



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL
Sede Santo Domingo

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL Y SISTEMAS DE GESTIÓN

Tesis de grado previo a la obtención del título de:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL, MENCIÓN EN ALIMENTOS

**IMPLEMENTACIÓN DE SIMULADOR PARA SECADOR DE BANDEJAS
DIDÁCTICO USANDO VARIABLES MEDIBLES Y ECUACIONES PARA
CALCULAR LA CANTIDAD DE CALOR TOTAL Y LAS CURVAS DE SECADO.**

Estudiante:

VÍCTOR SANTIAGO RIVADENEIRA ROMÁN

Director de Tesis

Ing. Alejandro Bermúdez

Santo Domingo – Ecuador

NOVIEMBRE, 2014

**IMPLEMENTACIÓN DE SIMULADOR PARA SECADOR DE BANDEJAS
DIDÁCTICO USANDO VARIABLES MEDIBLES Y ECUACIONES PARA
CALCULAR LA CANTIDAD DE CALOR TOTAL Y LAS CURVAS DE SECADO**

Ing. Alejandro Bermúdez

DIRECTOR DE TESIS

APROBADO

Ing. Daniel Anzules

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Juan Crespín

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Elsa Burbano

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Santo Domingo.....de.....2014.

Autor: VÍCTOR SANTIAGO RIVADENEIRA ROMÁN
Institución: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL.
Título de Tesis: IMPLEMENTACIÓN DE SIMULADOR PARA SECADOR DE BANDEJAS DIDÁCTICO USANDO VARIABLES MEDIBLES Y ECUACIONES PARA CALCULAR LA CANTIDAD DE CALOR TOTAL Y LAS CURVAS DE SECADO
Fecha : NOVIEMBRE, 2014

El contenido del presente trabajo, está bajo la responsabilidad del autor.

Víctor Santiago Rivadeneira Román
172433252-1

UNIVERSIDAD TECNOLÒGICA EQUINOCCIAL
Sede Santo Domingo

INFORME DEL DIRECTOR DE TESIS

Santo Domingo de del 2014.

Ing. Daniel Anzules

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL Y
SISTEMAS DE GESTIÓN**

Estimado Ingeniero

Mediante la presente tengo a bien informar que el trabajo investigativo realizado por el señor: **VÍCTOR SANTIAGO RIVADENEIRA ROMÁN**, cuyo tema es: **“IMPLEMENTACIÓN DE SIMULADOR PARA SECADOR DE BANDEJAS DIDÁCTICO USANDO VARIABLES MEDIBLES Y ECUACIONES PARA CALCULAR LA CANTIDAD DE CALOR TOTAL Y LAS CURVAS DE SECADO”**, ha sido elaborado bajo mi supervisión y revisado en todas sus partes, por lo cual autorizo su respectiva presentación.

Particular que informo para fines pertinentes

Atentamente.

Ing. Alejandro Bermúdez.
DIRECTOR DE TESIS.

Dedicatoria

A Jehová, el Gran Ingeniero y Matemático por Excelencia

A mis padres, por su constante guía y apoyo

Agradecimiento

A la Universidad Tecnológica Equinoccial

Al Ing. Alejandro Bermúdez.

Al Ing. Juan Crespín.

A la Ing. Elsa Burbano

Al Ing. Daniel Anzules.

INDICE DE CONTENIDO

TEMA	PÁG.
Portada.....	i
Sustentación y Aprobación de los Integrantes del Tribunal.....	ii
Responsabilidad del Autor....	iii
Informe del Director de Tesis..	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice	vii
Resumen Ejecutivo	xv
Executive Summary.....	xvi

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Justificación.....	2
1.3.	Alcance de la investigación.....	3
1.4.	Objetivos de la Investigación.....	3
1.4.1.	Objetivo General.....	3
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	4
1.5.	Idea a defender.....	4

