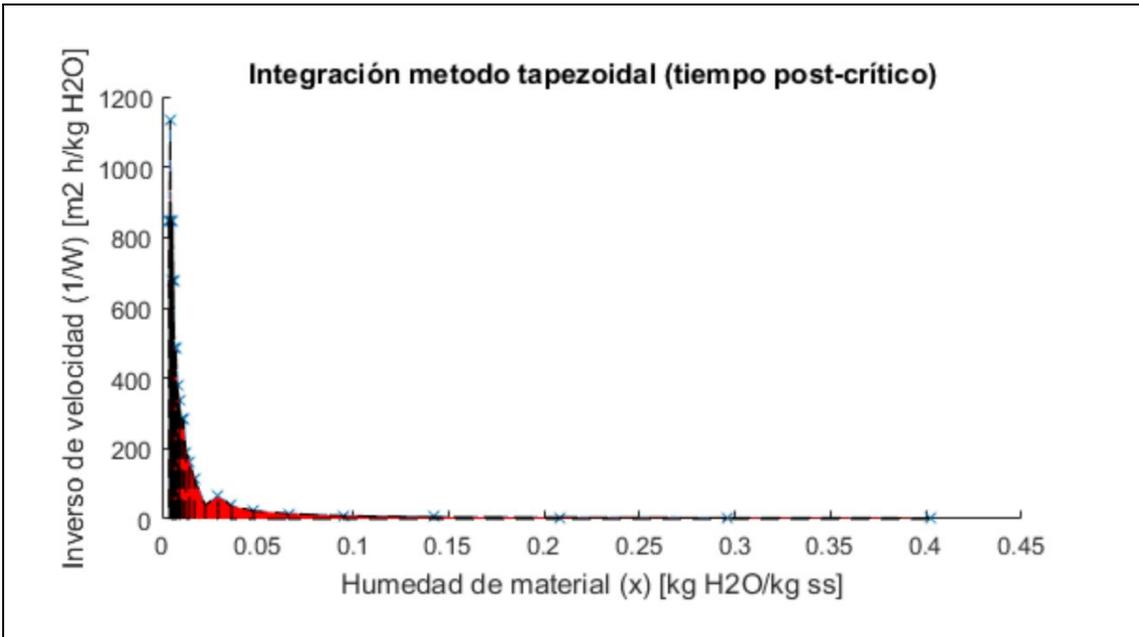
3.2.2.8. Cálculo de secado período post crítico.

$$\theta_{pc} = - \left(\frac{m_s}{A} \right) \int_{x_e}^x \frac{dx}{W} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- θ_{pc} Tiempo de secado del período post crítico. [kg H₂O/kg ss]
 x_e Humedad de equilibrio del material. [kg H₂O/kg ss]

El segundo término de esta ecuación, dadas las características de los datos experimentales se debe emplear el método gráfico que se basa en sumas de Riemman y el método de los polígonos. Sin ahondar en el método numérico se usa la función *trapz* de MATLAB. El resultado de los cálculos hechos en MATLAB, se muestran en los gráficos 7-3, 8-3 y 9-3.



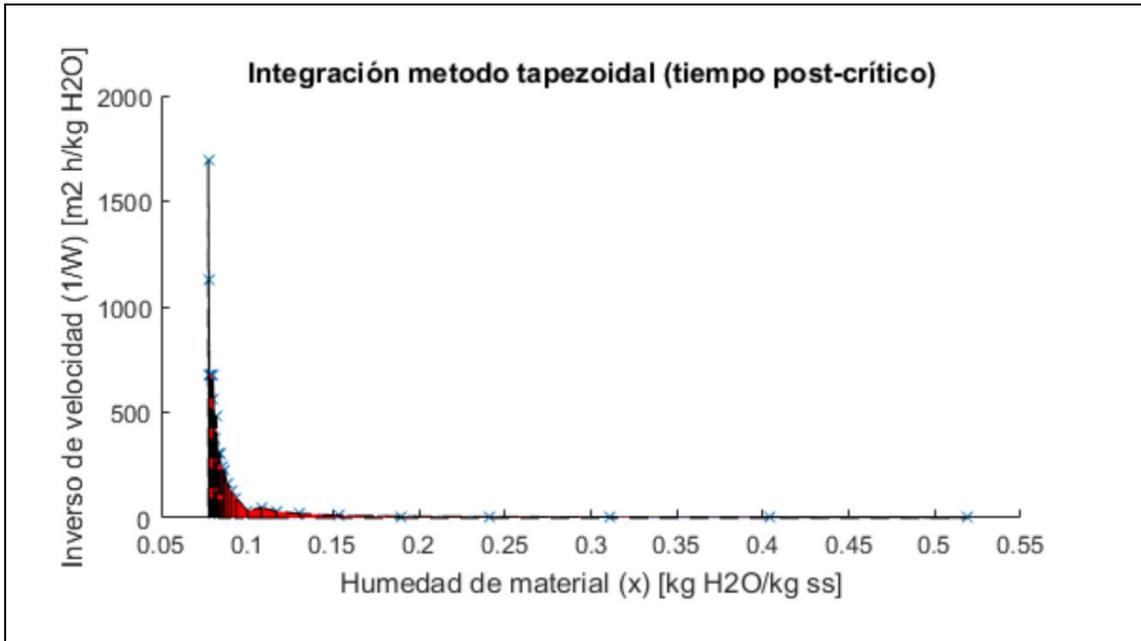
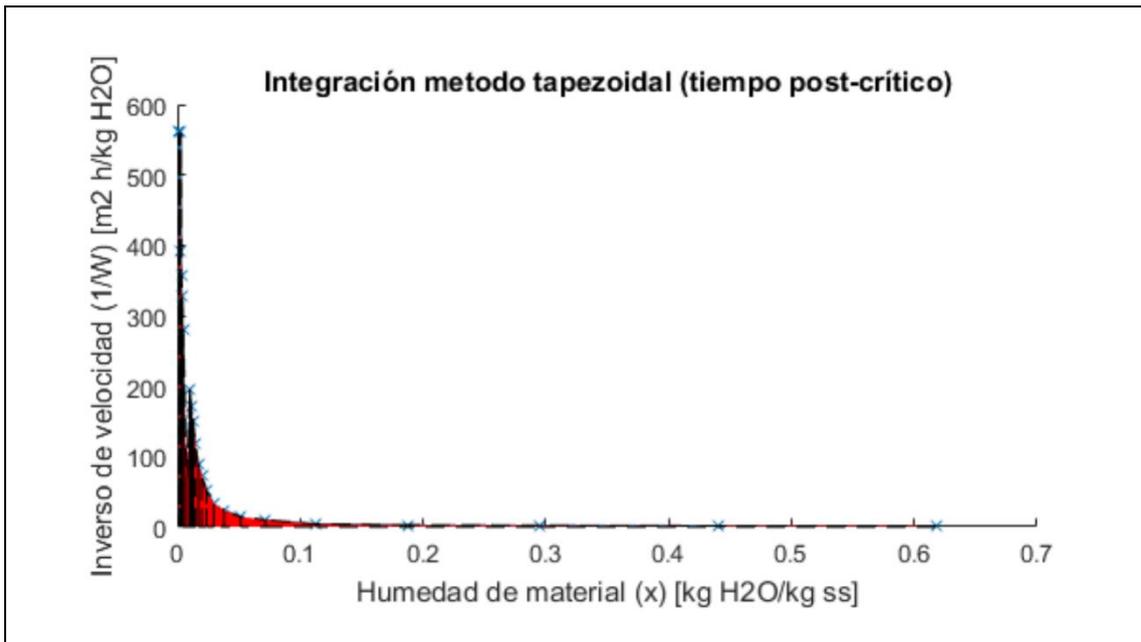


Gráfico 7-3 Diagrama de integración para tiempo post-crítico para las muestras de arveja.
 Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019



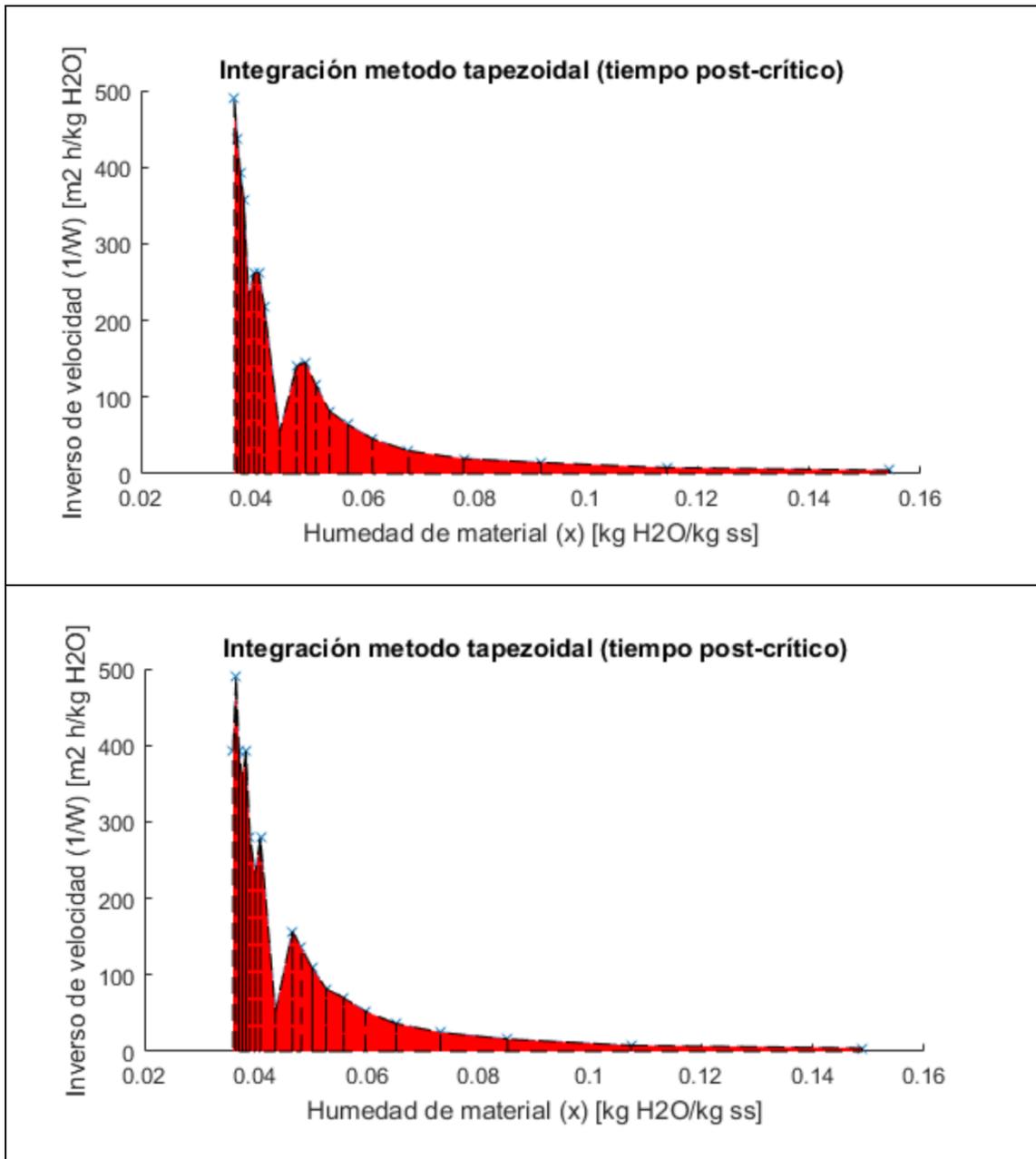
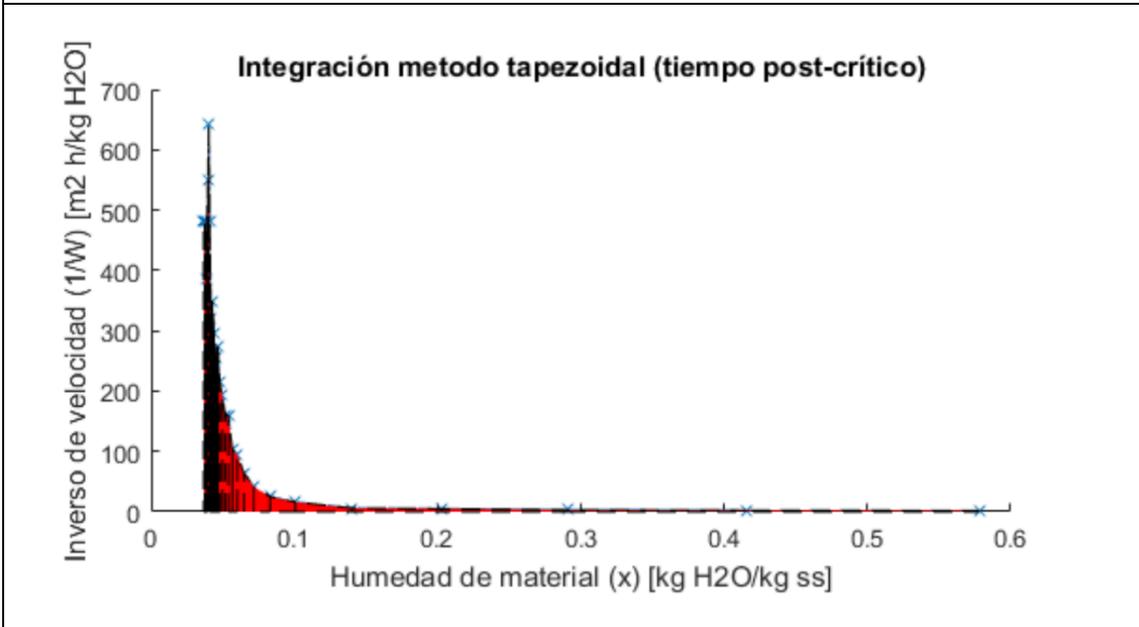
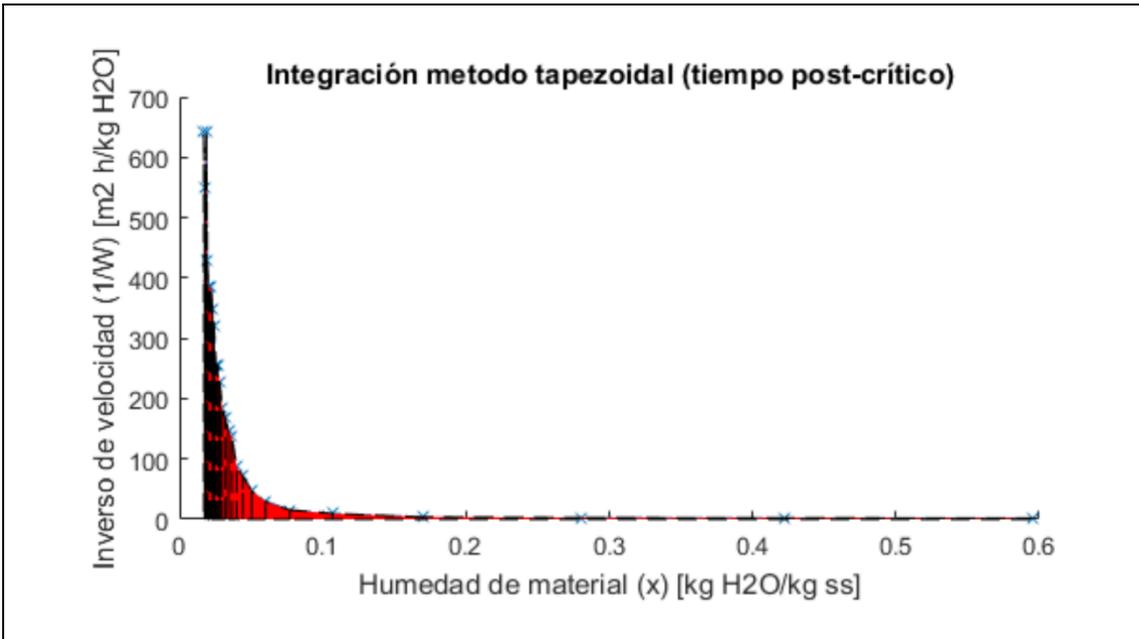


Gráfico 8-3 Diagrama de integración para tiempo poscrítico para las muestras de maíz.
 Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019



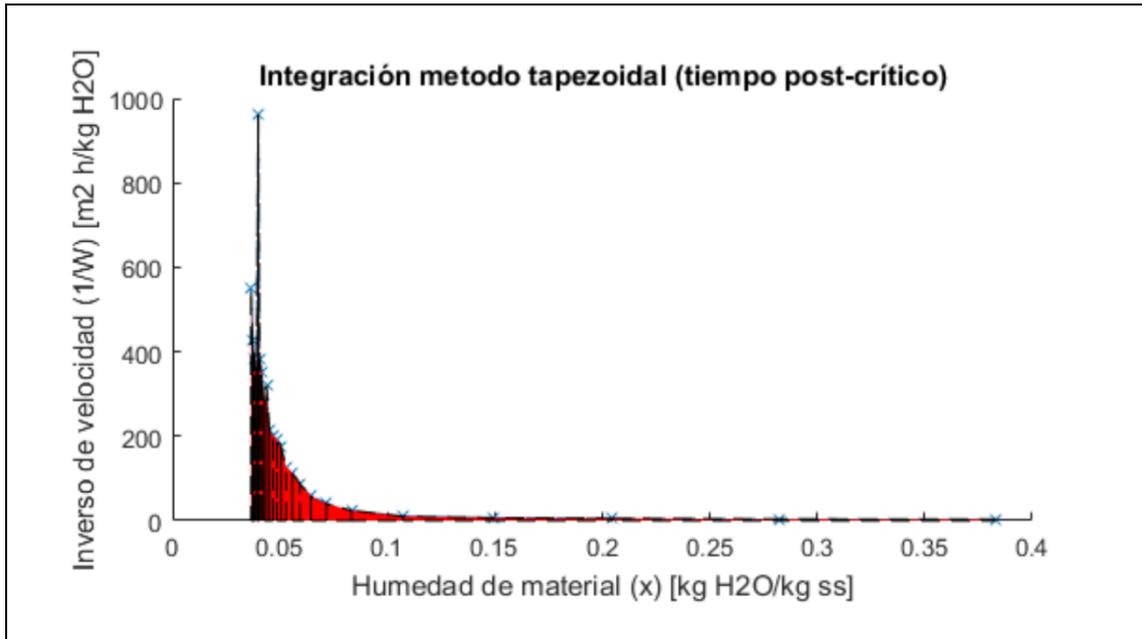


Gráfico 9-3 Diagrama de integración para tiempo poscrítico para las muestras de trigo.
Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

3.2.2.9. Tiempo total de secado

El tiempo total de secado se calcula sumando el tiempo del período antecrítico y el período poscrítico. La ecuación para calcular este valor es la ecuación 8.

$$\theta_t = \theta_{ac} + \theta_{pc} \quad \text{Ecuación 10}$$

Se calcula el tiempo total para la primera muestra de arveja. El resto de los resultados se encuentran en la tabla 4-3.

$$\theta_t = 7,1188 + 12,9598 = 20,0787 \text{ h}$$

Donde:

θ_t Tiempo total de secado. [h]

3.2.3. Cálculos de diseño estructural

Los cálculos de diseño estructural se encuentran basados en algunos artículos relacionados con el dimensionamiento de secadores rotatorios horizontales para flujo continuo. Con una modificación necesaria para un equipo por lotes, el cual es el objetivo de nuestro proceso de diseño.

3.2.3.1. Dimensionamiento de tambor o cilindro

Lo primero es establecer el tamaño del tambor del secador. El modelo estructural del tambor es semejante al tambor de una secadora de ropa horizontal. De hecho, en torno a la funcionalidad son muy parecidas. Para el diseño estructural del tambor y los levantadores, están basados en el artículo presentado por C.G.J. Baker en 1992.

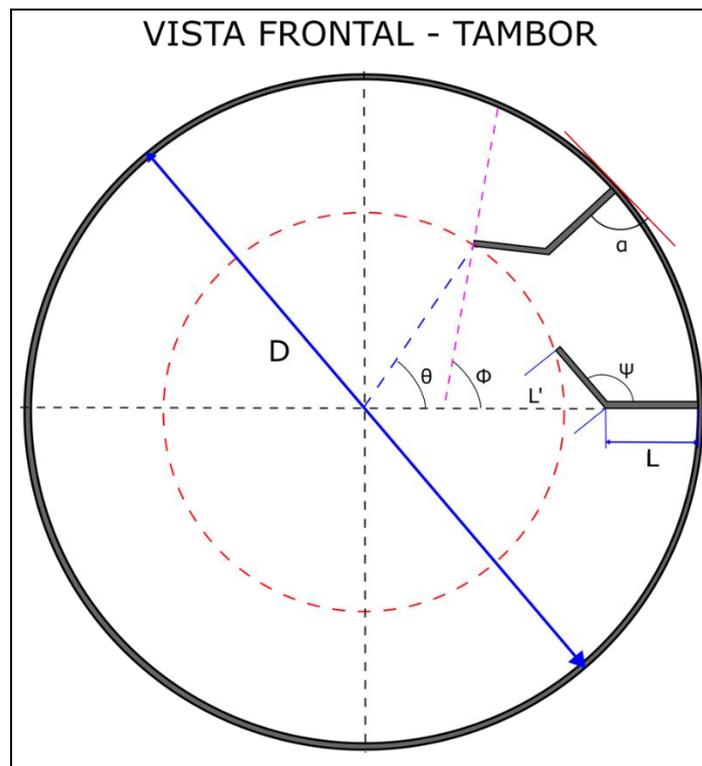


Figura 2-3 Diagrama de dimensiones del tambor del secador horizontal rotatorio por lotes- vista frontal.
Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

Se establece un diámetro del tambor igual a 500mm, ($D=0,50$ m), esto basado en el tamaño final del equipo. Se considera que el diámetro es suficiente para un equipo con una capacidad de unos 15 Kg. Para calcular el resto de dimensiones se sigue las ecuaciones presentadas por C.G.J. Baker, en su trabajo “AIR-SOLIDS DRAG IN CASCADING ROTARY DRYERS” publicado en 1992.

3.2.3.2. Diseño de levantadores – Parámetros de diseño

Para empezar el diseño de los levantadores o paletas hay que fijar algunas dimensiones, como son la longitud del vástago ($L=0,08$ m), longitud del retenedor ($L'=0,04$ m), ángulo entre tangente al perímetro y levantador ($\alpha=90^\circ$), el ángulo entre vástago y retenedor ($\psi=100^\circ$), número de revoluciones de giro del tambor ($N_r=15$ rpm) y número máximo de levantadores ($n_{\text{fmax}}=3$) y la

longitud del tambor ($L_t=0,5$ m). Con estos parámetros se procede a calcular las dimensiones del conjunto de levantadores dentro del tambor del secador.

3.2.3.3. Diseño de levantadores – Cálculo del ángulo gamma

Como se observa en la figura 3-3, el ángulo gamma (γ), es el ángulo que se subtiende entre la recta que delimita el ángulo de posición del levantador (θ) y el vástago del levantador, proyectado hasta el perímetro del tambor. Para calcular este ángulo se hace uso de la ecuación 11 (Baker 1988).

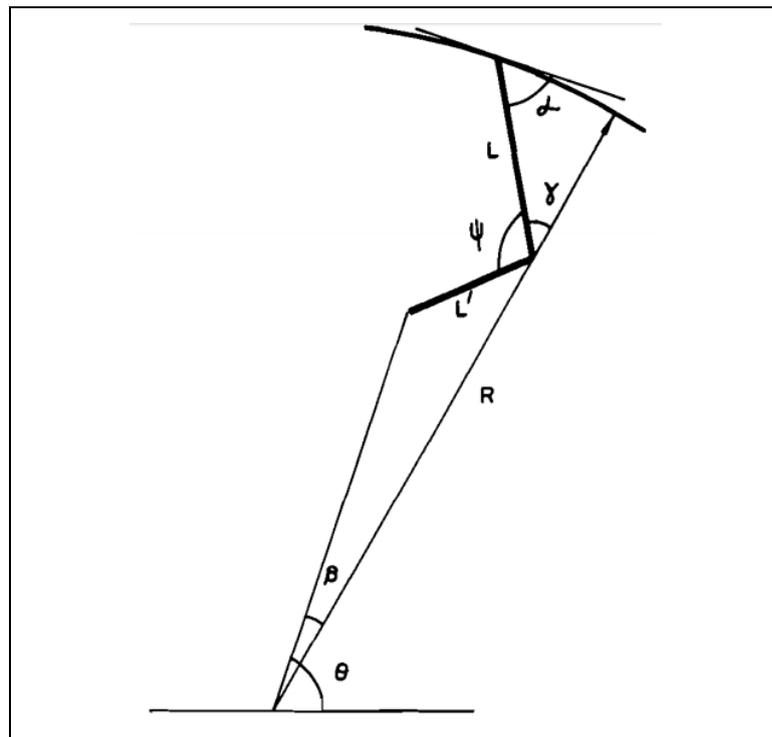


Figura 3-3 Dimensiones para un levantador angulado.

Fuente: C.G.J. Baker a, 1988, The Design Of Flights In Cascading Rotary Dryers

$$\gamma = \sin^{-1} \left[\frac{R \cos \alpha}{(R^2 - 2RL \sin \alpha + L^2)^{1/2}} \right]$$

Ecuación 11

$$\gamma = \sin^{-1} \left[\frac{(0,5/2) \cos(90)}{\left((0,5/2)^2 - 2(0,5/2)(0,08) \sin(90) + (0,08)^2 \right)^{1/2}} \right] = 0^\circ$$

Donde:

γ Ángulo gamma de levantadores. [grados]

L Longitud del vástago del levantador (0,08) [m]

R Radio del tambor del secador. [m]

α Ángulo entre tangente al perímetro y levantador. [grados]

```
VBA- Excel 2016
1  Function calculoÁnguloGamma(ByVal R, ByVal alpha, ByVal L)
2
3      ' Descripción:
4      ' Cálculo del ángulo gamma de diseño de levantadores del secador.
5      ' Fuente: BAKER, C. G. J. The design of flights in cascading rotary
6      ' dryers. Drying Technology, 1988, vol. 6, no 4, p. 638
7      '
8      ' Argumentos:
9      ' R:          Radio de diseño del tambor del secador (externo). [m]
10     ' alpha:     Ángulo de inclinación respecto a la tangente de
11     '           la circunferencia del tambor. [grados]
12     ' L:          Longitud de vástago de levantador. [m]
13     '
14     ' Retorno:
15     ' calculoÁnguloGamma: ángulo gamma de diseño de levantadores del
16     ' secador. [grados]
17
18     Dim num, den, gamma As Double
19
20     alpha = Application.WorksheetFunction.Radians(alpha)
21
22     num = R * Cos(alpha)
23     den = (R ^ 2 - (2 * R * L * Sin(alpha) + L ^ 2)) ^ (1 / 2)
24
25     gamma = radGrad((num / den))
26
27     If (-Log(gamma) > 5) Then
28         gamma = 0
29     End If
30
31     calculoÁnguloGamma = gamma
32
33 End Function
```

Figura 4-3 Función para cálculo de ángulo gamma de diseño de levantadores secadores rotatorios.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Para poder automatizar la tarea de diseño se optó por crear una función de Excel escrita en Visual Basic para Aplicaciones (Alexander y Kusleika 2017). La figura 4-3, se muestra el extracto de código.

3.2.3.4. Diseño de levantadores – Cálculo del ángulo beta (β)

Basándose en la figura 3-3, se observa que el ángulo beta (β) se encuentra definido entre las rectas que unan el punto de unión del vástago y el borde del levantador con el centro del tambor, y la línea que une el centro del tambor con el final del borde del levantador. Este es un ángulo constante y por tanto necesario para el diseño del levantador. Para poder calcular este ángulo se usa la ecuación 12 (Revol, Briens y Chabagno 2001).

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{L' \sin(\psi + \gamma)}{L' \cos(\psi + \gamma) + (R^2 - 2RL \sin \alpha + L^2)^{1/2}} \right]$$

Ecuación 12

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{(0,04) \sin(100)}{(0,04) \cos(100) + ((0,25)^2 - 2(0,25)(0,08) \sin(90) + (0,08)^2)^{1/2}} \right]$$

=18,81°

Donde:

β Ángulo beta de levantadores. [grados]

L' Longitud del retenedor o borde del levantador (0,04) [m]

ψ Ángulo entre vástago y retenedor ($\psi=100^\circ$)

```

VBA- Excel 2016
1 Function calculoÁnguloBeta(ByVal L_1, ByVal L, ByVal R, ByVal psi, ByVal
2 gamma, ByVal alpha)
3
4 ' Descripción:
5 ' Calculo del ángulo beta de diseño de levantadores. Ángulo proyectado
6 ' entre la recta de posición del levantador y línea de posición de borde.
7 ' Fuente: BAKER, C. G. J. The design of flights in cascading rotary
8 ' dryers. Drying Technology, 1988, vol. 6, no 4, p. 638
9 '
10 ' Argumentos:
11 ' R: Radio de diseño del tambor del secador (externo). [m]
12 ' alpha: Ángulo de inclinación respecto a la tangente de
13 ' la circunferencia del tambor. [grados]
14 ' psi: Ángulo de separación vástago y borde de levantador. [grados]
15 ' gamma: Ángulo proyectado entre la recta de posición del
16 ' del levantador y línea de inclinación del vástago. [grados]
17 ' L: Longitud de vástago de levantador. [m]
18 ' L_1: Longitud de borde de levantador. [m]
19 '
20 ' Retorno:
21 ' calculoÁnguloBeta: Ángulo beta. [grados]
22
23 Dim num, den As Double
24
25 psi = Application.WorksheetFunction.Radians(psi)
26 gamma = Application.WorksheetFunction.Radians(gamma)
27 alpha = Application.WorksheetFunction.Radians(alpha)
28
29 num = L_1*Sin(psi+gamma)
30 den = (L_1*Cos(psi+gamma) + (R^2-(2*R*L*Sin(alpha)+L^2)) ^ (1/2))
31
32 calculoÁnguloBeta = radGrad((num/den))
33
End Function

```

Figura 5-3 Función para cálculo de ángulo beta de diseño de levantadores secadores rotatorios.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

3.2.3.5. Diseño de levantadores – Cálculo de radio efectivo del tambor

El radio efectivo puede ser visualizado en la figura 2-3, como un círculo construido con una línea roja entrecortada. Se define con el diámetro de la circunferencia libre de obstáculos o levantadores, es el espacio por donde circula con mayor facilidad el aire de secado y por donde cae en forma de cascada el material a secar. Para calcular este diámetro se requiere la ecuación 3.

$$D_e = D - 2[\cos(180 - \alpha)L' + L] \quad \text{Ecuación 13}$$
$$D_e = 0,5 - 2[\cos(180 - 90)(0,04) + (0,08)] = 0,34 \text{ m}$$
$$r_e = \frac{D_e}{2} = 0,17 \text{ m}$$

Donde:

D_e Diámetro efectivo del tambor. [m]

r_e Radio efectivo del tambor. [m]

D Diámetro del tambor. [m]

3.2.3.6. Diseño de levantadores – ángulo de separación entre levantadores

Esta variable es fácil de calcular, únicamente depende del número máximo de levantadores que se quieren instalar en el tambor, para caso son seis. Se usa la letra griega theta (θ), no se debe confundir con el ángulo de posición de un levantador, este se usa para analizar a un levantador en movimiento. La ecuación para calcular el ángulo de separación entre levantadores es la ecuación 14.

$$\theta = \frac{360}{n_{\max}} \quad \text{Ecuación 14}$$
$$\theta = \frac{360}{6} = 120^\circ$$

Donde:

θ Ángulo de separación entre levantadores o de posición de uno. [grados]

n_{\max} Número máximo de levantadores requeridos. [unidad]

3.2.3.7. *Diseño de levantadores – velocidad angular de giro del tambor*

Este parámetro es fácil de calcular, una vez establecida las revoluciones máximas a las que debe girar el tambor. Solo hay que convertir a radianes. Para ello, se usa la ecuación 15.

$$\omega = RPM \frac{2\pi}{60}$$

Ecuación 15

$$\omega = (15) \frac{2\pi}{60} = 1,57 \text{ rad} / s$$

Donde:

RPM Ángulo de separación entre levantadores o de posición de uno. [grados]

n_{\max} Número máximo de levantadores requeridos. [unidad]

3.2.3.8. *Diseño de levantadores – Índice de fuerza centrífuga y gravitacional.*

$$v = \frac{r_e \omega^2}{g}$$

Ecuación 16

$$v = \frac{(0,17)(\pi)^2}{9,81} = 0,0428 \text{ rad}^2$$

3.2.3.9. *Diseño de levantadores – Carga longitudinal juego de levantadores*

Ahora es necesario determinar cuánto material cargarán todos los levantadores en un instante de tiempo determinado, en este caso se posiciona los levantadores en sus ángulos correspondientes partiendo de 0°, con el espaciado angular igual al valor de theta calculado.

Tabla 3-3 Posición y carga longitudinal de cada levantador.

Levantador	Θ [grados]	H [m ³ /m]
1	0	1,2877E-02
2	120	1,2375E-04
3	240	0
Carga total (H*)		1,30E-02

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

3.2.3.10. Capacidad másica del secador

Teniendo la carga longitudinal de material que pueden mover los levantadores o paletas en conjunto, se requiere determinar a cuanto masa equivale dicha carga. Para ello, se requiere la densidad del material a secar en este caso se escoge la densidad aparente de los granos de maíz, cuyo valor es $1281,60 \text{ kg/m}^3$ y un factor de seguridad máximo de 1,10.

$$m_t = f_{sm} \rho L_t H = f_{sm} \rho L_t (2H^* - H_1) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$m_t = (1,20)(1281,60)(0,5)(2(0,013) - 0,01287) = 10,09 \text{ kg}$$

Donde:

m_t Ángulo de separación entre levantadores o de posición de uno. [grados]

f_{sm} Factor de seguridad másico máximo [adm]

ρ Densidad del material a secar. [kg/m^3]

L_t Longitud del tambor del secador. [m]

H Carga longitudinal total. [m^3/m]

H^* Carga longitudinal aparente. [m^3/m]

3.2.3.11. Diseño de levantadores – Calculo ángulo de caída de material

Ahora es necesario verificar cual es el ángulo con el que cae un material al momento de que el tambor gire y cambie la posición del levantador en razón del perímetro del cilindro. Este ángulo depende del coeficiente de fricción dinámica entre el material y la superficie del levantador. En este caso se define un único levantador, asumiendo que todos las paletas o levantadores son simétricas y de comportamiento idéntico. Para calcular este ángulo, se necesita el coeficiente de fricción dinámica en este caso se usa la propiedad de fricción relacionada con el maíz en grano ($\mu=0,6$).

$$\tan \phi = \frac{\mu + \nu(\cos \theta - \mu \sin \theta)}{1 - \nu(\sin \theta + \mu \cos \theta)} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{0,6 + 0,0428(\cos(120) - 0,6 \sin(120))}{1 - 0,0428(\sin(120) + 0,6 \cos(120))} \right) \approx 31^\circ$$

3.2.3.12. *Análisis de carga de levantadores en relación con la variación de su ángulo de inclinación.*

```

VBA- Excel 2016
1  Function calculoÁnguloPhi(ByVal mu, ByVal theta, ByVal re, ByVal w)
2
3      ' Descripción:
4      ' Calculo del ángulo phi de diseño de levantadores. Ángulo de caída
5      ' del material del levantador, obtenido por balance de momento.
6      ' Fuente: BAKER, C. G. J. The design of flights in cascading rotary
7      ' dryers. Drying Technology, 1988, vol. 6, no 4, p. 635
8      '
9      ' Argumentos:
10     ' mu:      Coeficiente de fricción dinámico del material. [ADIM]
11     ' theta:   Ángulo theta de posición de levantador en revolución. [grados]
12     ' re:      Radio efectivo del tambor del secador. [m]
13     ' w:      Velocidad angular de giro del tambor. [rad/s]
14     '
15     ' Retorno:
16     ' calculoÁnguloPhi: Ángulo phi de diseño de levantadores. [grados]
17
18     Dim num, den, ny As Double
19
20     theta = Application.WorksheetFunction.Radians(theta)
21
22     ny = (re * w ^ 2 / GRAVEDAD)
23     num = (mu + ny * (Cos(theta) - mu * Sin(theta)))
24     den = (1 - ny * (Sin(theta) + mu * Cos(theta)))
25     calculoÁnguloPhi = radGrad(Atn(num / den))
26
27 End Function

```

Figura 6-3 Función para cálculo de ángulo phi de diseño de levantadores secadores rotatorios.
Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Tabla 4-3 Análisis de sensibilidad para variaciones de ángulo de levantador (ψ) y posición de levantador (θ).

θ	$\psi = 90^\circ$		$\psi = 110^\circ$		$\psi = 135^\circ$		$\psi = 150^\circ$		$\psi = 180^\circ$	
	psi	90	psi	110	Psi	135	psi	150	psi	180
	h^*	$h^*/h0^*$	h^*	$h^*/h0^*$	h^*	$h^*/h0^*$	h^*	$h^*/h0^*$	h^*	$h^*/h0^*$
0	0,01409	1,00000	0,01489	1,00000	0,01538	1,00000	0,01434	1,00000	0,00940	1,00000
15	0,01159	0,82229	0,01214	0,81553	0,01206	0,78382	0,01074	0,74865	0,00554	0,58975
30	0,00925	0,65639	0,00956	0,64223	0,00889	0,57799	0,00729	0,50797	0,00183	0,19499
45	0,00691	0,49050	0,00698	0,46855	0,00570	0,37086	0,00381	0,26536	0,00000	0,00000
60	0,00439	0,31161	0,00419	0,28178	0,00230	0,14956	0,00058	0,04036	0,00000	0,00000
75	0,00145	0,10293	0,00147	0,09864	0,00045	0,02939	0,00001	0,00071	0,00000	0,00000
90	0,00078	0,05540	0,00058	0,03926	0,00003	0,00227	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
105	0,00035	0,02455	0,00019	0,01266	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
120	0,00006	0,00434	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
135	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Σh^*	0,04887		0,05000		0,04482		0,03676		0,01678	
H^*	0,08365		0,08511		0,07426		0,05918		0,02415	
f_s	1,10000		1,10000		1,10000		1,10000		1,10000	
H	0,09202		0,09362		0,08169		0,06510		0,02657	

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

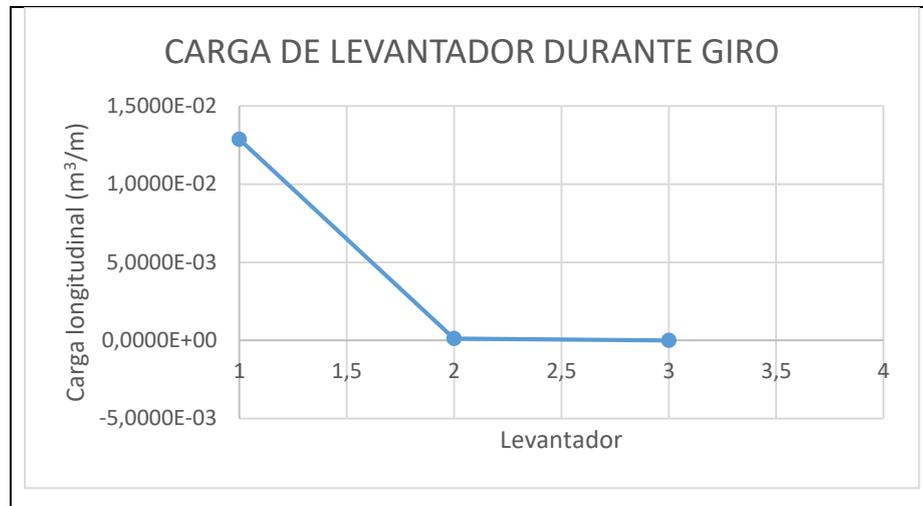


Gráfico 10-3 Análisis sobre carga de levantadores del cilindro del secador.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

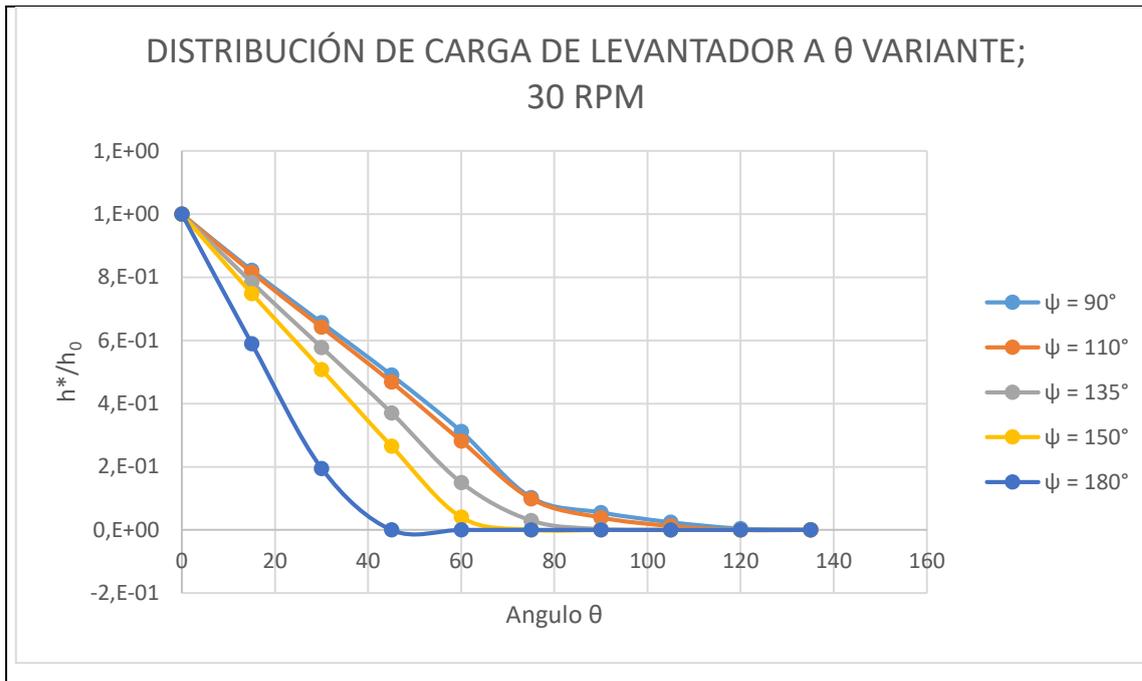


Gráfico 11-3 Análisis de sensibilidad para variaciones de ángulo de levantador (ψ) y posición de levantador (θ).
 Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

Se llega a la conclusión que la mejor distribución es para un ángulo de inclinación de $\psi = 90^\circ$, ya que al llegar al ángulo de inclinación de $\theta = 60^\circ$ la carga empieza a desalojarse rápidamente del levantador generando el efecto cascada, con una disminución de la carga progresiva.

3.2.4. Cálculos de dimensionamiento térmico

Una vez determinadas las características del proceso de secado conocidas: la humedad crítica, humedad de equilibrio y la velocidad de secado en cada etapa del proceso. Es hora de realizar cálculos térmicos que permiten determinar: la potencia térmica necesaria para calentar el aire y secar el material por convección, la cantidad de aire a determinadas condiciones que es necesaria para completar el secado, la eficiencia térmica teórica del equipo, y el tiempo de secado en base al tipo de secador y sus características térmicas.

3.2.4.1. Balance de energía en el secador-calentador de aire

Primero es necesario crear un boceto del proceso, que describa las operaciones involucradas, las corrientes y sus variables. En resumen, se toma en cuenta dos operaciones o equipos: el secador de tambor rotatorio y el calentador de aire de secado. Estas dos operaciones están conectadas mediante la corriente de aire caliente que sale del calentador. Para todas las corrientes se presenta las variables de proceso: temperatura, humedad y flujos másicos.

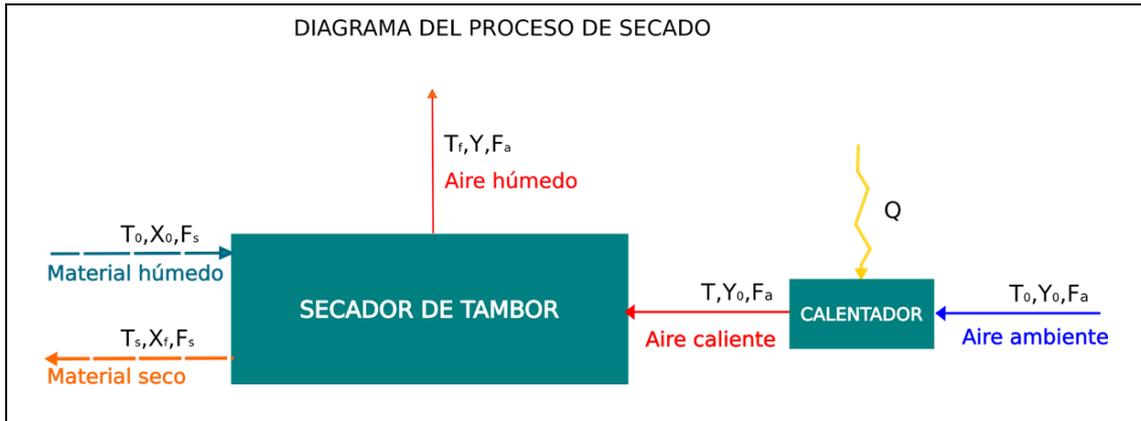


Figura 7-3 Diagrama de proceso del secador con variables y parámetros.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2018

En la figura 7-3, se describe el proceso a continuación: el secador es rotatorio (batch). Por ello, se ingresa la materia prima al tambor y se debe esperar hasta obtener la humedad deseada. Luego se retira el material del tambor y se procede a enfriar el material. Al secador entra aire a condiciones ambientales precalentado hasta una temperatura de entre 60-70°C, parte de la energía del aire pasa al material a secar, calentándolo. Esta transferencia de calor eleva la temperatura del líquido en el sólido hasta la temperatura de ebullición. Luego la humedad absorbe el calor latente necesario para cambiar de estado. Por efecto de diferencia de concentración el vapor pasa al aire hasta el punto de saturación. En este punto se llega al equilibrio entre las fases, si se mantiene constantes las condiciones de operación se mantendrá el equilibrio. La humedad se transfiere desde el sólido hasta el aire, esto varía el flujo másico del aire.