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	Antecedentes.....	5
2.2.	Fundamentos Teóricos.....	6
2.2.1.	Secadores o deshidratadores....	6
2.2.1.1.	Deshidratador de bandejas.....	6
2.2.1.2.	Operación unitaria de deshidratación.....	7
2.2.2.	Períodos de Secado.....	8
2.2.2.1.	Período de Secado a Velocidad Constante.....	8
2.2.2.2.	Período de Secado a Velocidad Decreciente	9
2.2.3.	Fenómenos que gobiernan las etapas de secado	9
2.2.3.1.	Teoría de Movimiento Capilar... ..	10
2.2.3.2.	Teoría de Difusión.....	11
2.2.4.	Curvas de Velocidad de Secado.....	12
2.2.5.	Ecuaciones de predicción de tiempos de secado.....	13
2.2.5.1.	Período de Secado a Velocidad Constante	13
2.2.5.2.	Ecuación de Secado a Velocidad Constante.....	17
2.2.5.3.	Conductividad térmica de un alimento.....	18
2.2.5.4.	Período de Secado a Velocidad Decreciente.....	18
2.2.6.	Ecuaciones para cantidad de calor total.....	20
2.2.7.	<i>Matrix Laboratory</i>	22
2.2.7.1	Archivos .m*.....	22
2.2.7.2	Simulación.....	22
2.2.8.	Equipos Directos de Medición.....	23
2.2.8.1.	Higrómetro.....	23
2.2.8.2.	Anemómetro.....	24
2.2.8.3.	Medidor de Temperatura.....	25
2.2.8.4.	Balanza Electrónica.....	25

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Sitio de Estudio.....	27
3.1.1.	Sitio de Estudio.....	27
3.1.1.1.	Localización Geográfica.....	27
3.1.1.2.	Ubicación en el tiempo.....	27
3.1.2.	Materiales, instrumentos y recursos.....	27
3.1.2.1.	Materiales.....	27
3.1.2.2.	Instrumentos, equipos.....	27
3.1.2.3.	Recursos.....	28
3.1.3.	Manejo del experimento.....	28
3.2.	Procedimiento para manejo de ensayos.....	29

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Examinación y puesta en marcha del Secador de Bandejas	
	Didáctico.....	31
4.1.1.	Ensayo 1.....	31
4.2.	Desarrollo del Simulador.....	32
4.2.1.	Ensayo 2.....	32
4.2.1.1.	Análisis de Datos.....	34
4.2.1.2.	Cálculo de Velocidad de secado teórica constante.....	36
4.2.1.3.	Cálculo del tiempo de secado.....	37
4.2.1.4.	Cantidad de Calor Total.....	37
4.2.1.5.	Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador.	39
4.2.1.6.	Análisis de resultados.....	44
4.2.2.	Ensayo 3.....	45

4.2.2.1.	Análisis de datos.....	47
4.2.2.2.	Cálculo de velocidad promedio de secado....	47
4.3.2.3.	Cálculo de Tiempo de Secado.....	48
4.2.2.4.	Cantidad de Calor Total.	50
4.2.2.5.	Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador.	50
4.2.2.6.	Análisis de resultados.....	54
4.2.3.	Ensayo 4.....	55
4.2.3.1.	Análisis de datos.....	57
4.2.3.2.	Cálculo de velocidad constante de secado.....	57
4.2.3.3.	Cálculo del tiempo de secado.....	58
4.2.3.4.	Cantidad de Calor Total.....	59
4.2.3.5.	Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador.	59
4.2.3.6.	Análisis de Resultados.....	63
4.3.	Pruebas finales del secador didáctico y comparaciones con simulador con distintos tipos de granos.....	65
4.3.1.	Ensayo 5.....	65
4.3.1.1.	Análisis de datos.....	68
4.3.1.2.	Estimación del coeficiente global de transferencia de calor por conducción y convección.....	68
4.3.1.3.	Cálculo de velocidad promedio teórica de secado.....	75
4.3.1.4.	Aplicación de ecuaciones de predicción del tiempo de secado.....	78
4.3.1.5.	Aplicación de ecuaciones para cálculo de la cantidad de calor total práctico.....	78
4.3.1.6.	Estimación de la cantidad de calor requerida teóricamente.....	91
4.3.1.7.	Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador.	93
4.3.1.8.	Análisis resultados.....	97
4.3.2.	Ensayo 6.....	98
4.3.2.1.	Análisis de datos.....	101
4.3.2.2.	Estimación del coeficiente global de transferencia de calor por conducción y convección.....	102
4.3.2.3.	Cálculos de velocidad, tiempo de secado y cantidades real y teórica de calor total.....	102
4.3.2.4.	Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador. ..	103