Primero se clasifican las variables del proceso, para saber cuál es el objetivo del diseño, que se optimizará. Para ello, se establece en primera instancia dos de los primeros grupos de variables, esto son: las variables de diseño y las variables de entrada o especificaciones. Tras un análisis obtuvimos los resultados mostrados en las tablas 5-3 y 6-3.

Tabla 5-3 Resultados del análisis de variables de diseño de secador.

VARIABLES DE DISEÑO			
Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Humedad de aire de secado	Y	0,0263	[kg H2O/kg as]
Temperatura del aire secado	T	333,00	[K]
Velocidad de aire de secado	V	2,0000	[m/s]
Diámetro de secador	D	0,5	[m]

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Tabla 6-3 Resultados del análisis de especificaciones del diseño de secador.

ESPECIFICACIONES DEL PROCESO			
Especificación	Símbolo	Valor	Unidades
Flujo másico de alimentación (sol. Húmedo)	F _s	10,09	[kg sh]
Humedad de entrada del material	X ₀	2,95	[kg H2O/kg ss]
Humedad de salida del material	X _f	0,14	[kg H2O/kg ss]
Temperatura ambiente	T ₀	298,00	[K]
Humedad ambiente	Y ₀	0,0134	[kg H2O/kg as]
Profundidad de carga	Z ₀	0,20	[m]
Presión ambiente	P ₀	101,33	[kPa]
Temperatura de salida del sólido	T _s	313	[K]
Diámetro de conducto de aire	D _{ca}	0,05	[m]

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Bueno es hora de presentar las ecuaciones que se usaran para realizar los balances de masa y energía:

Primero se debe establecer una forma de calcular los calores específicos del agua, vapor y aire en las corrientes, para obtener entalpías., Para esto se usa la ecuación de Shomate:

$$C_p = \sum_{i=1}^n x_i C_{pi}^0$$

$$C_{pi}^0 = A_i + B_i t + C_i t^2 + D_i t^3 + E_i / t^2$$

$$t = T / 1000$$

Ecuación 11

Se presenta un ejemplo de cálculo del calor específico del agua y vapor presentes en el secador.

$$t = 298/1000 = 0,298$$

$$C_{vap}^0 = 30,0920 + 6,8325(0,298) + 6,7934(0,298)^2 - 2,5345(0,298)^3$$

$$+ 0,0821/(0,298)^2 = 1,8898 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_{pliq}^0 = -203,6060 + 1523,2900(0,298) - 3196,4130(0,298)^2 - 2474,4550(0,298)^3$$

$$+ 3,8553/(0,298)^2 = 4,1841 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Donde:

C_{pi}^0 Calor específico del material i. [kJ/kg K]

$A_i \dots E_i$ Constantes de Shomate. [adm]

T Temperatura del medio donde se encuentra el material. [K]

x_i Fracción másica del material en una mezcla. [adm]

Para automatizar los cálculos en Excel se programa una función que permite calcular el calor específico usando la ecuación de Shomate.

VBA- Excel 2016	
1	Function ShomateEq(cnst, temp, ounit)
2	
3	' Descripción:
4	' Cálculo del calor específico de una sustancia usando
5	' la ecuación de Shomate
6	' Argumentos:
7	' cnst: un vector con los valores de las constantes de
8	' Shomate. Ref: NIST Standard Reference Data
9	' temp: Temperatura a la que se evalúa el calor específico (K)
10	' ounit: Unidades de salida: 1 -> J/mol K; 2 -> kJ/kg K
11	' Retorno:
12	' cp: Calor específico (J/mol K)
13	
14	Dim cp, T As Double
15	
16	T = temp / 1000
17	cp = cnst(1, 1) + (cnst(1, 2) * T) + (cnst(1, 3) * (T ^ 2)) + _
18	(cnst(1, 4) * (T ^ 3)) + (cnst(1, 5) / (T ^ 2))
19	
20	Select Case ounit
21	Case 1 ' [J/mol K]
22	ShomateEq = cp
23	Case 2 ' [kJ/kg K]
24	ShomateEq = cp / Data.MMW
25	End Select
26	End Function

Figura 8-3 Función para cálculo del calor específico de materiales a condiciones específicas, ecuación de Shomate.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Se usa la ecuación de Antoine para aproximar la presión de vapor de líquido contenido en el sólido a las condiciones de secado.

$$P^* = e^{\left(\frac{A-B}{T+C}\right)} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$P^* = e^{\left(\frac{4,6543 - \frac{1435,2640}{333,00 - 64,8480}}{T}\right)} = 49,75 \text{ kPa}$$

Donde:

- P^* Tiempo total de secado. [h]
- $A..C$ Constantes de Antoine. [adm]
- T Temperatura del sistema. [K]

```

VBA- Excel 2016
1  Function antoineEquation(cnst, T)
2
3      ' Descripción:
4      ' Cálculo de la presión de vapor usando la ecuación de Antoine
5      '
6      ' Argumentos:
7      ' cnst:          Vector con las constantes de la ecuación de Antoine.
8      '                Ref: NIST Standard Reference Data
9      ' T:            Temperatura del líquido [K]
10     '
11     ' Retorno:
12     ' pv:           Presión de vapor del líquido [kPa]
13
14     Dim pv As Double
15
16     pv = Exp(cnst(1, 1) - (cnst(2, 1) / (cnst(3, 1) + T))) * 100
17
18     antoineEquation = pv
19
20 End Function

```

Figura 9-3 Función para cálculo de la presión de vapor del agua o líquido contenido en el sólido.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

Es necesario calcular la actividad del agua en el aire a las condiciones de presión y temperatura dadas, la ecuación usada es la siguiente:

$$a_w = \frac{YP}{P_s(Y+m)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Se presenta un ejemplo de cálculo de la actividad de agua para las condiciones de operación del secador con material de secado maíz.

$$a_w = \frac{(0,0263)(49,75)}{(101,33)(0,0263 + 0,6220)} = 0,0826$$

Donde:

- a_w Actividad de agua del aire a condiciones específicas. [adm]
- Y Humedad del aire. [kg H₂O/kg ss]
- P Presión absoluta del sistema. [kPa]
- P_s Presión de vapor del líquido en el sólido. [kPa]
- m Fracción másica de aire. [adm]

Para automatizar los cálculos en Excel se programa una función que permite calcular la actividad del agua.

VBA- Excel 2016	
1	Function waterActivity(Pa, y, Ps, m)
2	
3	' Descipción:
4	' Calculo de la actividad de agua del aire a condiciones de Presión,
5	' de vapor y atmosferica dada.
6	'
7	' Argumentos:
8	' Pa: Presión atmosférica [KPa]
9	' Y: Humedad del aire salida [kg H2O/kg aire seco]
10	' Ps: Presión de vapor del líquido en el sólido [KPa]
11	' m: Fracción másica del agua en el aire [kg H2O/kg aire seco]
12	'
13	' Retorno:
14	' aw: Actividad de agua [NA]
15	
16	waterActivity = (Pa * y) / (Ps * (y + m))
17	
18	End Function

Figura 10-3 Función para cálculo de actividad de agua del aire a condiciones de operación dadas.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Para las velocidades de secado es necesario aproximar la constante cinética de secado, para ello se usa la siguiente ecuación:

$$k_c = 3600 b_0 e^{(-b_1 a_w)} e^{\left(\frac{b_2}{b_3 + b_4(T-273)}\right)} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$k_T = 3600 (170) e^{[-(1,15)(0,0826)]} e^{\left(\frac{8259,00}{492,00+1,8(333-273)}\right)} = 0,5853 \frac{1}{h}$$

Donde:

k_T Constante cinética de secado. [1/h]

$b_0..b_4$ Coeficientes para el cálculo de cinética de secado. [adm]

Igual que los casos anteriores se programa una función en VBA, con el objetivo de automatizar cálculos.

VBA- Excel 2016	
1	Function dryingConstant(cnst, aw, T)
2	
3	' Descripción:
4	' Cálculo de la constante cinética de secado de para granos (maíz). REF:
5	' Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). Handbook of industrial drying. CRC
6	press.
7	' pag. 119
8	'
9	' Argumentos:
10	' cnst: Constantes para la correlación de constante cinética de
11	secado.
12	' aw: Actividad de agua del aire [NA]
13	' T: Temperatura del aire de secado [K]
14	'
15	' Retorno:
16	' k_c: Constante cinética de secado [1/h]
17	
18	Dim k_temp As Double
19	
20	k_temp = cnst(1, 1) * Exp(-cnst(2, 1) * aw) * Exp(-cnst(3, 1) / (cnst(4,
21	1) + cnst(5, 1) * (T - 273)))
22	dryingConstant = k_temp * 3600
23	
24	End Function

Figura 11-3 Función para cálculo de la constante cinética de secado.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Se estima la humedad de equilibrio para un sistema compuesto por gránulos de tamaño pequeño, la ecuación de Oswin modificada, permite para el diseño de un secador rotatorio, aproximar dicho valor.

$$x_e = (c_1 + c_2 T) \left(\frac{a_w}{1 + a_w} \right)^{c_3} 10^2$$

Ecuación 14

$$x_e = (1,6233 + 0,206(333)) \left(\frac{0,0826}{1 + 0,0826} \right)^{0,4880} 10^{-2} = 0,0847 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg as}}$$

Donde:

$C_1 \dots C_3$ Coeficientes de Oswin. [adm]

```

VBA- Excel 2016
1 Function oswinModEquation(cnst, aw, T)
2
3 ' Descripción:
4 ' Cálculo de la humedad de equilibrio del sólido con la ecuación de
5 ' correlación de las isothermas de adsorción de Oswin Modificada. REF:
6 ' Sitompul, J. P., Istadi, I., & Sumardiono, S. (2000). NON-LINEAR
7 ' PARAMETER ESTIMATION OF EMC/ERH CORRELATIONS FOR GRAIN-TYPE PRODUCTS.
8 ' Proceedings Institut Teknologi Bandung.
9 '
10 ' Argumentos:
11 ' cnst: Constantes de la ecuación de Oswin modificada.
12 ' aw: Actividad de agua del aire [NA]
13 ' T: Temperatura del aire de secado [K]
14 '
15 ' Retorno:
16 ' x_e: Humedad de equilibrio a condiciones de secado [kg H2O/kg
17 aire seco]
18
19 oswinModEquation = (cnst(1, 1) + cnst(2, 1) * T) * ((aw / (1 + aw)) ^ c)
20 / 100
21
22 End Function

```

Figura 12-3 Función para aproximación de la humedad de equilibrio.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

Ahora se debe calcular el tiempo que tardara el material en secarse en un secador rotatorio batch, a las condiciones de secado dadas, para ello se usa la siguiente ecuación obtenida de Mujumbar A.

$$\theta_s = -\frac{1}{k_T} \ln \left(\frac{x_f - x_e}{x_0 - x_e} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\theta_s = -\frac{1}{0,5853} \ln \left(\frac{0,14 - 0,0847}{2,95 - 0,0847} \right) = 6,74 h$$

Donde:

θ_s Tiempo total de secado para secador rotatorio. [h]

x_f Humedad final del sólido. [kg H₂O/kg ss]

x_e Humedad de equilibrio del sólido. [kg H₂O/kg ss]

x_0 Humedad inicial del sólido. [kg H₂O/kg ss]

```
VBA- Excel 2016
1 Function dryingTime(x_f, x_0, x_e, k_c)
2
3 ' Descripción:
4 ' Cálculo del tiempo de secado de sólido humedo.
5 '
6 ' Argumentos:
7 ' x_f: Humedad de salida del sólido. [kg H2O/kg sólido seco]
8 ' x_0: Humedad de entrada del sólido. [kg H2O/kg sólido seco]
9 ' x_e: Humedad de equilibrio a condiciones de secado [kg H2O/kg
10 aire seco]
11 ' k_c: Constante cinética de secado [NA]
12 '
13 ' Retorno:
14 ' t_dry: Tiempo de secado de sólido. [h]
15
16 dryingTime = (-1 / k_c) * Log((x_f - x_e) / (x_0 - x_e))
17
18 End Function
```

Figura 13-3 Función para cálculo del tiempo de secado del sólido con un secador rotatorio batch.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

Una vez se conoce el tiempo aproximado de secado con un secador rotatorio, se puede calcular la cantidad de humedad que se extrae por hora de trabajo del equipo. Para ello, se usa la ecuación 3.

$$W = \left(\frac{10,09}{1+2,95} \right) \left(\frac{2,95-0,14}{6,74} \right) = 1,064 \frac{kg \text{ vapor}}{h}$$

Donde:

W Flujo másico de la humedad vaporizada. [kg/h]

```

VBA- Excel 2016
1 Function vaporFlow(Fs, x_0, x_f, t_dry)
2
3 ' Descripción:
4 ' Calculo de la tasa de evaporación de agua desde el sólido.
5 ' Argumentos:
6 ' Fs: Masa de sólido húmedo. [kg]
7 ' x_0: Humedad de entrada del sólido. [kg H2O/kg sólido seco]
8 ' x_f: Humedad de salida del sólido. [kg H2O/kg sólido seco]
9 ' t_dry: Tiempo de secado. [h]
10 ' Retorno:
11 ' W: Flujo de agua evaporada. [kg/h]
12 vaporFlow = (Fs / (1 + x_0)) * (x_0 - x_f) / t_dry
13
14 End Function

```

Figura 14-3 Función para cálculo de flujo de humedad vaporizada desde el sólido.
Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

Ahora, se calcula la cantidad de aire necesaria para retirar tal cantidad de humedad como vapor, se estima como humedad de salida del aire 0,0535 kg H₂O/kg aire seco, valor que corresponde a la humedad de saturación del aire a las condiciones del flujo del aire caliente.

$$F_a = \frac{W}{Y - Y_0} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$F_a = \frac{1,0645}{0,0263 - 0,0134} = 82,76 \frac{\text{kg aire}}{\text{h}}$$

Donde:

F_a Flujo másico de aire. [kg/h]

Y_0 Humedad inicial del aire. [kg H₂O/kg as]

```

VBA- Excel 2016
1 Function dryAirFlow(w, y, y_0)
2
3 ' Descripción:
4 ' Cálculo de flujo de aire de secado.
5 ' Argumentos:
6 ' w: Flujo de agua evaporada. [kg/h]
7 ' Y: Humedad del aire salida [kg H2O/kg aire seco]
8 ' Y_0: Humedad del aire entrada [kg H2O/kg aire seco]
9 ' Retorno:
10 ' Fa: Flujo de aire de secado [kg/h]
11 dryAirFlow = w / (y - y_0)
12
13 End Function

```

Figura 15-3 Función para cálculo de flujo másico aire necesario para secar el material.
Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

3.2.4.2. Dimensionamiento de resistencias térmicas

Una vez calculadas las variables relacionadas con el flujo másico de aire, se pasa a los cálculos térmicos, que nos permiten dimensionar el elemento calefactor o resistencias eléctricas. Para ello, se calcula los requerimientos térmicos involucrados en el proceso de secado, este corresponde a: gasto térmico para: calentar el aire ambiental y el sólido, y evaporar la humedad del sólido. Usando las ecuaciones 4, 5, 6,7 se obtiene:

$$Q_{ch} = \frac{86,32 [1,6208 + (0,0134)(1,8898)] (333 - 298)}{3600} = 1,32 \text{ kW}$$

$$Q_{sh} = \frac{\left[\frac{10,09}{6,745(1+2,95)} \right] [2,1248 + (2,95)(1,8898)] (313 - 298)}{3600} = 0,01 \text{ kW}$$

$$Q_{we} = \left[\frac{10,09}{6,745(1+2,95)} \right] (2,95 - 0,14) \left[\frac{2380,70 - (4,1841 - 1,8898)(333 - 273)}{3600} \right]$$

$$= 0,66 \text{ kW}$$

$$Q_T = (1,32 + 0,01 + 0,66) \times 1,5 = 2,985 \text{ kW} \approx 3 \text{ kW}$$

VBA- Excel 2016	
1	Function thermalReqAir(Fa, y_θ, cp_a, cp_v, T, T0)
2	
3	' Descripción:
4	' Cálculo del calor necesario para precalentar el aire a condiciones
5	' de entrada al secador.
6	'
7	' Argumentos:
8	' Fa: Masa de aire ambiental. [kg]
9	' y_θ: Humedad de entrada del aire. [kg H2O/kg sólido seco]
10	' cp_a: Capacidad calorífica del aire a T [kJ/kg K]
11	' cp_v: Capacidad calorífica del agua (vapor) a T [kJ/kg K]
12	' T: Temperatura de la salida del aire del calentador. [K]
13	' T0: Temperatura de la entrada del sólido húmedo. [K]
14	' t_sec: Tiempo de operación de secado. [h]
15	'
16	' Retorno:
17	' thermalReqAir: Flujo de calor necesario para calentar el aire,
18	' a la temperatura T. [kW]
19	
20	thermalReqAir = ((Fa * (cp_a + y_θ * cp_v) * (T - T0)) / 3600)
21	
22	End Function

Figura 16-3 Función para cálculo del calor necesario para calentar el aire de secado.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

```

VBA- Excel 2016
1  Function thermalReqSolid(Fs, x_0, cp_s, cp_v, Ts, T0, t_sec)
2
3      ' Descripción:
4      ' Cálculo de la cantidad de calor necesaria para calentar el sólido
5      ' a la temperatura de salida del sólido.
6      '
7      ' Argumentos:
8      ' Fs:      Masa de sólido húmedo. [kg]
9      ' x_0:     Humedad de entrada del sólido. [kg H2O/kg sólido seco]
10     ' cp_s:    Capacidad calorífica del sólido a Ts [kJ/kg K]
11     ' cp_v:    Capacidad calorífica del agua (vapor) a T [kJ/kg K]
12     ' Ts:     Temperatura de la salida del sólido húmedo. [K]
13     ' T0:     Temperatura de la entrada del sólido húmedo. [K]
14     ' t_sec:   Tiempo de operación de secado. [h]
15     '
16     ' Retorno:
17     ' thermalReqSolid: Flujo de calor necesario para calentar el sólido,
18     ' a la temperatura Ts. [kW]
19
20     thermalReqSolid = (((Fs / (1 + x_0)) / t_sec) * (cp_s + x_0 * cp_v) *
21 (Ts - T0)) / 3600)
22
23 End Function

```

Figura 17-3 Función para cálculo del calor necesario para calentar el sólido.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

```

VBA- Excel 2016
1  Function thermalReqEvap(Fs, x_0, x_f, dh, cp_l, cp_v, T, t_sec)
2
3      ' Descripción:
4      ' Cálculo de de la cantidad de calor necesaria para evaporar la humedad
5      ' del material a las condiciones de evaporación.
6      '
7      ' Argumentos:
8      ' Fs:      Masa de sólido húmedo. [kg]
9      ' x_0:     Humedad de entrada del sólido. [kg H2O/kg sólido seco]
10     ' x_f:     Humedad de salida del sólido. [kg H2O/kg sólido seco]
11     ' x_e:     Humedad de equilibrio a condiciones de secado [kg H2O/kg
12     ' aire seco]
13     ' dh:     Entalpía de vaporización del agua [kJ/kg]
14     ' cp_l:    Capacidad calorífica del agua (líquido) a T [kJ/kg K]
15     ' cp_v:    Capacidad calorífica del agua (vapor) a T [kJ/kg K]
16     ' T:      Temperatura de la salida del sólido húmedo. [K]
17     ' t_sec:   Tiempo de operación de secado. [h]
18     '
19     ' Retorno:
20     ' thermalReqEvap: Flujo de calor necesario para evaporar la humedad.
21     ' [kW]
22
23     thermalReqEvap = (((Fs / (1 + x_0)) / t_sec) * (x_0 - x_f) * (dh - (cp_l
- cp_v) * T)) / 3600)
End Function

```

Figura 18-3 Función para cálculo del calor necesario para evaporar el agua en el sólido.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

El valor de 4,18 kW es la potencia térmica que se requiere para calentar 91,57 kg de aire/h. El arreglo de resistencia térmica debe proporcionar esta cantidad de calor.

3.2.4.3. Caudal de aire de secado

Una vez calculado el flujo másico de aire necesario para retirar la humedad del sólido, para convertir esta cantidad en flujo volumétrico es necesario multiplicarlo por la densidad del aire a las condiciones de operación.

$$q_a = \rho F_a \quad \text{Ecuación 21}$$

$$q_a = 1,2250(82,76) = 101,38 \frac{m^3}{h}$$

Donde:

q_a Flujo volumétrico de aire. [m^3/h]

ρ Densidad del aire. [$kg \text{ aire}/m^3 \text{ aire}$]

Se calcula la velocidad del aire, para ello definimos un diámetro de 4 pulgadas, el resultado se muestra a continuación.

$$v_a = \pi \rho F_a r_d^2 \quad \text{Ecuación 21}$$

$$v_a = \pi(82,76)(1,2250) \left(\frac{0,1}{2} \right)^2 = 2 \text{ m/s}$$

Donde:

v_a Velocidad del flujo de aire de secado. [m/s]

r_d Radio de ducto de aire. [m]

3.2.5. Dimensionamiento del sistema de control de temperatura

3.2.5.1. Selección de sistema de control

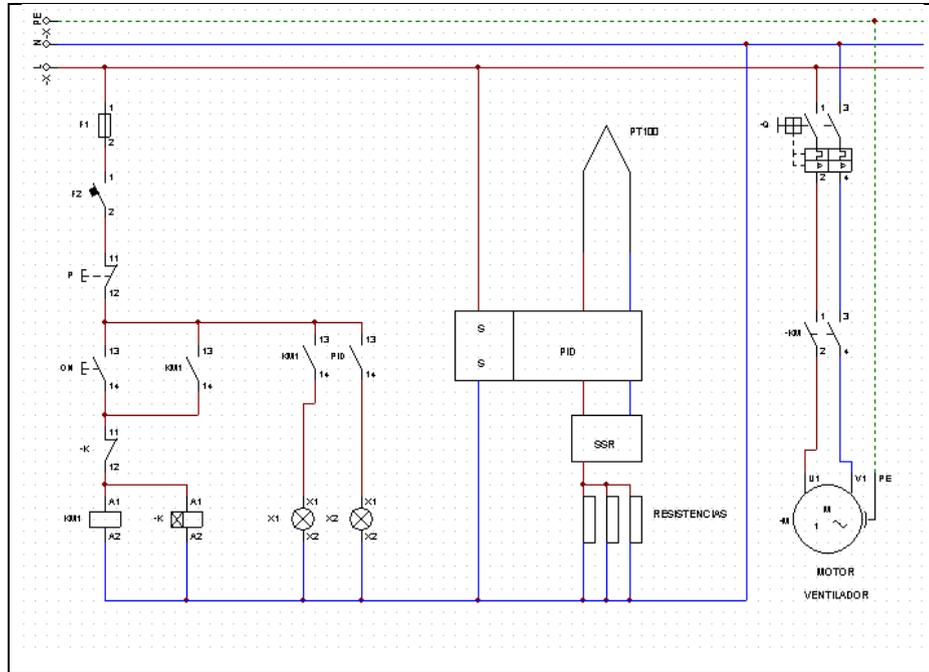


Figura 19-3 Diagrama del sistema eléctrico del secador de tambor rotatorio.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

El esquema eléctrico provisto cumple la función de controlar el proceso, regulando la temperatura de las resistencias cerámicas a un setpoint preestablecido. Posee: protecciones contra sobretensiones, la capacidad de regular el tiempo de funcionamiento, al momento de configurar el tiempo, y al activar el proceso las resistencias, el motor y la turbina se encienden, según la configuración del controlador ON/OFF. Este controlador comienza a regular la cantidad de calor que se suministra, y luego de un determinado tiempo el proceso se detiene.

También presenta paro de emergencia, para evitar posibles contravenciones, o mal funcionamientos del sistema, cabe señalar que el controlador se acercara lo más posible al setpoint, pero tiene un rango de error para evitar sobrecalentamiento y funcionamiento anómalo.

En los anexos E y F, se presentan los diagramas P&ID y diagrama de secuencias. En el diagrama P&ID se muestran los equipos y elementos de control, así como las canalizaciones y señales que los conectan. En el diagrama de secuencia se explica de manera simplificada la forma en la que el controlador maneja el ciclo de control. En él se observa un período de configuración donde el usuario asigna el tiempo y la temperatura de secado. Luego se entra en un bucle repetitivo, que

termina cuando el tiempo cronometrado es igual al tiempo asignado por el usuario. Existen dos posibles caminos para el proceso en este punto. Si no se cumple con el tiempo de secado, el proceso mantiene encendidos tanto el motor como el blower y dependiendo de la temperatura se encienden o apagan las resistencias eléctricas. El proceso de control es ON/OFF, debido a que las resistencias se encienden y apagan a totalidad, no existe efecto regulatorio en la potencia térmica que entregan. Una vez cumplido con el tiempo de secado, todos los dispositivos se apagan y se presenta los datos de secado.

3.2.5.2. Sistema de adquisición de datos

Otro parte del sistema de control es el sistema de adquisición de datos, el mismo que se construyó con una: Arduino mega y el software programado en MATLAB. La comunicación entre Arduino y el software se realiza mediante comunicación serial. En la figura 20-3 se observa una imagen del software de adquisición de datos, hecho en MALTAB.

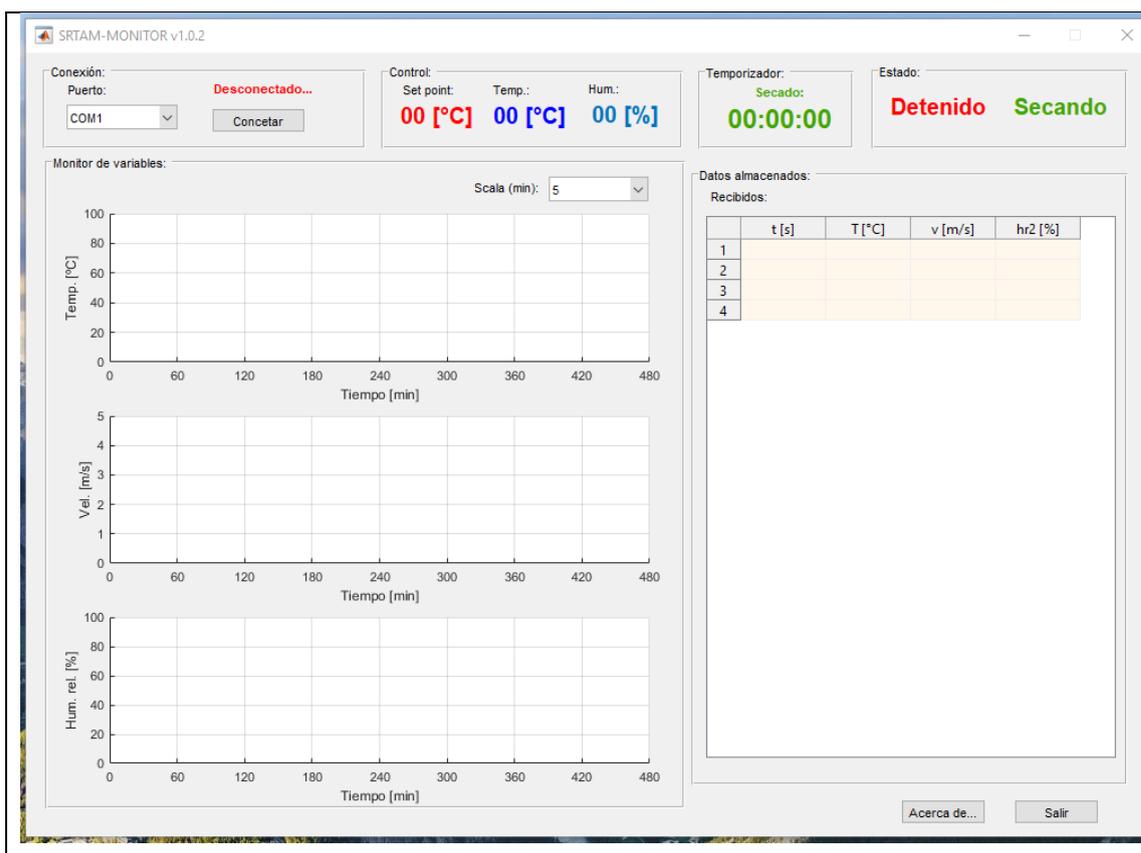


Figura 20-3 Interface gráfica de software de adquisición de datos.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Para procesar los datos y obtener las curvas de secado se utiliza un script de MATLAB, que realiza todas las operaciones con el objeto de procesar los datos experimentales, ver anexo J.

3.2.6. Procedimientos de operación

Tabla 7-3 Procedimientos presentes en el manual de operación del equipo.

PROCEDIMIENTO	MANUAL
Encendido y apagado del equipo	Manual de operación
Secado de materiales granulares	Manual de operación
Obtención de modelo dinámico de intercambio de calor.	Manual de operación
Configuración de sistema de control	Manual de operación
Mejorar proceso de secado	Manual de operación
Verificación de conexión eléctrica	Manual de mantenimiento
Recomendaciones de seguridad	Manual de operación

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

3.2.7. Datos Experimentales

Ver anexo K.

3.3. Resultados de dimensionamiento

3.3.1. Estructural

Tabla 8-3 Resultados de dimensionamiento estructural.

RESULTADOS DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL				
Variable	Símbolo	Valor	Unidades	
Diámetro exterior de tambor	D_t	0,5	[m]	
Ángulo gamma	γ	0,00	[grados]	
Ángulo proyectado desde retenedor paleta	β	18,8179	[grados]	
Longitud de paleta proyectada	L_e	0,0800	[m]	
Radio efectivo del tambor	r_e	0,1700	[m]	
Diámetro efectivo de tambor	D_e	0,3400	[m]	
Ángulo de separación entre paletas	θ	60	[grados]	
Velocidad angular	ω	3,1416	[rad/s]	
Índice de fuerza centrífuga y gravitacional	v_r	0,1710	[rad ²]	
Carga longitudinal del tabor	H^*	0,0229	[m ³ /m]	
Factor de seguridad para sobrellenado	f_s	1,1	[NA]	
Carga longitudinal de diseño del tambor	H	0,0252	[m ³ /m]	
Volumen de carga de diseño	V	0,0126	[m ³]	
Capacidad másica del tambor	m	19,3487	[Kg]	

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

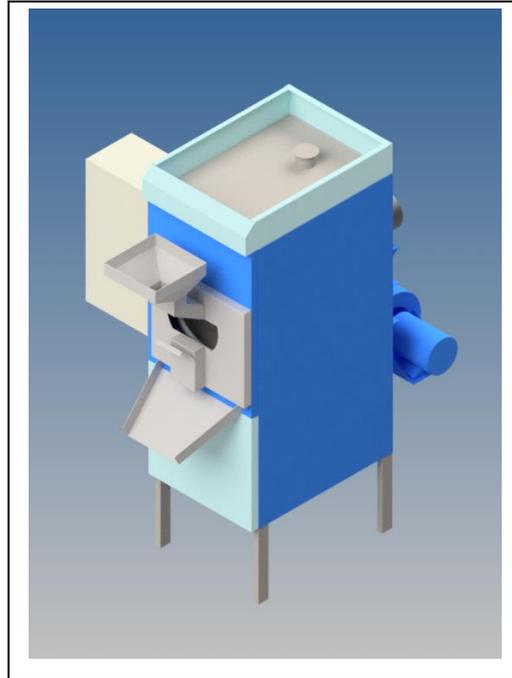


Figura 21-3 Vista isométrica de ensamblaje de horno rotatorio.
Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

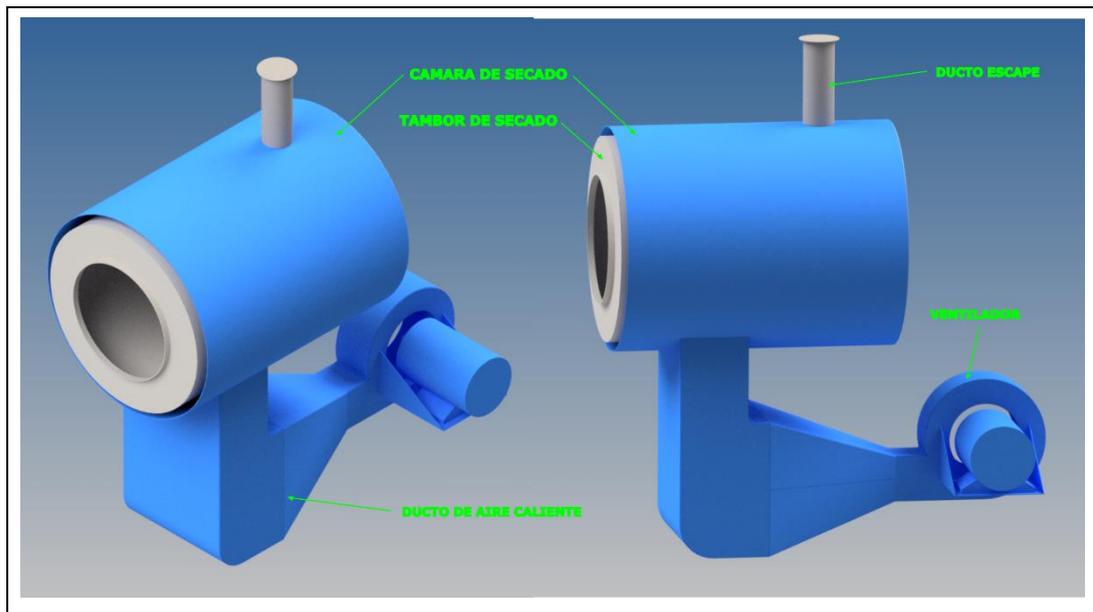


Figura 22-3 Vista isométrica y lateral de la cámara de secado, tambor y ventilación.
Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

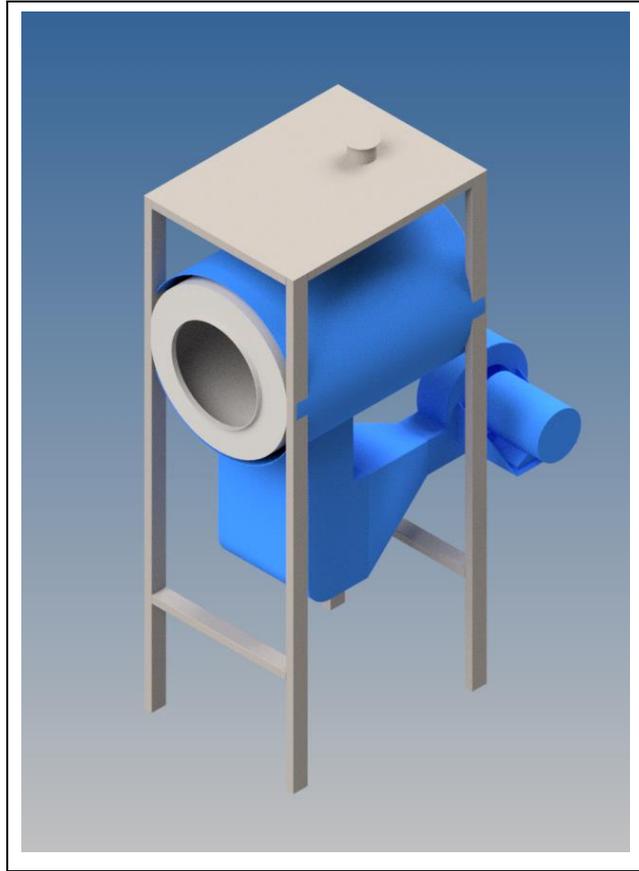


Figura 23-3 Vista isométrica del soporte del sistema de ventilación.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

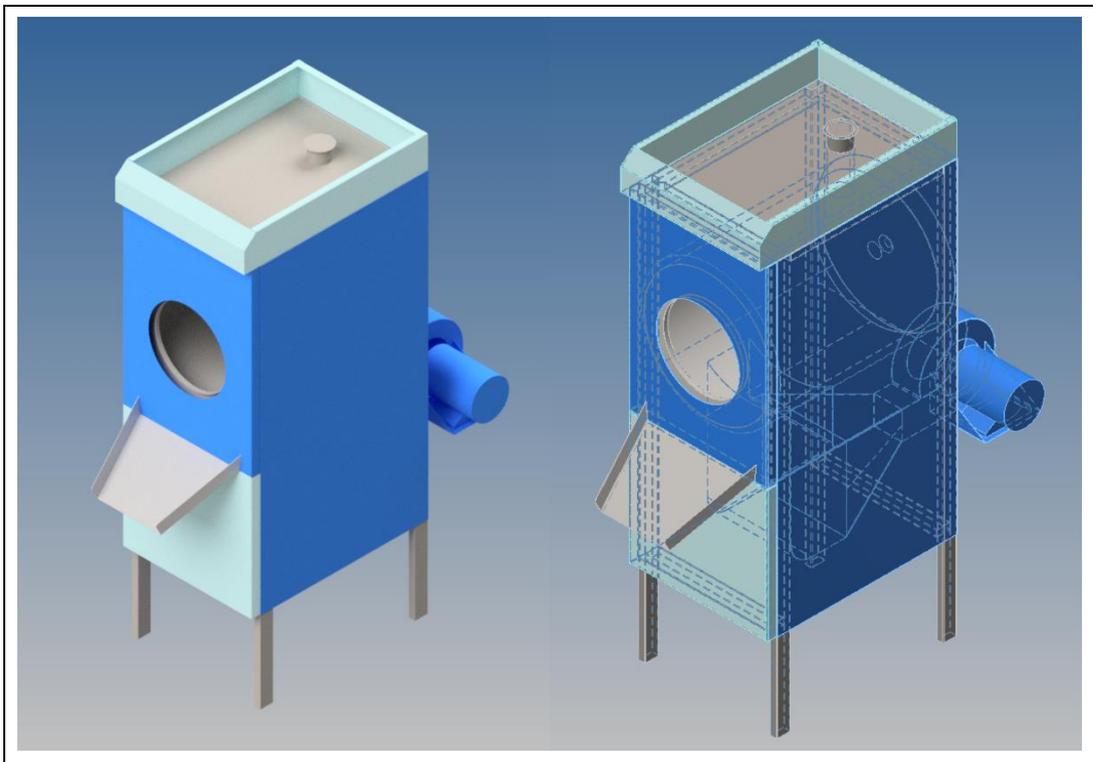


Figura 24-3 Vista isométrica del secador sin compuerta y vista de malla.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

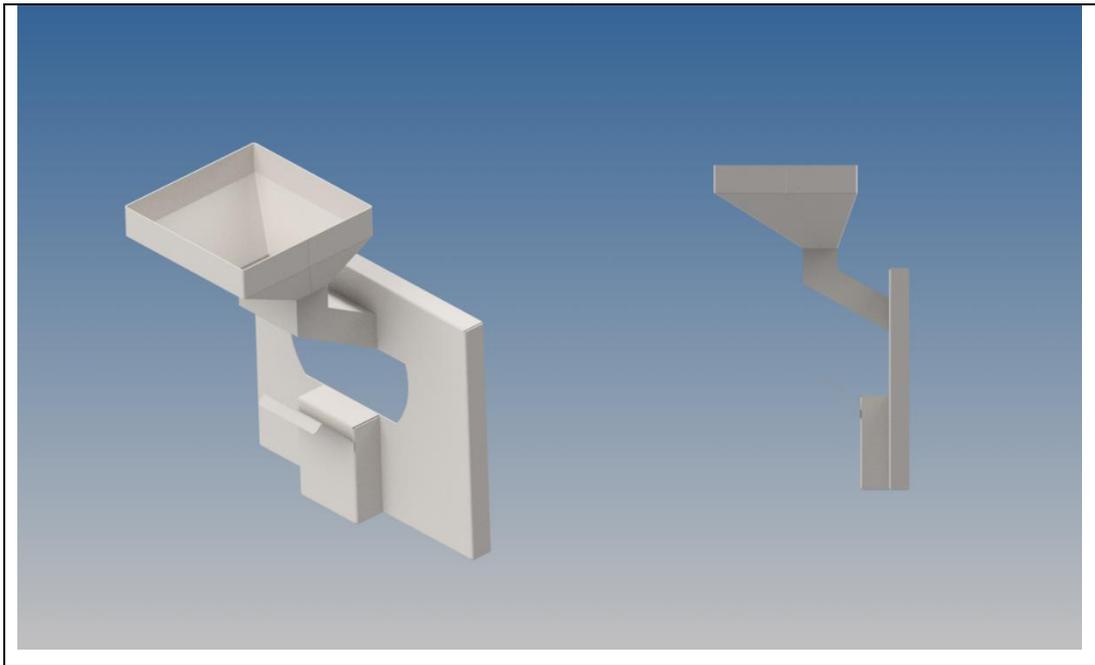


Figura 25-3 Vista isométrica y lateral de la compuerta del secador.
Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

3.3.2. Térmico

Tabla 9-3 Datos técnicos para diseño de proceso de secado.

DATOS TÉCNICOS			
Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad del agua	ρ_w	1000,00	[kg/m ³]
Densidad del aire	ρ_A	1,2250	[kg/m ³]
Material a secar	—	Maiz	[NA]
Densidad aparente material seco	ρ_s	1281,60	[kg/m ³]
Calor específico agua	C_{PL}	4,1841	[kJ/kg K]
Calor específico vapor de agua	C_{PV}	1,8898	[kJ/kg K]
Calor específico aire	C_{PA}	1,6208	[kJ/kg K]
Calor específico material seco	C_{PS}	2,1248	[kJ/kg K]
Calor latente de vaporización (0°C)	ΔH_0	2380,70	[kJ/kg]
Fracción molar de agua en el aire	m_a	0,6220	[NA]
Coefficiente de transf. Calor calent. Aire	U_s	0,1000	[kW/m ² K]
Fracción vacía de carga	ϵ_s	0,4000	[NA]
Constante a_1 ec. Antoine	a_1	4,6543	[NA]
Constante a_2 ec. Antoine	a_2	1435,2640	[NA]
Constante a_3 ec. Antoine	a_3	-64,8480	[NA]
Constante b_1 ec. Oswin	b_1	1,6233	[NA]
Constante b_2 ec. Oswin	b_2	0,0206	[NA]
Constante b_3 ec. Oswin	b_3	0,4880	[NA]
Exponente c_0 ec. cinética secado	c_0	170,0000	[1/s]
Exponente c_1 ec. cinética secado	c_1	1,1500	[NA]
Exponente c_2 ec. cinética secado	c_2	8259,0000	[NA]
Exponente c_3 ec. cinética secado	c_3	492,0000	[NA]
Exponente c_4 ec. cinética secado	c_4	1,8000	[1/°C]

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Tabla 10-3 Resultados de dimensionamiento del proceso de secado..

RESULTADOS DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO			
Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Presión de vapor a condiciones de secado	P_s	60,3084	[kPa]
Actividad de agua a condiciones de secado	a_w	0,1331	[NA]
Humedad de equilibrio a condiciones de secado	X_e	0,0305	[kg H2O/kg as]
Tiempo de secado critico a condiciones de secado	k_c	0,8248	[1/h]
Tiempo de secado	t_{dry}	3,9808	[h]
Flujo de vapor de agua	W	3,4577	[kg/h]
Flujo de aire	F_a	86,32	[kg/h]
Flujo volumétrico de aire	q_a	105,74	[m ³ /h]
Gasto térmico evaporación de agua	Q_{we}	2,13	[kW]
Gasto térmico calentamiento del sólido	Q_{sh}	0,04	[kW]
Gasto térmico calentamiento del aire	Q_{ah}	1,78	[kW]
Gasto térmico total	Q	5,92	[kW]
Velocidad del aire	V_a	2,4923	[m/s]

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

3.3.3. Validación del equipo

3.3.3.1. Validación con maíz

Para el análisis de la curva de secado se plantea un método experimental que no requiere la extracción de muestra. El objetivo de este método es detectar la humedad que está extrayendo el aire del sólido. Para ello, se usa un sensor de humedad que mide la humedad relativa del aire a cierta temperatura. En este caso se coloca junto al sensor de temperatura el sensor de humedad a la salida del secador. Los resultados para una masa de 3,7 kg de maíz fresco, con un tiempo de secado de 3 horas con 45 minutos (14000 segundos) con una velocidad del viento de 2,5 m/s, se muestran en los gráficos 12-3 y 13-3.