4.3.2.5.	Análisis de resultados.....	107
4.4.	Interpretación de resultados.....	108
4.5.	Análisis económico.....	113

CAPÍTULO V

MANUAL DE OPERACIÓN

5.1.	Para los datos de campo.....	115
5.2.	El simulador.....	117

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.	Conclusiones.....	119
6.2.	Recomendaciones.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....		121
ANEXOS.....		125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Secador de Bandejas.....	6
Figura 2.	Velocidad decreciente de secado controlado por capilaridad	11
Figura 3.	Velocidad decreciente de secado controlado por difusión.....	11
Figura 4.	Higrómetro.....	23
Figura 5.	Anemómetro.....	24
Figura 6.	Medidor de temperatura.....	25
Figura 7.	Balanza electrónica.....	26
Figura 8.	Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 2.....	32

Figura 9.	Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 2.....	33
Figura 10.	Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 2.....	33
Figura 11.	Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 2.....	41
Figura 12.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 2.....	42
Figura 13.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 2.....	43
Figura 14.	Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 3.....	45
Figura 15.	Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 3.....	46
Figura 16.	Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 3.....	46
Figura 17.	Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 3.....	51
Figura 18.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 3.....	52
Figura 19.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 3.....	53
Figura 20.	Contenido de humedad vs tiempo – Ensayo 4.....	55
Figura 21.	Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 4.....	56
Figura 22.	Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 4.....	56
Figura 23.	Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 4.....	60
Figura 24.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 4.....	61
Figura 25.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 4.....	62
Figura 26.	Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 5.....	66
Figura 27.	Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 5.....	66
Figura 28.	Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 5.....	67

Figura 29.	Coeficientes de Convección para Bandejas de Estantería....	69
Figura 30.	Coeficiente Global de Transferencia de Calor.....	74
Figura 31.	Temperaturas de las Paredes del Secador.....	81
Figura 32.	Coeficiente Global Total de Transferencia de Calor.....	90
Figura 33.	Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 5.....	94
Figura 34.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 5.....	95
Figura 35.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 5.....	96
Figura 36.	Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 6.....	99
Figura 37.	Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 6.....	100
Figura 38.	Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 6.....	101
Figura 39.	Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 6.....	104
Figura 40.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 6.....	105
Figura 41.	Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 6.....	106
Figura 42.	Parámetros Reales para diversos Productos Alimenticios....	111
Figura 43.	Parámetros Teóricos para diversos Productos Alimenticios..	111
Figura 44.	Parámetros Reales y Teóricos para diversos Productos Alimenticios.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Secado de soya al 18% de humedad: 5 de junio 2014.....	31
Tabla 2.	Secado de Soya al 41.2% de humedad: 13 de Junio 2014...	32
Tabla 3.	Resultados teórico-prácticos – Ensayo 2, Soya.....	40
Tabla 4.	Secado de Soya al 54% de humedad: 19 de Junio 2014.....	45

Tabla 5.	Resultados teórico-prácticos – Ensayo 3, Soya.....	50
Tabla 6.	Secado de Soya 52.19%: 23 Junio 2014.....	55
Tabla 7.	Resultados teórico-prácticos – Ensayo 4, Soya.....	59
Tabla 8.	Secado de choclo tierno: 28-29/Agosto/2014.....	65
Tabla 9.	Datos de proceso – Ensayo 5, Choclo tierno.....	77
Tabla 10.	Resultados teórico-prácticos – Ensayo 5, choclo tierno.....	93
Tabla 11.	Secado de habas: 1-2/septiembre/2014.....	98
Tabla 12.	Propiedades de las habas.....	102
Tabla 13.	Coeficientes de convección internos, promedio y Global de transferencia de calor.....	102
Tabla 14.	Tiempo de Secado y Cantidad de Calor.....	103
Tabla 15.	Resultados teórico-prácticos – Ensayo 6, Habas.....	103
Tabla 16.	Resumen de resultados teórico-prácticos.....	108
Tabla 17.	Velocidades promedio para bandejas.....	109

RESUMEN EJECUTIVO

La Universidad Tecnológica Equinoccial, Sede Santo Domingo, mediante la carrera de Ingeniería Agroindustrial y Sistemas de Gestión se encarga de la preparación y formación de profesionales capacitados para el diseño tanto de procesos dedicados a la industrialización de materias primas provenientes de las áreas agrícola, ganadera, pesquera, etc., como de ciertos equipos de importancia en el procesamiento de los alimentos.

La presente investigación se enfocó en el estudio y aplicación de principios y variables físicas empleados en áreas de Termodinámica (como temperatura, presión de vapor, humedad relativa) y, especialmente, Transferencia de Calor (como los coeficientes de transferencia de calor por convección y coeficientes globales de transferencia de calor) para prever el comportamiento general del Secador de Bandejas Didáctico en lo referente al cálculo de curvas de secado, velocidad de secado y flujo de calor mediante el uso de un Simulador, desarrollado en MATLAB, como herramienta que agiliza y facilita la aplicación de dichos principios.

El trabajo investigativo permitió comprender el funcionamiento y/o comportamiento termodinámico del Secador de Bandejas Didáctico cuyo modelo desarrollado y aplicado pudo representar la realidad general del mismo lo cual trae como consecuencia la necesidad de entender un equipo antes de someterlo a cambios o posibles mejoras.

EXECUTIVE SUMMARY

The “Universidad Tecnológica Equinoccial”, headquarters Santo Domingo, through the career of agro-industrial engineering and management systems is responsible for the preparation and training of qualified professionals for the design processes dedicated to the industrialization of raw materials from areas of agricultural, livestock, fisheries, etc., as well as certain equipment of importance in the food processing.

This research focused on the study and application of principles and physical variables employed in areas of thermodynamics (such as temperature, relative humidity, vapor pressure) and, especially, heat transfer (such as the heat transfer coefficients by convection coefficients and global heat transfer) to predict the general behavior of Didactic trays dryer with regard to calculating drying curves, speed of drying and heat flow through the use of a simulator, developed in MATLAB as a tool that accelerates and facilitates the implementation of these principles.

The investigative work allowed to understand the operation and/or thermodynamic behavior of Didactic trays dryer whose developed and applied model could represent the overall reality of the same which brings as a consequence the need to understand a team before subjecting it to changes or improvements

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.- Planteamiento del problema

El campo agroindustrial es un área que se caracteriza por su enfoque en el diseño de nuevos productos alimenticios, sus etapas de procesamiento y transporte; por lo tanto la conservación de estos requiere del empleo de equipos destinados a someter a los alimentos a ciertas operaciones unitarias para asegurar la mayor vida útil posible, lo cual crea la necesidad de diseñar tales equipamientos adaptándolos a las necesidades del producto final a obtenerse, y es precisamente la Deshidratación una de las operaciones más antiguas utilizadas con este objetivo (Brennan, 2012).

De modo que la cuestión es diseñar un equipo cuyo funcionamiento nos asegure que podemos obtener un producto de calidad y con las características deseadas al menor costo posible.

Por esta razón la investigación se realizó en la Universidad Tecnológica Equinoccial sede Santo Domingo centrándose en el Secador de Bandejas Didáctico disponible para su uso en el Galpón de Agroindustrias.

Cuando se construye un equipo destinado a procesar alimentos, existe el riesgo inherente de diseñarlo de tal forma que los resultados son distintos a los esperados; una situación que se deriva de la anterior es que al detectar los puntos donde se debe mejorar un equipo una de las maneras es haciéndolo físicamente (re-ingenierías) y eso también significa costos, sin antes mencionar si tales correcciones darán los resultados deseados, lo cual se traduce en un proceso cíclico de “prueba-corrección” y esto implica inversiones considerables.

Para evitar ese círculo se puede imitar el funcionamiento del secador mediante un simulador que “ejemplifique” lo más acertadamente posible su comportamiento

para obtener resultados que permitan, posteriormente, decidir si es o no necesario las correcciones.

1.2.- Justificación

El desarrollo de la investigación es conveniente, en vista de la necesidad existente del diseño de equipos para la industria de procesamiento de alimentos, para aplicar principios matemáticos y físicos al diseño y lograr mejor exactitud posible.

Esto es relevante con respecto al enfoque que se da al diseño, pues la existencia de software(s) (MatLab) constituye(n) valiosas y muy útiles herramientas para la investigación de operaciones unitarias y el diseño de equipos lo cual favorecerá especialmente a estudiantes de la Universidad, tratando de reducir el error humano de cálculo.

Las razones que llevan a la investigación se resumen en su aporte hacia el uso de criterios matemáticos y/o físicos asistidos con software (MatLab) para su aplicación en investigación de operaciones unitarias (deshidratación, en este caso) y, posteriormente, al diseño de equipos destinados a la industria procesadora de alimentos.

De este modo se contribuye a suplir la necesidad de cómo aplicar principios matemáticos y físicos enfocados a la investigación de operación unitaria de deshidratación, y luego, al diseño de deshidratador de bandejas para productos sólidos (granos, cereales, etc.) asistidos con MatLab, aplicaciones que se pueden extender a otros equipos de la industria procesadora de alimentos.