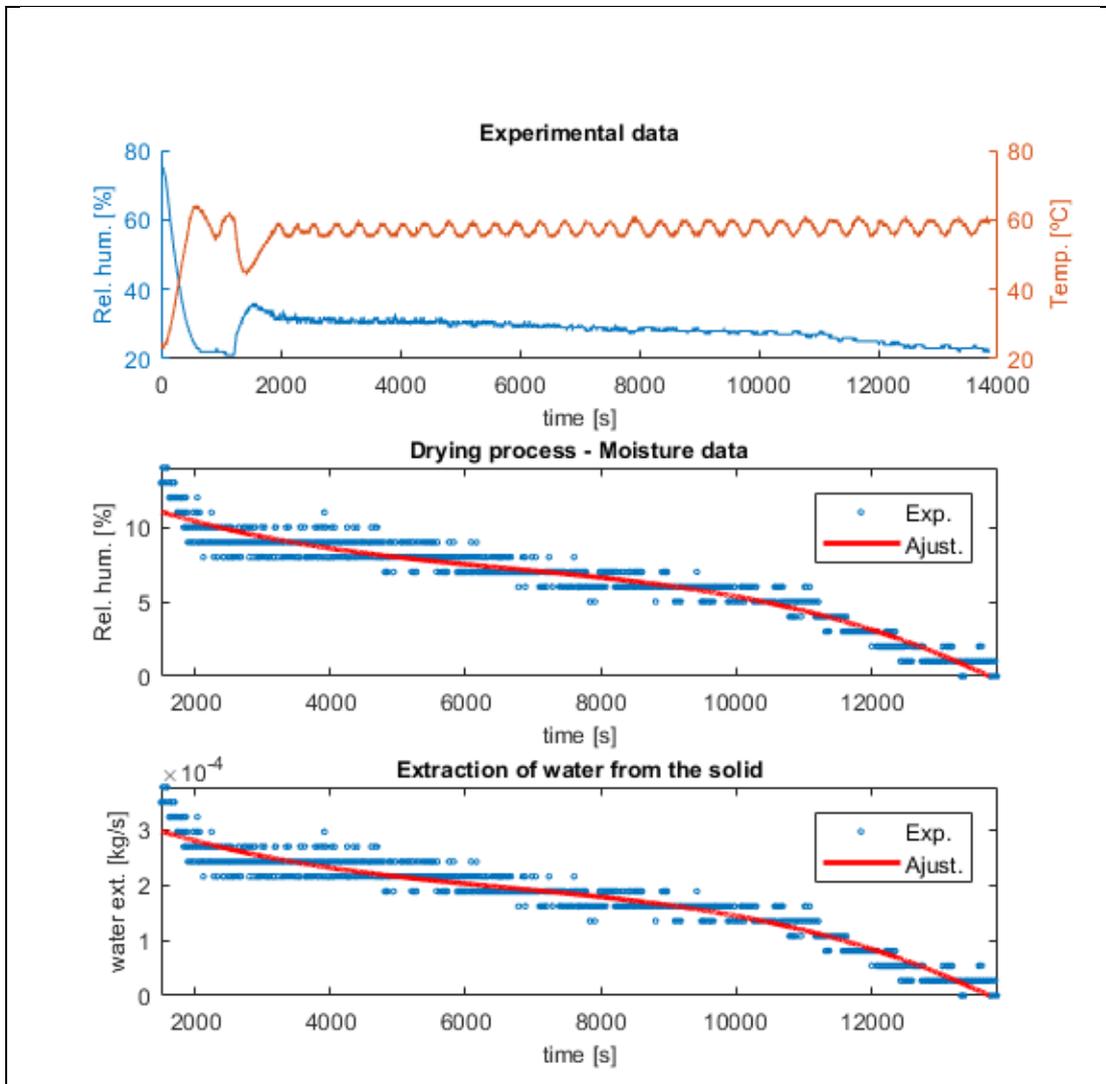


Gráfico 26-3 Datos experimentales de validación con maíz.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

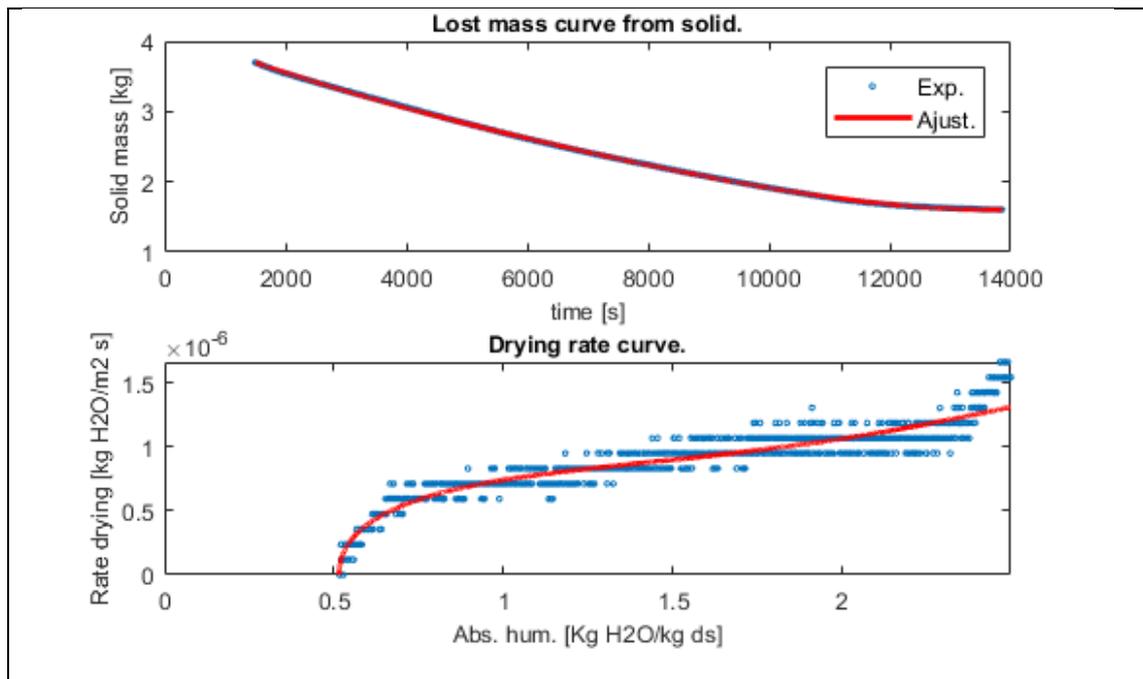


Gráfico 27-3 Curva de velocidad de secado de validación con maíz.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

En el gráfico 26-3, se observa tres gráficos, el superior contiene los datos experimentales guardados por el software de adquisición de datos. En este gráfico se presenta la humedad relativa y la temperatura del aire de salida durante el proceso de secado. En la línea de humedad se observa un decremento consistente con el aumento de temperatura. La humedad del aire a 25 °C @ 0,92 atm (altura de Riobamba) de una humedad relativa de 76 %, al calentarse el aire de 25 a 60 °C @ 0,92 atm. La humedad relativa cae hasta el 22%. Siendo este la base de cálculo para determinar el porcentaje de humedad extraída del sólido por el aire. La humedad permanece estable hasta el segundo 1500, cuando se agrega el material, que provoca un descenso de la temperatura, hasta que el intercambio de calor entre el sólido y el aire llega a un equilibrio, condiciones en las que se obtiene un valor de 37% de humedad relativa del aire. Este 37% indica que existe un $(37-22) = 15\%$ de incremento humedad relativa cuyo origen es el agua extraída del sólido. Esta cantidad varía con el tiempo y se vuelve 0 en la etapa final del proceso de secado. El gráfico bajo el gráfico con los datos experimentales, muestra la variación del porcentaje en exceso de humedad relativa detectada en el aire. Los datos representados como puntos azules son experimentales, mientras que la línea roja es un ajuste con un polinomio de orden 3. En la tercera figura se observa datos experimentales y ajuste a polinomio de los datos de cantidad de agua extraída en kilogramos por segundo del sólido.

En la figura 27-3, se observa los datos experimentales y los ajustados para la curva de masa del material a secar. El valor del peso pasa de 3,7 kg a 1,5 kg. Esta curva deriva de los datos del índice de extracción de agua en kilogramos por segundo. Al final se presenta la curva de secado que

representa humedad absoluta vs velocidad de secado. El código de MATLAB usado para procesar los datos se encuentra en el Anexo J.

3.3.3.2. Validación con arveja

Se siguió el mismo procedimiento con muestras de arveja, los resultados se muestran en los gráficos 28-3 y 29-3. Para este proceso de validación se emplearon 4 kg de arveja tierna. Se tomaron los diámetros de los granos y el peso de 10 granos en varias ocasiones. El equipo se configuró con 4 horas y 20 minutos de tiempo de secado y un setpoint de 58 °C. Los resultados del secado se muestran en los gráficos 14-3.

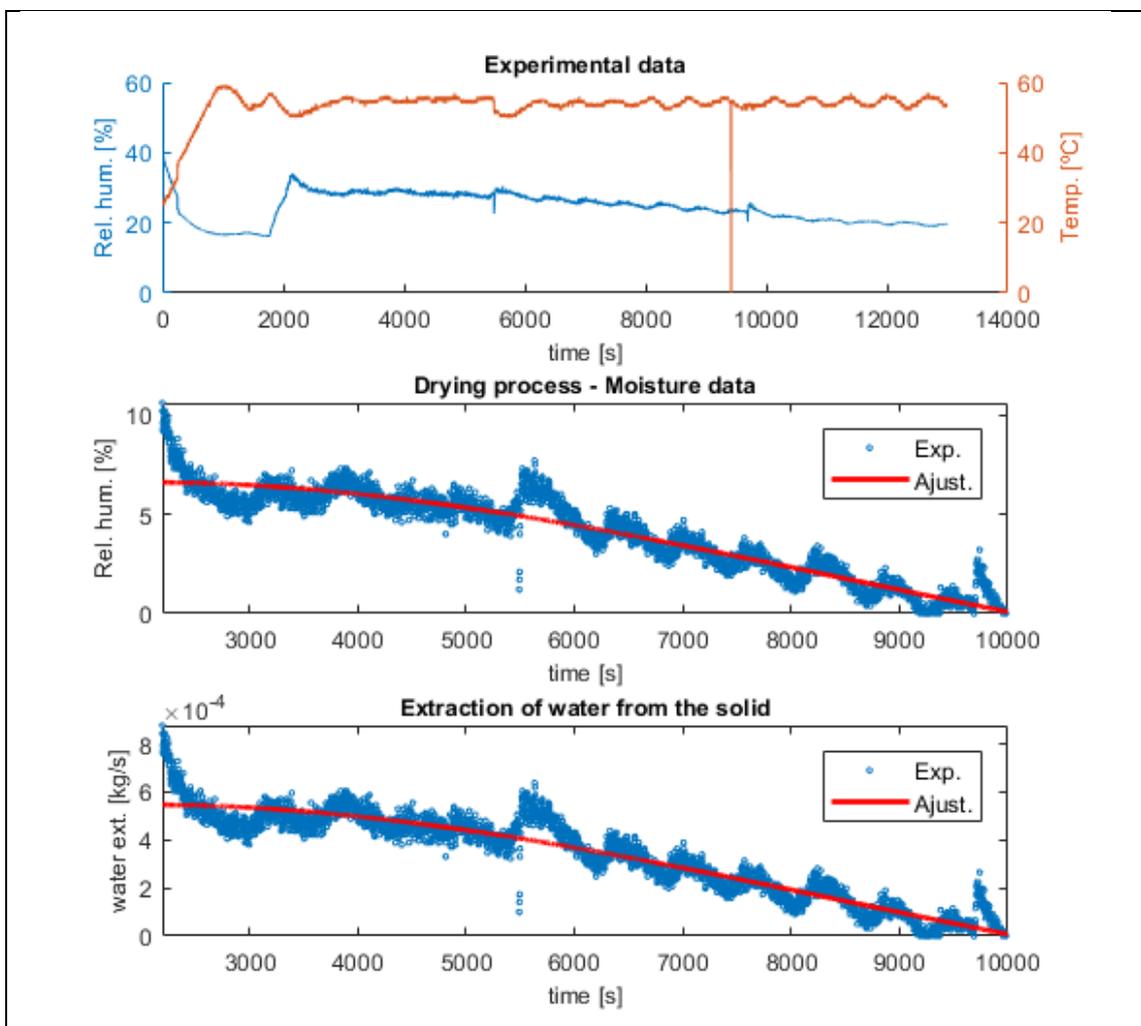


Gráfico 28-3 Datos experimentales de validación con maíz.

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2019

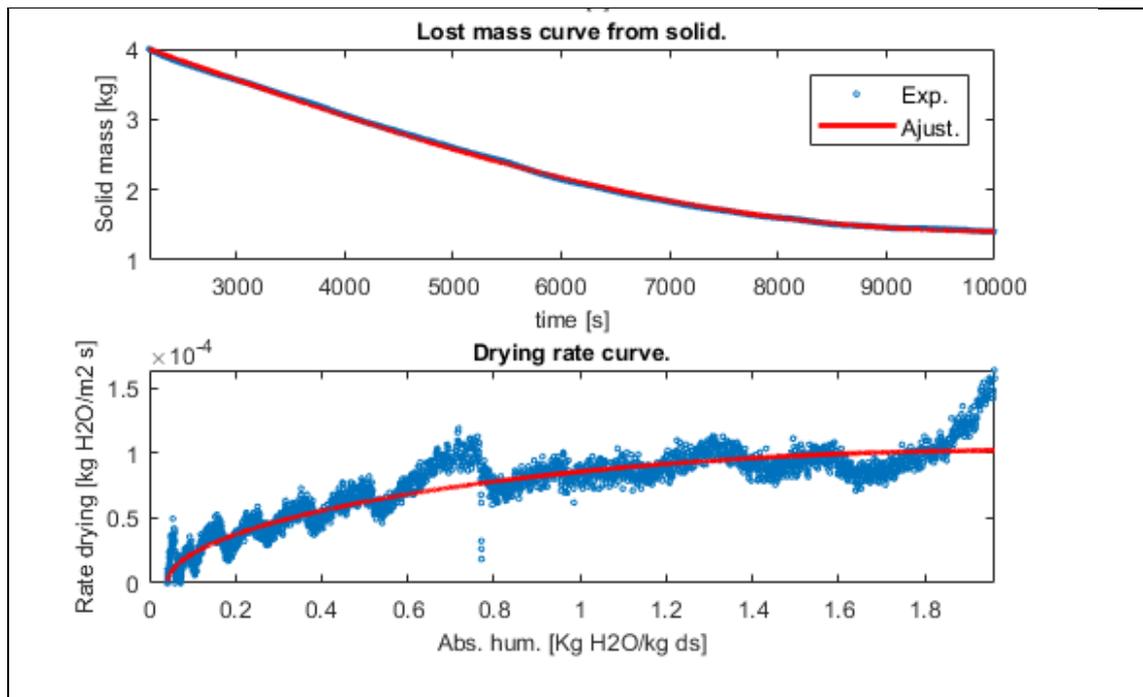


Gráfico 29-3 Datos experimentales de validación con maíz.

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

3.4. Discusión de resultados

3.4.1. Dimensionamiento estructural

En el proceso de dimensionamiento estructural se realizaron los cálculos de diseño del cilindro o tambor del equipo, así como de los levantadores del tambor que crearían el efecto cascada del material, aumentando la superficie de contacto del material y el aire de secado. Los resultados muestran la necesidad de construir un tambor con un diámetro de 50 cm y una profundidad de 50 cm. Fijando la velocidad máxima de giro del tambor en 15 rpm, la longitud extendida de las paletas o levantadores es de 8cm, dando un diámetro efectivo del tambor de 34cm. Este espacio permite el paso del aire de secado y la caída en cascada del material. La carga longitudinal por unidad de profundidad del tambor es de 0,013 m³/m, esto significa que mientras mayor sea la profundidad del tambor mayor carga pueden mover los levantadores. Dadas las dimensiones del tambor el volumen es igual a 0,0981 m³ (9,81 litros). Tomando en cuenta la carga longitudinal y la velocidad de giro del tambor, la carga máxima que puede soportar efectuando un secado eficiente es de 10,09 kg de material granulado.

Las dimensiones de la cámara de secado, la disposición de las resistencias eléctricas para calentar el aire, las dimensiones del ducto, entre otras dimensiones, se muestran en las tablas 22-3 y 24-3. El diseño final se observa en la figura 21-3 y 22-3.

3.4.2. Dimensionamiento térmico

Con los datos técnicos mostrados en la tabla 12-3, se obtuvieron los resultados de la dimensión del proceso de secado. Los resultados muestran que en teoría el secado dentro del tambor se llevara en un tiempo de 6,74h, con una reducción de humedad de 2,95 a 0,14 kg H₂O/kg ss. Para ello, se requiere un flujo de aire a 343 K y presión atmosférica de 86,32 kg/h. La potencia térmica necesaria para llevar a cabo el proceso en total es de 1,99 kW que se convierten en 3 kW con un factor de seguridad de 50%, para selección de resistencia en el catálogo. El flujo de aire se ajusta a 2 m/s con un flujo másico de 82,76 kg/h.

3.4.3. Dimensionamiento del sistema de control

El diagrama eléctrico del sistema de control, se muestra en la figura 19-3, así como en el anexo I. EL diagrama P&ID se muestra en el anexo E y el diagrama de secuencias del controlador en el anexo F. Estos describen la distribución de los elementos de control y la secuencia de control llevada a cabo por el microcontrolador. El sistema de control elegido es uno ON/OFF, con una banda de tolerancia de 3 °C, bajo el punto de consigna. La programación del controlador se la realizo en C++. El software de adquisición de datos se programó en lenguaje MATLAB, por la simplicidad en el establecimiento de comunicación entre el microcontrolador y el software, mediante comunicación serial.

3.4.4. Análisis físico químicos del producto (parte experimental)

En las tablas del anexo K, se muestran los datos del análisis experimental del proceso de secado, y los resultados se pueden observar en las gráficas: 1-3 a 9-3. Que corresponden a graficas de análisis de humedad vs tiempo, velocidad vs humedad, análisis de la curva de secado e integración del tiempo de secado. Los valores de humedad crítica para los materiales son: 0,5161 kg H₂O/kg ss para arveja, 0,1595 kg H₂O/kg ss para maíz y 0,5814 kg H₂O/kg ss para trigo. Las humedades de equilibrio para cada material son: 0,0336 kg H₂O/kg ss para arveja, 0,0288 kg H₂O/kg ss para trigo y 0,03413 kg H₂O/kg ss para el maíz. Los tiempos medios de secado para cada material por el método de la estufa son: 19,82 h para arveja, 19,05h para maíz y 18,33 h para trigo. Ver tabla 2-3.

3.4.5. Discusión de Validación

Maíz

La carga con la que se inició el proceso de secado fue de 8 kg, la humedad inicial fue 82%, el diámetro promedio fue de 1,2 mm, el peso aparente de 100 partículas de maíz fue de 85.4565 g, la velocidad de aire para el secado fue de 2 m/s, la temperatura de secado fue de 65 °C y el tiempo de secado fue de 5 horas obteniendo los siguientes resultados: la humedad final fue 11%, el peso de carga final fue de 2.5 kg.

Arveja

La carga con la que se inició el proceso de secado fue de 7 kg, la humedad inicial fue 77%, el diámetro promedio fue de 0.96 mm, el peso aparente de 100 partículas de arveja fue de 65.2056 g, la velocidad de aire para el secado fue de 2 m/s, la temperatura de secado fue de 60 °C y el tiempo de secado fue de 4 horas obteniendo los siguientes resultados: la humedad final fue 9.89%, el peso de carga final fue de 3.5 kg.

3.5. Costos del proyecto

Una vez concluido el Diseño y Construcción del Secador rotatorio para sólidos con control de flujo y temperatura de aire, se determinó que el costo total es de 4192,00 dólares americanos, que incluyen la adquisición de la materia prima para la simulación experimental, la construcción del secador y la instalación del sistema de control

Tomando como referencia MacCabe: *“Los usuarios rara vez diseñan los secadores, más bien se adquieren a compañías especializadas en la ingeniería y fabricación de este tipo de equipos.”* (McCabe, Smith y Marriot, 2001, p. 838)., se puede entender que resulta mejor comprar un secador que diseñarlo. Sin embargo, el costo de un secador rotatorio de una casa comercial es elevado, comparado con el costo de este trabajo. Además, hay que considerar que no se encontró en alguna casa comercial un secador rotatorio que incluya todas las especificaciones del secador construido como son: un sensor de temperatura de la cámara, un sensor de velocidad de aire y un sensor de humedad de aire, además del software que permite la adquisición y procesamiento de datos para la elaboración de las curvas humedad vs tiempo, que son la base del estudio del comportamiento del secado de sólidos.

Tabla 11-3 Presupuesto para equipos y maquinaria.

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
Diseño y construcción	1	2000,00	2000,00
Instalación sistema de control	1	500,00	500,00
Validación de equipo	1	100,00	100,00
Documentación	1	150,00	150,00
Otros	1	400,00	400,00
Subtotal			3150,00
Otros gastos			3811,00
Imprevistos 10%			381,10
Total			4192,00

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

Tabla 12-3 Cronograma de ejecución del proyecto.

ACTIVIDADES	TIEMPO DE EJECUCIÓN																							
	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión bibliográfica	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Realización del borrador del anteproyecto		•	•																					
Revisión y corrección del borrador del anteproyecto			•	•	•																			
Presentación y Aprobación del Anteproyecto					•	•																		
Reconocimiento y obtención de información del lugar de investigación							•																	
Análisis del diseño del secador rotatorio								•																
Estudio mecánico y eléctrico								•	•															
Estudio de la metodología del proceso										•	•	•												
Elaboración de planos del secador													•	•	•	•	•							
Construcción del secador																	•	•	•					
Validación del secador																		•						
Elaboración de borradores																			•					
Corrección borradores																				•				
Tipiado del trabajo final																				•	•	•		
Empastado y presentación del trabajo final																				•	•	•		
Auditoría académica																					•	•		
Defensa del trabajo																								•

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2019

CONCLUSIONES

Se simuló de forma experimental el proceso de secado usando una estufa, con el objetivo de obtener la humedad crítica y humedad de equilibrio de tres tipos de material: arveja, maíz y trigo.

Las variables definidas para el proceso de secado fueron fijadas en una temperatura de 60°C y un flujo de aire promedio de 2 m/s.

Para los cálculos de diseño estructural se utilizaron los parámetros de secado determinados de forma experimental a través de la construcción de una hoja de cálculo de Microsoft Excel automatizada usando macros de VBA, definiendo los siguientes parámetros: el tamaño del cilindro (tambor) del secador es de 0,50m , diámetro del tambor 0,3400 m , longitud de los levantadores 0,0800 m, ángulos de diseño de los levantadores (paletas) 100 grados, carga longitudinal del tambor 0,0157 m³/m , velocidad de giro del tambor 15 rpm.

En el diseño del proceso de secado se determinó lo siguiente: la potencia de las resistencias eléctricas de 3 kW, el flujo de aire de secado 82,76 kg/h, la temperatura de secado 333°K, el tiempo de secado medio 6.746 h y en el diseño del sistema de control se determinó el tipo de ciclo de control a usar (ON/OFF) ya que este sistema permite alargar la vida útil de las resistencias, apagándolas 3 grados antes de llegar a la establecida, haciendo que por exceso de calor el sistema llegue a la temperatura establecida evitando un sobrecalentamiento de las mismas.

La validación se realizó con dos materiales: arveja y maíz cuyos resultados muestran que la medición indirecta de la humedad del sólido a partir de la humedad del aire, es viable. Ya que, por diferencia de humedad relativa del ambiente y la humedad relativa presente en el sólido, se puede calcular un aproximado de la tasa de evaporación. El sensor de humedad recoge cada segundo, datos que envía al software. Cuya función es adquirir y procesar datos con el objetivo de obtener las curvas de secado (humedad vs tiempo). Los resultados mostraron que es necesario desarrollar filtros matemáticos, que permitan eliminar el efecto de la temperatura sobre la humedad relativa.

RECOMENDACIONES

Antes del uso del equipo, realizar la revisión de los manuales de operación, que incluyen la operación del panel de control y el software de adquisición de datos, así como procedimientos de carga y descarga de materiales, etc.

Dadas las características eléctricas del equipo se recomienda conectar a una toma de 220V, con protección para evitar el daño en sus componentes y el panel de control a un computador a través de una conexión USB.

Para futuros trabajos de automatización del equipo, se recomienda estudiar a profundidad sobre el procesamiento de datos, para la obtención de curvas de secado del sólido.

El equipo se puede utilizar en estudios sobre control de procesos e investigaciones sobre; la operación de secado, transferencia de masa y de calor.

BIBLIOGRAFÍA

ALEXANDER, M. y KUSLEIKA, D., *Excel® 2016 Power Programming with VBA* [en línea]. S.l.: s.n, 2017. [Consulta: 12 marzo 2019]. ISBN 9781119067726. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-ec/Excel+2016+Power+Programming+with+VBA-p-9781119067726>.

BAKER, C.G.J. THE DESIGN OF FLIGHTS IN CASCADING ROTARY DRYERS. *Drying Technology* [en línea], vol. 6, no. 4, 1998, pp. 631-653. [Consulta: 12 marzo 2019]. ISSN 0737-3937. DOI 10.1080/07373938808916402. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373938808916402>.

FOUST, A., Principios de operaciones unitarias., 2da Ed., México-México Editorial Continental., 2006., Pp.461-469.

HIMMELBLAU, D. Balances de Materia y Energía. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, D.F., 1994. Pp. 475-482

KEEY, R.B. *Drying principles and practice*. S.l. 1972. Pergamon Press. ISBN 9780080169033.

KENNET, J. Termodinámica. 6a. ed. Barcelona: Mc. Graw Hill, 2001. Pp. 468-486.

LOCKHART, S. y TILLESÓN, E. *An engineer's introduction to programming with MATLAB 2018* [en línea]. S.l.: s.n, 2018. [Consulta: 12 marzo 2019]. ISBN 9781630572068. Disponible en: <https://www.mathworks.com/academia/books/an-engineers-introduction-to-programming-with-MATLAB-lockhart.html>.

MARTÍNEZ, P., Operaciones de separación en Ingeniería Química., 1ra Ed., Madrid-España Editorial Pearson., 2004., Pp. 806-816.

MCCABE, W.L., OTROS., Operaciones unitarias en ingeniería química. Traducido del inglés. 4ª ed. Madrid-España: McGraw-Hill, 1998 Pp. 206- 214

MCCABE, W., Operaciones Unitarias en Ingeniería Química., 6ta Ed., México-México Editorial McGraw Hill., 2002., Pp. 835-853 OCÓN GARCÍA, J. y TOJO BARREIRO, G. *Problemas de ingeniería química* [en línea]. S.l.: Aguilar, 1976. [Consulta: 12 marzo 2019]. ISBN 8403201052. Disponible en:

https://books.google.com.ec/books/about/Problemas_de_ingeniería_química.html?id=tP0qPAAACAAJ&redir_esc=y.

OCÓN/ TOJO, G., Problemas de Ingeniería Química. .2a. ed. Santiago: Chile, Pp. 243. V. 2

REVOL, D., BRIENS, C. y CHABAGNO, J The design of flights in rotary dryers. *Powder Technology* [en línea], vol. 121, no. 2-3, 2001, pp. 230-238. [Consulta: 12 marzo 2019]. ISSN 0032-5910. DOI 10.1016/S0032-5910(01)00362-X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003259100100362X?via%3Dihub>.

TREYBAL, R.E., Operaciones de transferencia de masa. Traducido del inglés. 2ª ed. Buenos Aires-Argentina: McGraw-Hill, s.f. Pp. 60-65

VAN'T LAND, C.M., *Drying in the Process Industry* [en línea]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011. [Consulta: 27 agosto 2018]. ISBN 9781118105818. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118105818>.

ANEXOS

ANEXO A. Hoja de cálculo para diseño estructural.

DATOS TÉCNICOS			
Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Coefficiente de fricción dinámico (Stainless steel)	μ	0.6	[NA]

ESPECIFICACIONES DE TAMBOR			
Especificación	Símbolo	Valor	Unidades
Radio externo del tambor	r_e	0.25	[m]
Longitud vastago de levantador	L_v	0.08	[m]
Longitud retenedor levantador	L_r	0.04	[m]
Ángulo entre tg al perímetro y levantador	α	90	[grados]
Ángulo entre vastago y retenedor	ψ	100	[grados]
Velocidad de giro del motor	N	15	[rpm]
Numero max. de paletas	n_{max}	3	[unidad]
Longitud del tambor	L_t	0.5	[m]

ECUACIONES DE DISEÑO DE LEVANTADORES ANGULARES

ÁNGULO DE CAÍDA DE PARTICULA

$$\tan \phi = \frac{\mu + v(\cos \theta - \mu \sin \theta)}{1 - v(\sin \theta + \mu \cos \theta)}$$

ÁNGULO COMPLEMENTARIO DE VASTAGO

$$\gamma = \sin^{-1} \left[\frac{R \cos \alpha}{(R^2 - 2RL \sin \alpha + L^2)^{1/2}} \right]$$

SECCIÓN TRIANGULAR

$$WEDGE(R, x, \sigma) = \frac{R^2}{2} \left[\sigma - \sin^{-1} \left\{ \frac{R-x}{R} \sin \sigma \right\} - \frac{R(R-x)}{2} \sin \left[\sigma - \sin^{-1} \left\{ \frac{R-x}{R} \sin \sigma \right\} \right] \right]$$

ÁNGULO DE PROYECCION ENTRE BORDE DE RETENEDOR Y VASTAGO

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{L' \sin(\psi + \gamma)}{L' \cos(\psi + \gamma) + (R^2 - 2RL \sin \alpha + L^2)^{1/2}} \right]$$

LIMITE CASO 1. CRITERIO DE CALCULO DE SECCIONES

$$(\theta - \phi)_{T1} = \pi - (\psi + \gamma - \beta) - \sin^{-1} \left[\frac{L \sin \psi}{(L^2 + L'^2 - 2LL' \cos \psi)^{1/2}} \right]$$

SECCION OCUPADA POR MATERIAL EN CASO 1

$$A_{DABC} = A_{SOT} - A_{BOA} - A_{WDMT} + A_{WZSC}$$

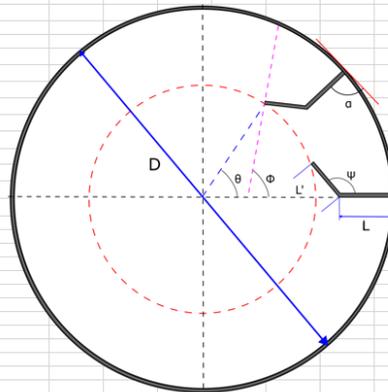
LIMITE CASO 2. CRITERIO DE CALCULO DE SECCIONES

$$(\theta - \phi)_{T2} = \pi - (\psi + \gamma - \beta)$$

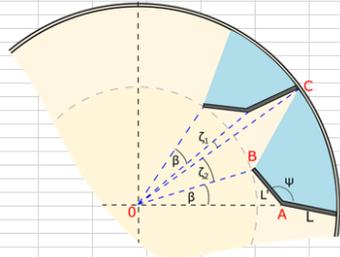
CARGA TOTAL DE LEVANTADORES

$$H^* = 2 \sum h_i^* - h_0^*$$

VISTA FRONTAL - TAMBOR



VISTA FRONTAL - TAMBOR



SOLUCION DEL MODELO			
Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Diámetro exterior de tambor	D_e	0.5	[m]
Ángulo gamma	γ	0.00	[grados]
Ángulo proyectado desde retenedor paleta	β	10.62	[grados]
Longitud de paleta proyectada	L_p	0.0800	[m]
Radio efectivo del tambor	r_e	0.1700	[m]
Diámetro efectivo de tambor	D_e	0.3400	[m]
Ángulo de separación entre paletas	θ	120	[grados]
Velocidad angular	ω	1.5708	[rad/s]
Ratio de fuerza centrífuga y gravitacional	v_r	0.0428	[m ² /s ²]
Carga longitudinal del tabor	H^*	0.0131	[m ³ /m]
Factor de seguridad para sobrellenado	f_s	1.2	[NA]
Carga longitudinal de diseño del tambor	H	0.0157	[m ³ /m]
Volumen de carga de diseño	V	0.0073	[m ³]
Capacidad masica del tambor	m	10.0925	[Kg]

NOTAS:

Hoja de cálculo para diseño estructural

CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

<input type="checkbox"/>	Aprobado	<input type="checkbox"/>	Preliminar
<input type="checkbox"/>	Certificado	<input type="checkbox"/>	Por aprobar
<input type="checkbox"/>	Información	<input type="checkbox"/>	Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ELABORADO POR:
INCA A. & OÑATE K., 2019

TEMA: Hoja de cálculo para diseño estructural.

LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	7/2/2019

ANEXO B. Hoja de cálculo para el balance de masa y energía.

DATOS TÉCNICOS			
Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad del agua	ρ_w	1000,00	[kg/m ³]
Densidad del aire	ρ_a	1,2250	[kg/m ³]
Material a secar	—	Maíz	[NA]
Densidad aparente material seco	ρ_s	1281,60	[kg/m ³]
Calor específico agua	C_{pL}	4,1841	[kJ/kg K]
Calor específico vapor de agua	C_{pV}	1,8898	[kJ/kg K]
Calor específico aire	C_{pA}	1,6208	[kJ/kg K]
Calor específico material seco	C_{pS}	2,1248	[kJ/kg K]
Calor latente de vaporización (0°C)	ΔH_0	2380,70	[kJ/kg]
Fracción molar de agua en el aire	m_a	0,6220	[NA]
Coefficiente de transf. Calor calent. Aire	U_3	0,1000	[kW/m ² K]
Fracción vacía de carga	ϵ_s	0,4000	[NA]
Constante a_1 ec. Antoine	a_1	4,6543	[NA]
Constante a_2 ec. Antoine	a_2	1435,2640	[NA]
Constante a_3 ec. Antoine	a_3	-64,8480	[NA]
Constante b_1 ec. Oswin	b_1	1,6233	[NA]
Constante b_2 ec. Oswin	b_2	0,0206	[NA]
Constante b_3 ec. Oswin	b_3	0,4880	[NA]
Exponente c_0 ec. cinética secado	c_0	170,0000	[1/s]
Exponente c_1 ec. cinética secado	c_1	1,1500	[NA]
Exponente c_2 ec. cinética secado	c_2	8259,0000	[NA]
Exponente c_3 ec. cinética secado	c_3	492,0000	[NA]
Exponente c_4 ec. cinética secado	c_4	1,8000	[1/°C]

$$k(a_w, T_d) = c_0 e^{-c_1 a_w} e^{\frac{-c_2}{c_3 + c_4 T_d}}$$

DIAGRAMA DEL PROCESO DE SECADO



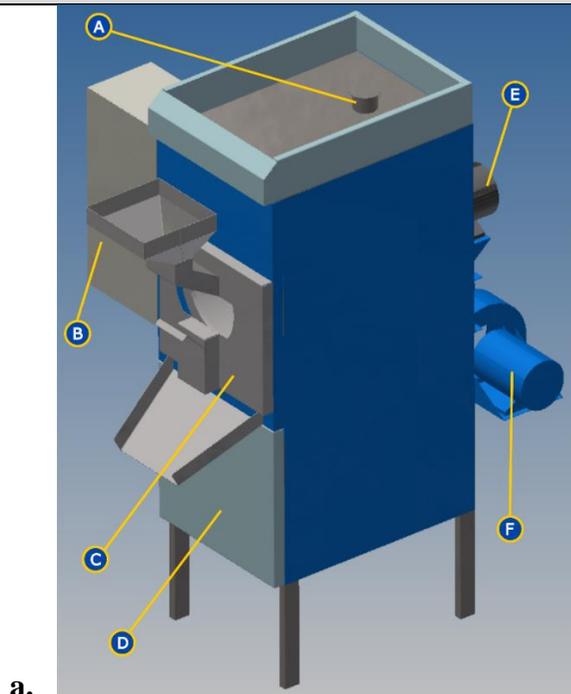
VARIABLES DE DISEÑO			
Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Humedad de aire de secado	Y	0,0263	[kg H2O/kg as]
Temperatura del aire secado	T	333,00	[K]
Velocidad de aire de secado	V	2,0000	[m/s]
Diámetro de secador	D	0,5	[m]

ESPECIFICACIONES DEL PROCESO			
Especificación	Símbolo	Valor	Unidades
Flujo másico de alimentación (sol. Húmedo)	F_0	10,09	[kg sh]
Humedad de entrada del material	X_0	2,95	[kg H2O/kg ss]
Humedad de salida del material	X_1	0,14	[kg H2O/kg ss]
Temperatura ambiente	T_0	298,00	[K]
Humedad ambiente	Y_0	0,0134	[kg H2O/kg as]
Profundidad de carga	Z_0	0,20	[m]
Presión ambiente	P_0	101,33	[kPa]
Temperatura de salida del sólido	T_1	313	[K]
Diámetro de conducto de aire	D_{ca}	0,05	[m]

SOLUCIÓN DEL MODELO			
Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Presión de vapor a condiciones de secado	P_s	49,75	[kPa]
Actividad de agua a condiciones de secado	a_w	0,0826	[NA]
Humedad de equilibrio a condiciones de secado	X_c	0,0847	[kg H2O/kg as]
Tiempo de secado crítico a condiciones de secado	k_c	0,5853	[1/h]
Tiempo de secado	t_{dry}	6,7446	[h]
Flujo de vapor de agua	W	1,0645	[kg/h]
Flujo de aire	F_a	82,76	[kg/h]
Flujo volumetrico de aire	q_a	101,38	[m ³ /h]
Gasto térmico evaporación de agua	Q_{we}	0,66	[kW]
Gasto térmico calentamiento del sólido	Q_{cs}	0,01	[kW]
Gasto térmico calentamiento del aire	Q_{ca}	1,32	[kW]
Gasto térmico total	Q	3,00	[kW]
Velocidad del aire	V_s	2,0000	[m/s]

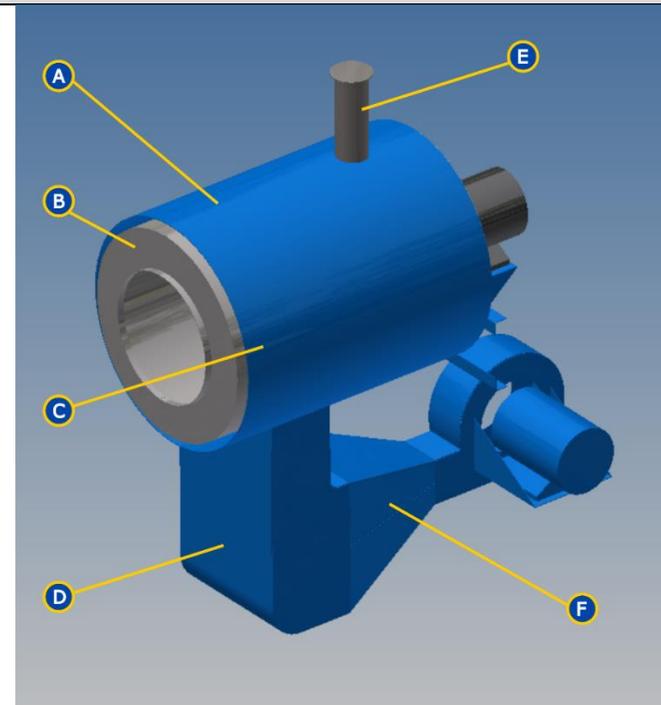
NOTAS: Hoja de cálculo para el balance de masa y energía.	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA ELABORADO POR: INCA A. & OÑATE K., 2019	TEMA: Hoja de cálculo para el balance de masa y energía.		
	<input type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Preliminar		LAMINA	ESCALA	FECHA
	<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Por aprobar		1	1:1	7/2/2019
<input type="checkbox"/> Información	<input type="checkbox"/> Por calificar					

ANEXO C. Diseño de CAD del secador.



a.

- A. Tubería de salida para aire.
- B. Tolva de ingreso de material
- C. Puerta de acceso a cámara de secado.
- D. Cubierta de cámara de calentamiento de aire.



b.

- A. Cilindro separador de cámara de secado.
- B. Tambor o cilindro de carga de material.
- C. Rodamiento y sujeción de tambor.
- D. Conducto de aire.
- E. Ensanchamiento (cámara de resistencias eléctricas).

NOTAS:	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA ELABORADO POR: <i>INCA A. & OÑATE K., 2019</i>	TEMA: Diseño CAD del secador			
a. Partes externas del secador	<input type="checkbox"/>	Aprobado		<input type="checkbox"/>	Preliminar	LAMINA	ESCALA
b. Partes internas del secador	<input type="checkbox"/>	Certificado	<input type="checkbox"/>	Por aprobar	1	1:1	7/2/2019
	<input type="checkbox"/>	Información	<input type="checkbox"/>	Por calificar			

ANEXO D. Secador rotatorio construido.



a.

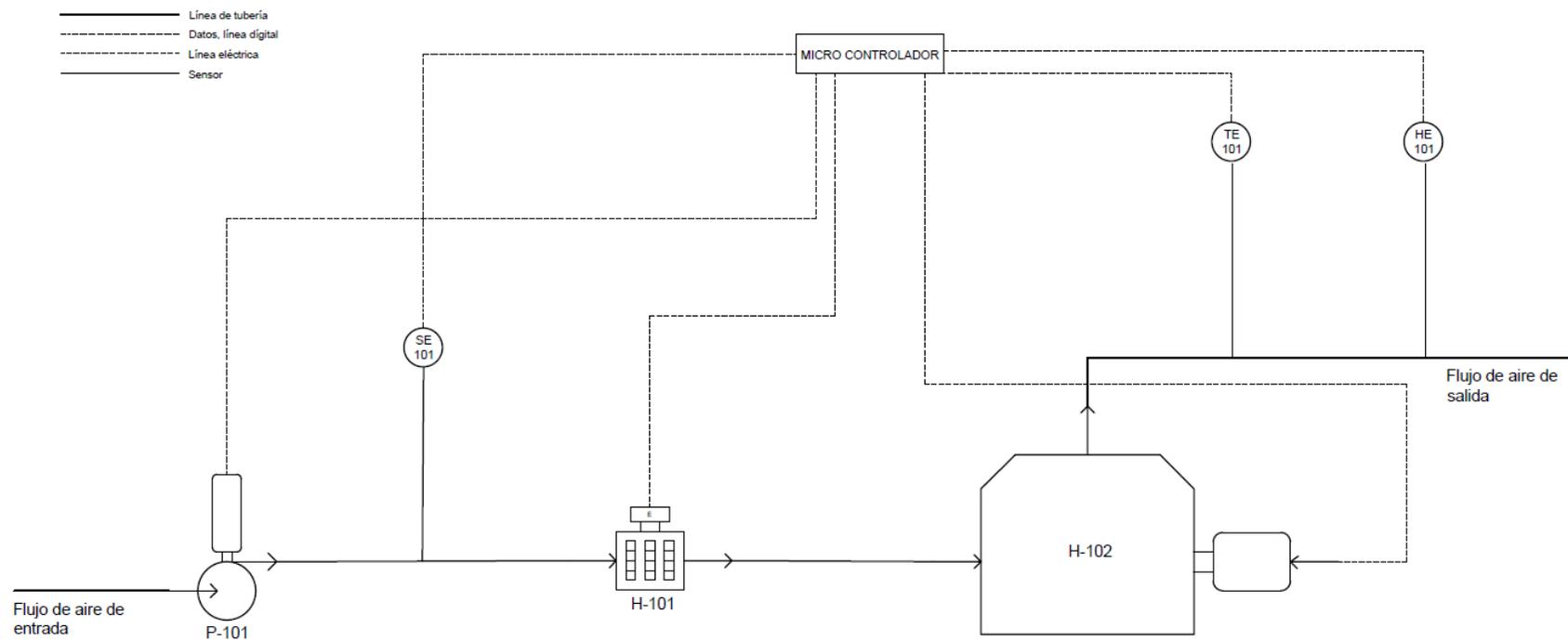


b.

NOTAS: a. Vista frontal del secador rotatorio construido. b. Vista frontal del Panel de Control.	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA ELABORADO POR: INCA A. & OÑATE K., 2019	TEMA: Secador rotatorio construido.		
	<input type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Preliminar		LAMINA	ESCALA	FECHA
	<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Por aprobar	1	1:1	7/2/2019	
	<input type="checkbox"/> Información	<input type="checkbox"/> Por calificar				

ANEXO E. Diagrama P&ID del secador rotatorio.

DIAGRAMA P&ID DEL SISTEMA DE CONTROL (ON/OFF)



NOTAS:

P-101 Ventilador centrífugo.
 H-101 Intercambiador de calor eléctrico.
 H-102 Intercambiador de calor – Secador.

CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

<input type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Preliminar
<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Por aprobar
<input type="checkbox"/> Información	<input type="checkbox"/> Por calificar

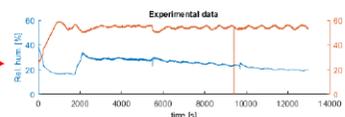
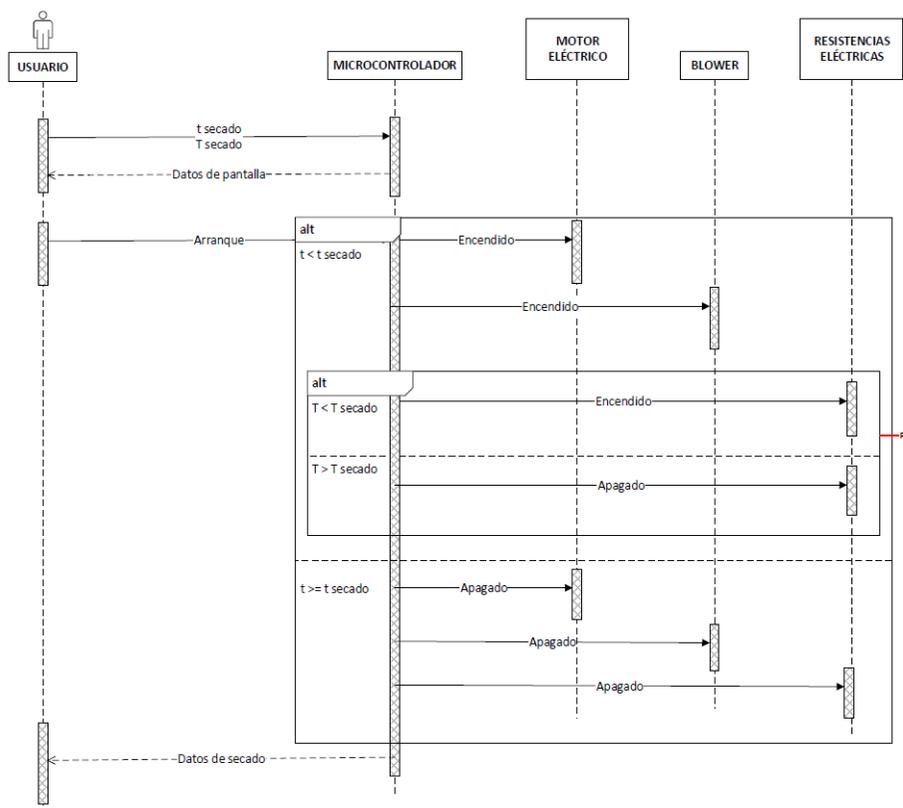
**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
 DE CHIMBORAZO
 FACULTAD DE CIENCIAS
 ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
 ELABORADO POR:
 INCA A. & OÑATE K., 2019**

TEMA: Diagrama eléctrico primera parte

LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	7/2/2019

ANEXO F. Diagrama de secuencia del proceso de control ON/OFF.

DIAGRAMA DE SECUENCIA DEL PROCESO DE CONTROL ON/OFF



NOTAS:

Diagrama eléctrico primera parte

CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

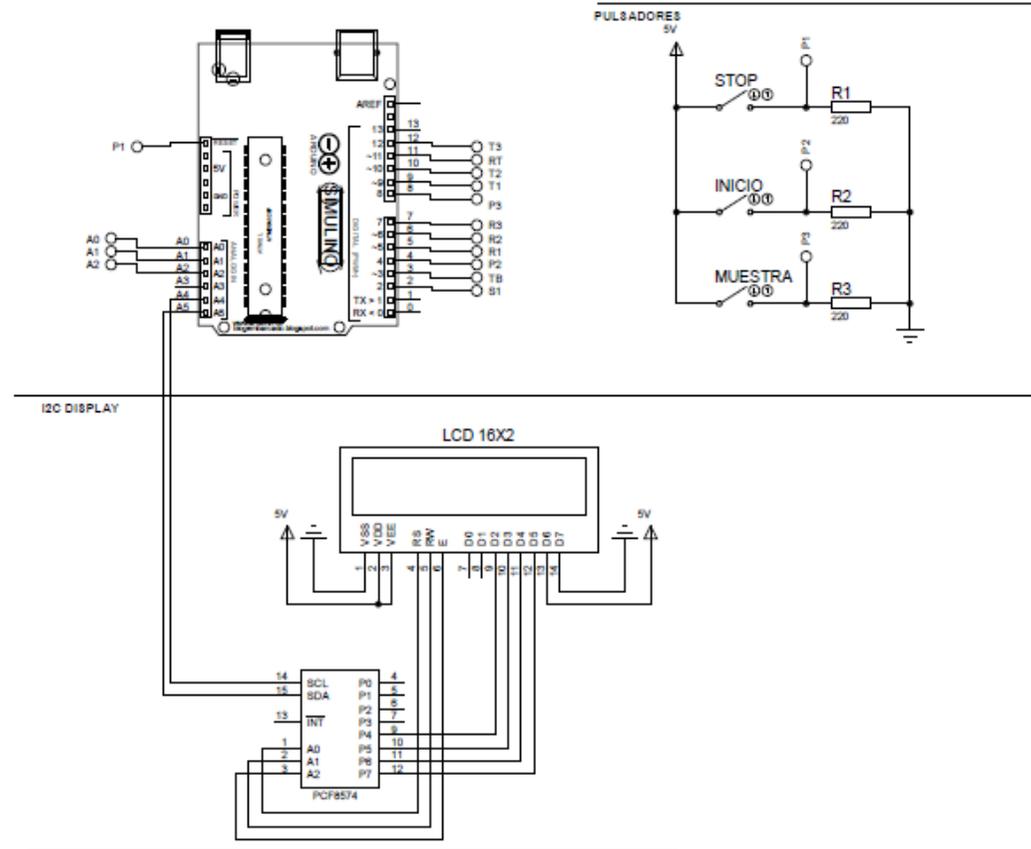
<input type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Preliminar
<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Por aprobar
<input type="checkbox"/> Información	<input type="checkbox"/> Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
 ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
 ELABORADO POR:
INCA A. & OÑATE K., 2019

TEMA: Diagrama eléctrico primera parte

LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	7/2/2019

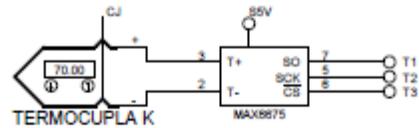
ANEXO G. Diagrama eléctrico del panel de control, primera parte.



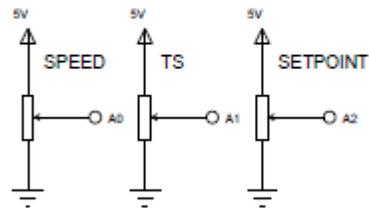
NOTAS:	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA ELABORADO POR: INCA A. & OÑATE K., 2019	TEMA: Diagrama eléctrico primera parte		
Diagrama eléctrico primera parte	<input type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Preliminar		LAMINA	ESCALA	FECHA
	<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Por aprobar	1	1:1	7/2/2019	
	<input type="checkbox"/> Información	<input type="checkbox"/> Por calificar				

ANEXO H. Diagrama eléctrico del panel de control, segunda parte.

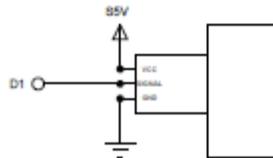
SENSOR TERMICO



REFERENCIAS



SENSOR CAUDAL



NOTAS:

Diagrama eléctrico segunda parte

CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

<input type="checkbox"/>	Aprobado	<input type="checkbox"/>	Preliminar
<input type="checkbox"/>	Certificado	<input type="checkbox"/>	Por aprobar
<input type="checkbox"/>	Información	<input type="checkbox"/>	Por calificar

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ELABORADO POR:
INCA A. & OÑATE K., 2019**

TEMA: Diagrama eléctrico segunda parte

LAMINA

ESCALA

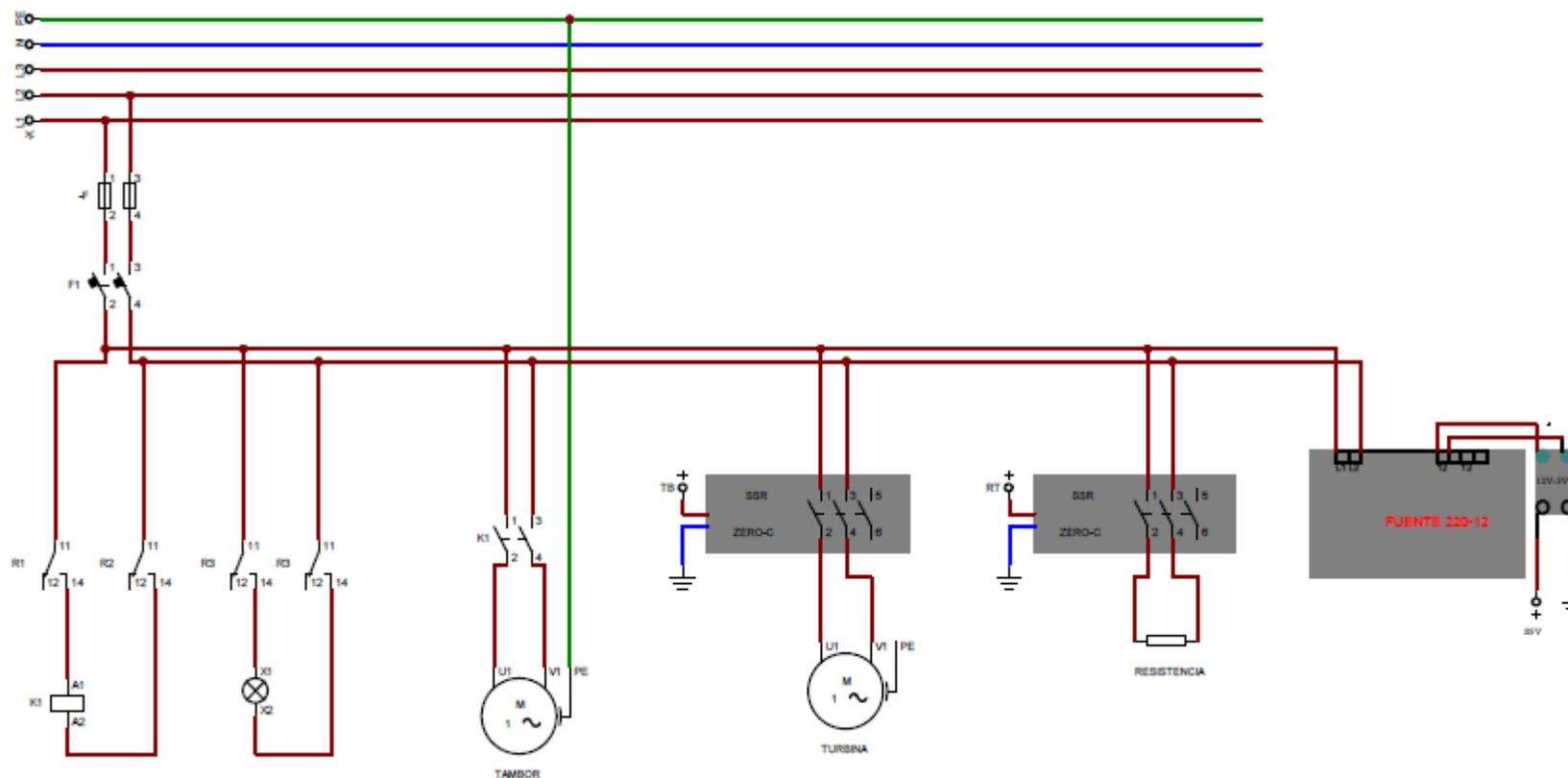
FECHA

1

1:1

7/2/2019

ANEXO I. Diagrama eléctrico de potencia del secador.



NOTAS:

Diagrama eléctrico de potencia del secador

CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

<input type="checkbox"/>	Aprobado	<input type="checkbox"/>	Preliminar
<input type="checkbox"/>	Certificado	<input type="checkbox"/>	Por aprobar
<input type="checkbox"/>	Información	<input type="checkbox"/>	Por calificar

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
 DE CHIMBORAZO
 FACULTAD DE CIENCIAS
 ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
 ELABORADO POR:
 INCA A. & OÑATE K., 2019**

TEMA: Diagrama eléctrico de potencia del secador.

LAMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	7/2/2019

ANEXO J. Código en MATLAB para cálculos de curva de secado.

```
clear, click;
%% READING EXPERIMENTAL DATA AND DEFINE CONSTANTS
m = covered('mdt.csv');           % Import of data from csv file
tlim = 1500;                       % Data of drying
h0 = 22;                           % Relative air moisture at 60°C [%]
n = 3;                             % Grade of polynomial aprox.
temp = mean(m(tlim:end,2));        % Mean temperature of process [°C]
pbar = 770.31;                     % Barometric pressure in Riobamba [mmHg]
h0_e = 22;                         % Relative humidity at 60 °C of air
rv = 461.51;                       % Gas constant for air. [J/kg K]
va = 2.5;                          % Speed of air [m/s]
%aa = (0.15*0.25);                % Area of duct [m2]
aa = power(0.102, 2)*pi/4;        % 0.508
qa = va*aa;                       % Volumetric flow of air [m3/s]
m0 = 3.7;                          % Input mass [kg]
h0_e = 71.418;                    % Input moisture of material [%]
hf_e = 24.774;                    % Final moisture of material [%]
ms = m0*(1-(h0_e/100));

% weight of 10 grains [g]
pb = [7.2424, 6.1314, ...
      7.5993, 7.7265, ...
      6.8702, 6.7052, ...
      7.7084, 7.7095, ...
      6.9914, 7.0079];

% Diameter of grains [mm]
dp = [1.20, 0.82, ...
      1.20, 1.24, ...
      1.30, 0.92, ...
      0.90, 1.20, ...
      1.23, 1.04];

%% APROXIMATE VARIATION OF HUMIDITY
h = [m(tlim:end, 1) m(tlim:end, 4)];
dh(:, 1) = h(:, 1);
dh(:, 2) = h(:, 2) - h0;

p = polyfit(dh(:, 1), dh(:, 2), n);
dh(:, 3) = polyval(p, dh(:,1));

%% CONVERT TO AIR EXTRACTION RATE FROM SOLID

pws = saturationVaporPressure(pbar, 60); % Saturation pressure [mmHg]

dh(:, 4) = ((qa*pws*133.322)/(100*rv*(temp+273.15))).*dh(:,3);
dhr(:, 1) = ((qa*pws*133.322)/(100*rv*(temp+273.15))).*dh(:,2);

%% GET THE CURVE OF LOST MASS
[rdh, cdh] = size(dh);

for i=1:rdh
    if i==1
        dh(i, 5) = m0;
        dhr(i, 2) = m0;
    else
        dh(i, 5) = dh(i-1, 5)-dh(i-1, 4);
        dhr(i, 2) = dhr(i-1, 2)-dhr(i-1, 1);
    end
end
end
```

```

%% DRIYING CURVE ABS. HUMIDITY vs DRYING RATE

pbm = mean(pb);
dpm = mean(dp);

ng = round(m0*10*1000/pbm);
ag = pi*power(dpm/1000,2)/4;
ad = ng*ag;

[rdh, cdh] = size(dh);

% Absolute humidity of solid
for i=1:rdh
    if i==1
        dh(i, 6) = m0*(h0_e/100)/ms;
        dhr(i, 3) = m0*(h0_e/100)/ms;
    else
        dh(i, 6) = dh(1, 6)-((dh(1, 5)-dh(i, 5))/ms);
        dhr(i, 3) = dhr(1, 3)-((dhr(1, 2)-dhr(i, 2))/ms);
    end
end

% Drying curve
for i=2:rdh
    dc(i, 1) = (dh(i, 6)+ dh(i-1, 6))/2;
    dc(i, 2) = (-ad/ms)*((dh(i, 6)-dh(i-1, 6))/(dh(i, 1)-dh(i-1, 1)));

    dc(i, 3) = (dhr(i, 3)+ dhr(i-1, 3))/2;
    dc(i, 4) = (-ad/ms)*((dhr(i, 3)-dhr(i-1, 3))/(dh(i, 1)-dh(i-1, 1)));
end

%% PLOT DATA

subplot(5,1,1);
xlabel('time [s]');
title('Experimental data', 'FontSize', 10);
hold on;
yyaxis left;
plot(m(:, 1), m(:, 4));
ylabel('Rel. hum. [%]');

yyaxis right;
plot(m(:, 1), m(:, 2));
ylabel('Temp. [°C]');
set(findall(gcf, '-property', 'FontSize'), 'FontSize', 9);

subplot(5,1,2);
plot(dh(:, 1), dh(:, 2), 'o', 'MarkerSize', 2);
hold on;
plot(dh(:, 1), dh(:, 3), 'LineWidth', 2, 'Color', 'red')
hold off;
title('Drying process - Moisture data', 'FontSize', 10);
xlabel('time [s]');
ylabel('Rel. hum. [%]');
xlim([tlim inf]);
ylim([0 inf]);
legend('Exp.', 'Ajust. ');
set(findall(gcf, '-property', 'FontSize'), 'FontSize', 9);

subplot(5,1,3);
plot(dh(:, 1), dhr(:, 1), 'o', 'MarkerSize', 2);
hold on;
plot(dh(:, 1), dh(:, 4), 'LineWidth', 2, 'Color', 'red');

```

```

hold off;
title('Extraction of water from the solid', 'FontSize', 10);
xlabel('time [s]');
ylabel('water ext. [kg/s]');
xlim([tlim inf]);
ylim([0 inf]);
legend('Exp.', 'Ajust.');
```

```

set(findall(gcf, '-property', 'FontSize'), 'FontSize', 9);

subplot(5,1,4);
plot(dh(:, 1), dhr(:, 2), 'o', 'MarkerSize', 2);
hold on;
plot(dh(:, 1), dh(:, 5), 'LineWidth', 2, 'Color', 'red');
hold off;
title('Lost mass curve from solid.', 'FontSize', 10);
xlabel('time [s]');
ylabel('Solid mass [kg]');
legend('Exp.', 'Ajust.')
```

```

set(findall(gcf, '-property', 'FontSize'), 'FontSize', 8);

subplot(5,1,5);
plot(dc(2:end, 3), dc(2:end, 4), 'o', 'MarkerSize', 2);
hold on;
plot(dc(2:end, 1), dc(2:end, 2), 'LineWidth', 2, 'Color', 'red');
hold off;
xlim([0 inf]);
ylim([0 inf]);
title('Drying rate curve.', 'FontSize', 12);
xlabel('Abs. hum. [Kg H2O/kg ds]');
ylabel('Rate drying [kg H2O/m2 s]');
```

```

set(findall(gcf, '-property', 'FontSize'), 'FontSize', 9);

```

ANEXO K. Tablas de datos experimentales de análisis de secado por método de estufa.

Pesos tomados en experimentación con los materiales seleccionados.

t (h)	Arveja (kg)			Maíz (kg)			Trigo (kg)		
	m1	m2	m3	m1	m2	m3	m1	m2	m3
0,00	0,04056	0,04002	0,04014	0,04065	0,04063	0,04063	0,04015	0,04031	0,04028
0,50	0,03848	0,03755	0,03835	0,03623	0,03553	0,03557	0,03714	0,03695	0,03745
1,00	0,03509	0,03509	0,03567	0,03230	0,03176	0,03197	0,03396	0,03374	0,03492
1,50	0,03341	0,03239	0,03350	0,02853	0,02843	0,02856	0,03097	0,03076	0,03245
2,00	0,03039	0,03020	0,03083	0,02544	0,02514	0,02537	0,02815	0,02804	0,02991
2,50	0,02866	0,02826	0,02888	0,02259	0,02298	0,02300	0,02583	0,02512	0,02760
3,00	0,02661	0,02589	0,02682	0,02058	0,02107	0,02088	0,02294	0,02283	0,02550
3,50	0,02460	0,02380	0,02466	0,01904	0,01968	0,01961	0,02081	0,02069	0,02348
4,00	0,02273	0,02201	0,02272	0,01808	0,01883	0,01872	0,01867	0,01838	0,02141
4,50	0,02137	0,01931	0,02061	0,01768	0,01834	0,01822	0,01647	0,01637	0,01937
5,00	0,01907	0,01799	0,01925	0,01740	0,01808	0,01798	0,01484	0,01481	0,01749
5,50	0,01752	0,01652	0,01781	0,01723	0,01788	0,01782	0,01337	0,01362	0,01582
6,00	0,01637	0,01497	0,01625	0,01711	0,01775	0,01771	0,01239	0,01287	0,01464
6,50	0,01498	0,01379	0,01497	0,01704	0,01766	0,01764	0,01199	0,01224	0,01360
7,00	0,01383	0,01275	0,01388	0,01698	0,01760	0,01758	0,01174	0,01200	0,01293
7,50	0,01280	0,01197	0,01306	0,01694	0,01755	0,01753	0,01161	0,01185	0,01237
8,00	0,01203	0,01144	0,01245	0,01691	0,01752	0,01750	0,01153	0,01175	0,01201
8,50	0,01144	0,01112	0,01200	0,01688	0,01749	0,01747	0,01147	0,01169	0,01185
9,00	0,01107	0,01093	0,01171	0,01686	0,01746	0,01744	0,01143	0,01165	0,01175
9,50	0,01084	0,01080	0,01153	0,01684	0,01739	0,01737	0,01140	0,01162	0,01169
10,00	0,01069	0,01071	0,01142	0,01677	0,01737	0,01735	0,01137	0,01159	0,01164
10,50	0,01060	0,01066	0,01135	0,01675	0,01736	0,01734	0,01135	0,01157	0,01161
11,00	0,01055	0,01057	0,01126	0,01674	0,01734	0,01732	0,01133	0,01155	0,01158
11,50	0,01047	0,01053	0,01122	0,01673	0,01733	0,01731	0,01131	0,01153	0,01156
12,00	0,01044	0,01051	0,01119	0,01672	0,01732	0,01730	0,01130	0,01152	0,01154
12,50	0,01041	0,01049	0,01117	0,01671	0,01731	0,01729	0,01128	0,01150	0,01152
13,00	0,01040	0,01048	0,01116	0,01670	0,01730	0,01728	0,01127	0,01149	0,01150
13,50	0,01038	0,01046	0,01114	0,01670	0,01729	0,01727	0,01126	0,01148	0,01149
14,00	0,01037	0,01045	0,01113				0,01125	0,01147	0,01147
14,50	0,01036	0,01044	0,01112				0,01124	0,01146	0,01146
15,00	0,01035	0,01044	0,01112				0,01123	0,01145	0,01145
15,50	0,01035	0,01043	0,01111				0,01122	0,01144	0,01145
16,00	0,01034	0,01042	0,01110				0,01121	0,01144	0,01144
16,50	0,01033	0,01042	0,01110				0,01121	0,01143	0,01143
17,00	0,01033	0,01041	0,01109				0,01120	0,01142	0,01142
17,50	0,01033	0,01041	0,01109				0,01119	0,01141	0,01141
18,00	0,01032	0,01040	0,01108						
18,50	0,01032	0,01040	0,01108						
19,00	0,01031	0,01039	0,01107						
19,50	0,01031	0,01039	0,01107						

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2018.

Datos obtenidos para determinación de velocidad de secado vs humedad., muestras de arveja.
(kg H₂O/kg ss), W (kg/ m² s) y 1/W (m² s/ kg).

i	m1			m2			m3		
	X _{med}	W	1/W	X _{med}	W	1/W	X _{med}	W	1/W
1	2,8465	0,6127	1,6321	2,7751	0,7272	1,3751	2,8196	0,5279	1,8943
2	2,5802	0,9984	1,0016	2,5351	0,7249	1,3796	2,6018	0,7899	1,2659
3	2,3334	0,4949	2,0205	2,2839	0,7949	1,2580	2,3659	0,6371	1,5695
4	2,1047	0,8886	1,1254	2,0459	0,6448	1,5509	2,1307	0,7864	1,2716
5	1,8737	0,5091	1,9644	1,8447	0,5729	1,7454	1,9056	0,5750	1,7391
6	1,6899	0,6033	1,6576	1,6346	0,6978	1,4331	1,7104	0,6062	1,6496
7	1,4920	0,5938	1,6839	1,4176	0,6153	1,6251	1,5052	0,6357	1,5732
8	1,3028	0,5512	1,8144	1,2289	0,5267	1,8985	1,3055	0,5721	1,7481
9	1,1455	0,4004	2,4974	1,0106	0,7938	1,2598	1,1085	0,6201	1,6128
10	0,9678	0,6745	1,4825	0,8151	0,3889	2,5712	0,9398	0,4010	2,4938
11	0,7806	0,4584	2,1814	0,6795	0,4319	2,3153	0,8036	0,4228	2,3653
12	0,6489	0,3386	2,9535	0,5323	0,4587	2,1800	0,6577	0,4602	2,1731
13	0,5256	0,4072	2,4559	0,3993	0,3457	2,8931	0,5192	0,3777	2,6473
14	0,4019	0,3412	2,9305	0,2915	0,3065	3,2627	0,4038	0,3200	3,1247
15	0,2956	0,3021	3,3104	0,2029	0,2299	4,3489	0,3109	0,2423	4,1270
16	0,2084	0,2252	4,4399	0,1392	0,1552	6,4450	0,2414	0,1784	5,6048
17	0,1424	0,1740	5,7470	0,0979	0,0948	10,5481	0,1899	0,1331	7,5144
18	0,0953	0,1113	8,9855	0,0727	0,0574	17,4179	0,1535	0,0869	11,5136
19	0,0660	0,0657	15,2309	0,0570	0,0380	26,3295	0,1307	0,0512	19,5201
20	0,0480	0,0436	22,9493	0,0465	0,0253	39,4942	0,1170	0,0318	31,4491
21	0,0364	0,0265	37,7389	0,0397	0,0159	62,8981	0,1084	0,0203	49,2246
22	0,0294	0,0156	64,0849	0,0327	0,0268	37,3242	0,1002	0,0291	34,3081
23	0,0227	0,0253	39,4942	0,0266	0,0100	99,8971	0,0937	0,0103	97,0429
24	0,0170	0,0088	113,2167	0,0238	0,0065	154,3864	0,0907	0,0077	130,6346
25	0,0146	0,0062	161,7381	0,0219	0,0050	199,7941	0,0884	0,0062	161,7381
26	0,0127	0,0053	188,6944	0,0203	0,0050	199,7941	0,0867	0,0044	226,4333
27	0,0112	0,0035	283,0417	0,0189	0,0035	283,0417	0,0853	0,0041	242,6071
28	0,0100	0,0035	283,0417	0,0178	0,0029	339,6500	0,0840	0,0032	308,7727
29	0,0090	0,0029	339,6500	0,0168	0,0032	308,7727	0,0830	0,0032	308,7727
30	0,0080	0,0027	377,3889	0,0159	0,0021	485,2143	0,0821	0,0021	485,2143
31	0,0073	0,0021	485,2143	0,0152	0,0024	424,5625	0,0813	0,0027	377,3889
32	0,0066	0,0021	485,2143	0,0145	0,0018	566,0833	0,0806	0,0018	566,0833
33	0,0060	0,0015	679,3000	0,0140	0,0015	679,3000	0,0800	0,0015	679,3000
34	0,0055	0,0012	849,1250	0,0135	0,0015	679,3000	0,0796	0,0015	679,3000
35	0,0051	0,0015	679,3000	0,0130	0,0015	679,3000	0,0791	0,0015	679,3000
36	0,0047	0,0012	849,1250	0,0125	0,0015	679,3000	0,0786	0,0015	679,3000
37	0,0043	0,0009	1132,1667	0,0121	0,0012	849,1250	0,0781	0,0015	679,3000
38	0,0040	0,0012	849,1250	0,0117	0,0012	849,1250	0,0777	0,0009	1132,1667
39	0,0036	0,0012	849,1250	0,0114	0,0006	1698,2500	0,0775	0,0006	1698,2500

Realizado por: Inca A.& Oñate K., 2018

Datos obtenidos para determinación de velocidad de secado vs humedad., muestras de maíz. X (kg H₂O/kg ss), W (kg/ m² s) y 1/W (m² s/ kg).

i	m1			m2			m3		
	X _{med}	W	1/W	X _{med}	W	1/W	X _{med}	W	1/W
1	1,3050	1,1262	0,8879	1,2832	1,2984	0,7702	1,2845	1,2874	0,7768
2	1,0545	1,0011	0,9989	1,0173	0,9601	1,0415	1,0249	0,9176	1,0898
3	0,8238	0,9594	1,0423	0,8044	0,8483	1,1788	0,8145	0,8697	1,1498
4	0,6181	0,7880	1,2691	0,6060	0,8371	1,1946	0,6166	0,8114	1,2324
5	0,4400	0,7248	1,3797	0,4428	0,5496	1,8195	0,4501	0,6031	1,6582
6	0,2944	0,5117	1,9545	0,3208	0,4869	2,0536	0,3155	0,5404	1,8504
7	0,1879	0,3935	2,5414	0,2217	0,3550	2,8167	0,2137	0,3245	3,0820
8	0,1127	0,2453	4,0774	0,1544	0,2162	4,6249	0,1488	0,2264	4,4168
9	0,0718	0,1021	9,7918	0,1144	0,1238	8,0792	0,1074	0,1261	7,9323
10	0,0514	0,0708	14,1241	0,0919	0,0677	14,7613	0,0852	0,0621	16,0922
11	0,0381	0,0423	23,6536	0,0779	0,0504	19,8308	0,0732	0,0402	24,8513
12	0,0297	0,0298	33,5598	0,0681	0,0334	29,9733	0,0652	0,0275	36,3565
13	0,0238	0,0196	50,9935	0,0616	0,0219	45,6570	0,0597	0,0191	52,3533
14	0,0199	0,0135	74,0849	0,0572	0,0155	64,3689	0,0558	0,0143	70,1161
15	0,0170	0,0112	89,2386	0,0539	0,0122	81,8021	0,0526	0,0122	81,8021
16	0,0147	0,0084	118,9848	0,0514	0,0087	115,4853	0,0501	0,0092	109,0694
17	0,0130	0,0066	151,0192	0,0496	0,0069	145,4259	0,0482	0,0074	135,3966
18	0,0115	0,0059	170,7174	0,0480	0,0071	140,2321	0,0466	0,0064	157,0600
19	0,0102	0,0051	196,3250	0,0449	0,0186	53,7877	0,0435	0,0194	51,6645
20	0,0075	0,0178	56,0929	0,0422	0,0046	218,1389	0,0408	0,0036	280,4643
21	0,0050	0,0036	280,4643	0,0412	0,0038	261,7667	0,0399	0,0043	230,9706
22	0,0042	0,0031	327,2083	0,0403	0,0038	261,7667	0,0390	0,0036	280,4643
23	0,0035	0,0028	356,9545	0,0394	0,0043	230,9706	0,0383	0,0025	392,6500
24	0,0030	0,0018	560,9286	0,0385	0,0028	356,9545	0,0376	0,0028	356,9545
25	0,0025	0,0025	392,6500	0,0379	0,0025	392,6500	0,0370	0,0025	392,6500
26	0,0019	0,0025	392,6500	0,0373	0,0023	436,2778	0,0365	0,0020	490,8125
27	0,0013	0,0018	560,9286	0,0368	0,0020	490,8125	0,0359	0,0025	392,6500

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2018

Datos obtenidos para determinación de velocidad de secado vs humedad., muestras de trigo. x (kg H₂O/kg ss), W (kg/ m² s) y 1/W (m² s/ kg).

i	m1			m2			m3		
	X _{med}	W	1/W	X _{med}	W	1/W	X _{med}	W	1/W
1	2,5099	0,7834	1,2765	2,5085	0,8710	1,1481	2,5303	0,7351	1,3604
2	2,2289	0,8247	1,2125	2,2102	0,8362	1,1959	2,2868	0,6582	1,5193
3	1,9489	0,7774	1,2863	1,9291	0,7722	1,2949	2,0593	0,6434	1,5543
4	1,6847	0,7338	1,3628	1,6703	0,7081	1,4123	1,8318	0,6584	1,5187
5	1,4514	0,6013	1,6631	1,4140	0,7587	1,3180	1,6119	0,5995	1,6682
6	1,2147	0,7530	1,3280	1,1775	0,5943	1,6828	1,4114	0,5477	1,8257
7	0,9867	0,5514	1,8136	0,9763	0,5568	1,7958	1,2243	0,5228	1,9128
8	0,7931	0,5568	1,7958	0,7742	0,5997	1,6675	1,0390	0,5379	1,8592
9	0,5960	0,5709	1,7517	0,5780	0,5231	1,9118	0,8520	0,5316	1,8810
10	0,4220	0,4246	2,3553	0,4160	0,4038	2,4765	0,6737	0,4888	2,0460
11	0,2809	0,3827	2,6127	0,2914	0,3092	3,2340	0,5126	0,4329	2,3100
12	0,1695	0,2546	3,9270	0,2031	0,1957	5,1109	0,3832	0,3077	3,2504
13	0,1068	0,1042	9,5973	0,1403	0,1640	6,0990	0,2825	0,2687	3,7220
14	0,0772	0,0650	15,3940	0,1008	0,0621	16,1025	0,2048	0,1757	5,6930
15	0,0600	0,0335	29,8333	0,0830	0,0398	25,1536	0,1490	0,1437	6,9593
16	0,0505	0,0210	47,5123	0,0718	0,0242	41,3817	0,1072	0,0956	10,4579
17	0,0443	0,0140	71,2685	0,0649	0,0156	64,1417	0,0832	0,0413	24,2044
18	0,0399	0,0114	87,4659	0,0603	0,0107	93,8659	0,0717	0,0249	40,0885
19	0,0366	0,0073	137,4464	0,0567	0,0096	104,0135	0,0643	0,0172	58,3106
20	0,0342	0,0068	148,0192	0,0540	0,0062	160,3542	0,0593	0,0114	87,4659
21	0,0319	0,0060	167,3261	0,0518	0,0062	160,3542	0,0558	0,0088	113,1912
22	0,0299	0,0055	183,2619	0,0498	0,0052	192,4250	0,0529	0,0078	128,2833
23	0,0282	0,0044	226,3824	0,0480	0,0047	213,8056	0,0505	0,0057	174,9318
24	0,0267	0,0039	256,5667	0,0466	0,0036	274,8929	0,0486	0,0052	192,4250
25	0,0254	0,0039	256,5667	0,0453	0,0039	256,5667	0,0468	0,0049	202,5526
26	0,0242	0,0031	320,7083	0,0440	0,0034	296,0385	0,0451	0,0047	213,8056
27	0,0231	0,0029	349,8636	0,0429	0,0029	349,8636	0,0438	0,0031	320,7083
28	0,0222	0,0026	384,8500	0,0419	0,0031	320,7083	0,0426	0,0036	274,8929
29	0,0213	0,0026	384,8500	0,0410	0,0021	481,0625	0,0415	0,0029	349,8636
30	0,0203	0,0026	384,8500	0,0403	0,0016	641,4167	0,0405	0,0026	384,8500
31	0,0195	0,0023	427,6111	0,0397	0,0018	549,7857	0,0399	0,0010	962,1250
32	0,0188	0,0016	641,4167	0,0391	0,0021	481,0625	0,0391	0,0031	320,7083
33	0,0182	0,0018	549,7857	0,0382	0,0026	384,8500	0,0381	0,0026	384,8500
34	0,0176	0,0018	549,7857	0,0374	0,0021	481,0625	0,0373	0,0023	427,6111
35	0,0170	0,0016	641,4167	0,0367	0,0021	481,0625	0,0366	0,0018	549,7857

Realizado por: Inca A. & Oñate K., 2018

ANEXO L. Informe de Practica de Laboratorio.

INFORME N° SECADO DE MATERIAL GRANULAR EN SECADOR ROTATORIO

Objetivos:

General:

Secar el material y obtener los datos de cinética de secado.

Específicos:

Marco Teórico Referencial:

Marco Teórico:

Marco Referencial:

Parte Experimental:

Sustancias y Reactivos:

- Material granular (arveja, maíz, pasas, etc.) con diámetro mayor a 5mm
- Materiales y Equipos:
- Secador rotatorio
- Balanza de humedad
- Desecador de vidrio
- Pala recogedora plástica
- Tamiz con malla de 5mm
- Hoja de control de propiedades del secado.
- Espátula

Procedimiento:

1. **Recepción de la materia prima:** La materia prima debe ser granular. Por ejemplo, granos como: arveja, maíz, frejol o partículas que tengan un diámetro mayor a 5 mm.
2. **Selección:** Para garantizar la granulometría adecuada, se debe tamizar el material con una malla de 5 mm de tamaño.
3. **Determinación de propiedades:** Antes de empezar a secar se debe tomar una muestra del material y determinar el diámetro de partícula, el peso aparente por 100 partículas, la humedad en base húmeda o seca.
4. **Pre calentamiento del secador:** Para no demorar el proceso de secado, se debe precalentar el equipo hasta la temperatura del set point deseado para el secado. (recomendado 60°C), esto suele durar de 10 a 15 min.

5. **Configuración de secado:** En el panel de control se encuentran los controles que permiten configurar el tiempo de secado y la temperatura de set point. Una vez configurada para el secado deseado se presiona el pulsador de arranque de proceso (pulsador cuadrado verde).
6. **Alimentar material:** Una vez alcanzada la temperatura de set point, se debe cargar el material mediante la tolva de la puerta del equipo. Antes se debe pesar la totalidad de la masa a secar, se puede usar una balanza técnica. La cantidad de material recomendada para trabajar está en el rango de 5 a 15 kg.
7. **Muestreo:** Con el objeto de registrar el cambio en la humedad se requiere muestrear el material, para luego ser secado en una balanza de humedad. Se debe registrar los parámetros indicados en el procedimiento de laboratorio.
8. **Procesamiento de datos:** Para realizar los cálculos de la curva de secado se debe usar la hoja de cálculo preparada. Esta hoja de cálculo permite determinar la curva de secado y el balance de masa y energía del secador.
9. **Terminado del secado:** El proceso de secado termina de forma automática una vez cumplido el tiempo de secado configurado. De requerir terminar de forma anticipada el secado se debe presionar el pulsador de parada o STOP. La pantalla del panel de control volverá a la etapa de configuración de secado.
10. **Limpieza del equipo:** Se debe retirar el material secado con la ayuda de un recogedor, o con las manos teniendo en cuenta que el material se encuentra caliente (se recomienda dejar enfriar). Para quitar las manchas o restos de fluidos debe usar una toalla o franela húmeda o seca. No se recomienda limpiar con agua.
11. **Desmontaje de la cámara de ductos:** La cámara de ductos está cubierta por una plancha de acero sujeta con tornillos con cabeza hexagonal. Para limpiar esta zona se recomienda desmontar el panel con cuidado. Esto se debe hacer en frío.
12. **Recomendaciones de materiales y configuración de secado:** Véase la tabla del manual de procedimiento del equipo.

Datos

Datos Experimentales:

Tabla 4.1-1

Datos experimentales del proceso de secado

h_0	m_0	m_f	v	h_{e0}	h_{ef}

FUENTE: APELLIDO, Nombre, FC-L.-PI-. ESPOCH, 2019

Dónde:

H_0 = Humedad del aire a la temperatura de setpoint [%]

m_0 = Masa inicial a secar [kg]

m_f = Masa final del material a secar [kg]

v = velocidad de aire de secado (m/s)

h_{e0} = Humedad absoluta inicial del material a secar. [%]

h_{ef} = Humedad absoluta final del material a secar. [%]

Tabla 4.1-2

Datos experimentales adicionales

d_m	p_a	T_s

FUENTE: APELLIDO, Nombre, FC-L.-PI-. ESPOCH, 2019

Dónde:

d_m = diámetro medio de partículas (mm)

p_a = Peso aparente por cada 100 partículas (g/100 p)

t_s = tiempo de secado (h)

Cálculos y Resultados:

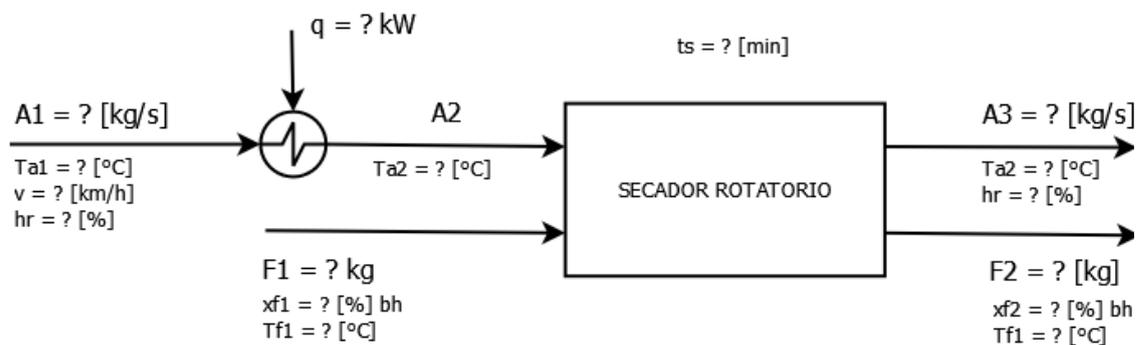
Cálculos Específicos:

Calculo de la superficie de secado.

$$s_s = \frac{100\pi F_1 d_m^2}{p_a} (m^2) \quad \text{Ec.1}$$

Balance de Masa y Energía:

PROCESO DE SECADO BATCH



Dónde:

A1 = Flujo de aire a condiciones ambientales (kg/s)

A2 = Aire calentado (kg/s)

A3 = Aire de salida de proceso de secado (kg/h)

F1 = Material granular húmedo (kg)

F2 = Material granular seco (kg)

ts = Tiempo de secado

Ta1, Ta2, Ta3 = Temperaturas del flujo de aire (°C)

Tf1, Tf2 = Temperaturas del material granular.

Balance de Masa:

General:

$$A2 + F1 = A3 + F2$$

$$A3 = A2 + F1 - F2$$

Balance para componente agua:

$$A2x_{a2} + F1x_{f1} = A3x_{a3} + F2x_{f2}$$

$$x_{a3} = \frac{(A2x_{a2} + F1x_{f1}) - F2x_{f2}}{A3}$$

Balance de energía.

Calentador:

$$Q_A = M_A C_p \Delta T = kJ$$

$$\dot{Q} = kW$$

Secador

Datos

$$A_2(C_{paire})(T_{A2}) + F_1(C_{pmateria})(T_{F1}) = A_3(C_{paire})(T_{A3}) + F_2(C_{pmateri})(T_{F2})$$

$$T_{A3} = \frac{A_2(C_{paire})(T_{A2}) + F_1(C_{p materia})(T_{F1}) - F_2(C_{p materia})(T_{F2})}{A_3(C_{paire})}$$

$$T_{A3} = \frac{A_2}{A_3}T_{A2} + \frac{C_{paire}(F_1T_{F1} - F_2T_{F2})}{A_3(C_{paire})}$$

Tabla 5.3-1

Resultados obtenidos de la activación del carbón

A1 (kg/s)	A3(kg)	X_A1	X_A3	q (kW)	Ta3(°C)

FUENTE: APELLIDO, Nombre, FC-L.-PI-. ESPOCH, 2019

Errores

Sistemáticos:

Aleatorios:

Discusión

Conclusiones y Recomendaciones

Aplicaciones:

Referencias Bibliográficas:

Citas:

Bibliografía

Internet:

Cuestionario

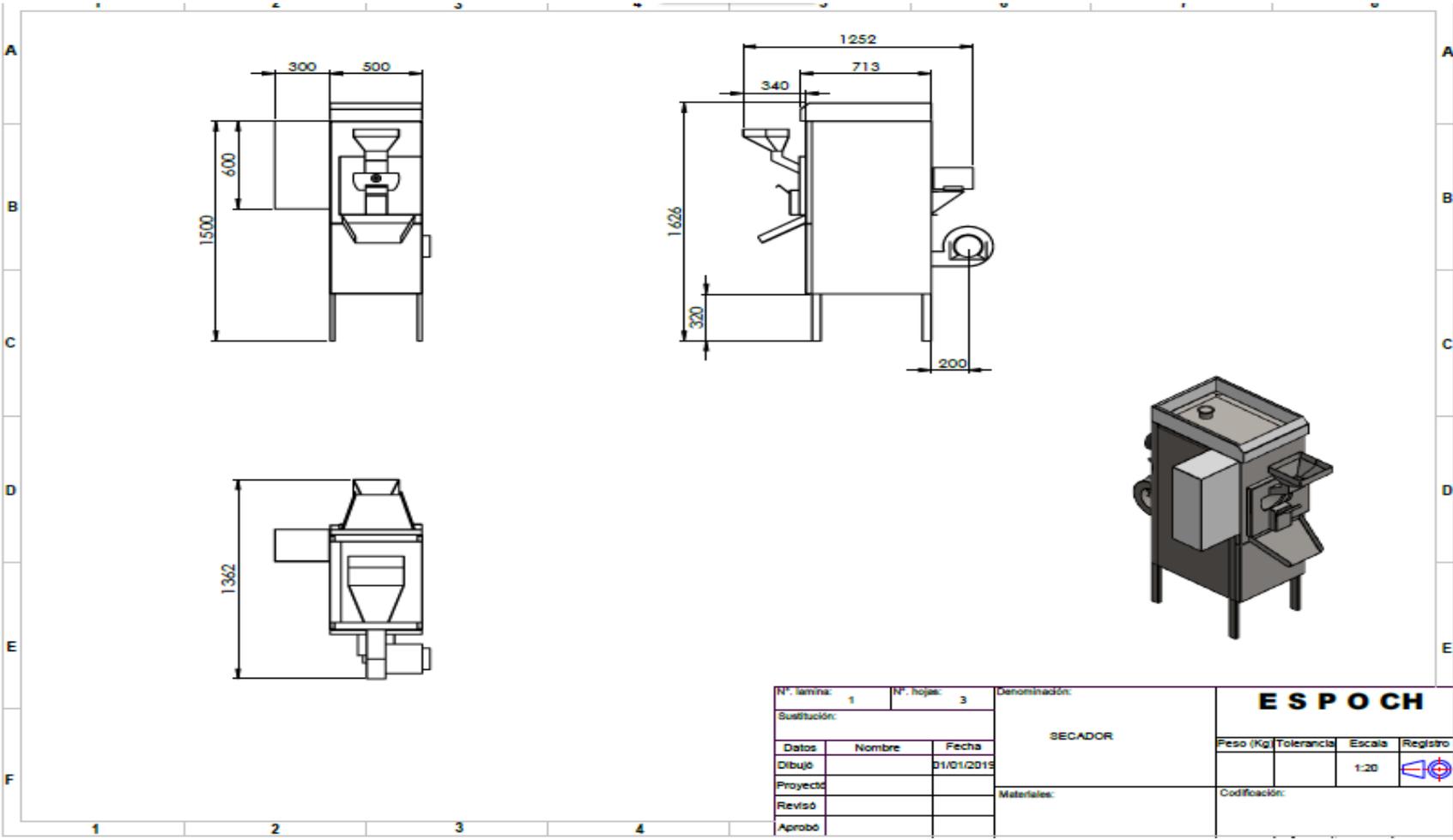
1. ¿Cuál es la diferencia entre humedad en base húmeda y base seca?
2. ¿Qué es la humedad crítica y humedad de equilibrio?
3. ¿De qué factores depende la velocidad de secado?
4. En el balance de energía es necesario tomar en cuenta la pérdida de calor por las paredes del secador, como se expresaría matemáticamente en el balance de energía (escriba la ecuación de balance de energía con este término).

Anexos

RESUMEN.

DESCRIPTORES

ANEXO M. Plano del Equipo.



N°. lamina: 1		N°. hojas: 3		Denominación:			
Sustitución:				SECADOR			
Dato		Nombre					
Dibujo				01/01/2019		ESPOCH Peso (Kg) Tolerancia Escala Registro 1:20	
Proyectó						Codificación:	
Revisó							
Aprobó							
Materiales:							