La presente investigación facilitará al estudio, en parte, de la operación unitaria de secado y posteriormente podrá dar pie el diseño de nuevos equipos o el mejoramiento de los ya existentes.

El impacto ambiental que se deriva tiene su punto de partida en el hecho de que si se elimina el error introducido por el cálculo manual entonces se usa menor cantidad de recursos, y si disminuye su empleo es consecuente el que se explore en menor cantidad los recursos disponibles en el medio ambiente, es decir se promueve, en cierto sentido, un enfoque basado en el desarrollo sostenible.

Y esto resulta viable ya que se dispone de los recursos necesarios, aquellos relacionados con la disponibilidad de software (MatLab), las fuentes secundarias de información científica y recursos económicos y, muy importante, el equipo deshidratador objeto de estudio.

1.3. Alcance de la investigación

La presente investigación dará pie a futuros estudios (y/o investigaciones) centrados a diseño de equipos para deshidratación de granos, o para mejorar los ya existentes.

El enfoque de la presente investigación se podrá extender a otros equipos de la Planta Agroindustrial, y también realizar para cada uno de ellos con sus respectivos modelos de simulación para comprender la realidad física de ellos y realizar futuras modificaciones (si el caso lo requiere).

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

Implementar un simulador para cálculo de cantidad de calor total y las curvas de secado en secador de bandejas didáctico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Examinar al secador didáctico para implementar instrumentos de medición.
- Poner en marcha al secador didáctico.
- Desarrollar el simulador usando software (MatLab).
- Realizar pruebas del secador didáctico con el simulador usando distintos tipos de granos.

1.5. Idea a defender

El desarrollo del simulador permitirá realizar cálculos de cantidad de calor total, y curvas de secado: resultados teóricos para compararlos con los resultados prácticos.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

En la actualidad se está dando mucha importancia a la asistencia de programas para cualquier rama del campo científico (Vera, 2013), un área de notable incidencia es la industria en donde se encuentran muchos problemas de interés práctico: uno de los problemas clásicos es el diseño y/o re-diseño de los equipos de la Industria Alimentaria conforme las necesidades de la misma; cuando se trata de los re-diseños es necesario evaluar las necesidades que se presentan según las circunstancias, de ser necesario la cuestión base es la de qué ajustes (o mejoras) efectuar y cómo de tal forma que con seguridad se espera obtener los resultados previstos como consecuencia de dichas mejoras: una de ellas puede ser la simulación, en vista de que hacer pruebas en el mundo real (el ciclo de prueba-corrección) resultará muy costoso, tal permitirá comprender mejor al(os) equipo(s) objeto de posibles mejoras y cómo hacerlas.

Uno de tales programas ampliamente utilizados en diversos campos de la ingeniería es MATLAB pues ha sido desarrollado con una gran versatilidad en lo que a cálculos matemáticos y técnicos se refiere, y el cual es utilizado por las mejores universidades del mundo (Vera, 2013).

Varios investigadores consideran la asistencia de programas aplicados con este propósito como es el caso de MATLAB (*Matrix Laboratory*) y existen casos análogos del uso de esta herramienta (por citar un ejemplo: en una investigación enfocada al dimensionamiento y simulación de un Secador por Aspersión realizada por Ángeles M.L., 2009), que permite comprender un fenómeno físico de interés presente en un equipo en cuestión y predecir su comportamiento termodinámico (Arballo, J.R., 2013).

2.2. Fundamentos Teóricos

2.2.1. Secadores o deshidratadores

Haciendo referencia a los equipos empleados para efectuar dicha operación, se puede realizar una pequeña clasificación “[l]os secaderos que exponen los sólidos a un gas caliente se llaman *adiabáticos o secaderos directos*; aquellos en los que el calor es transmitido desde un medio externo reciben el nombre de *no adiabáticos o secaderos indirectos*.” (McCabe L., Smith C., & Peter, 1991, pág. 882). De este modo “[e]l equipo para deshidratar alimentos [...] consiste en gabinetes, túneles o compartimientos [...] dentro de los cuales el producto a deshidratar se [puede poner] en contacto directo con aire caliente que fluye a determinada velocidad.” (Colina I., 2010, pág. 39)

2.2.1.1. Deshidratador de bandejas

En este equipo, el material, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad. Un secador de bandejas típico, tal como el que se muestra en la figura, tiene bandejas que se cargan y se descargan de un gabinete.

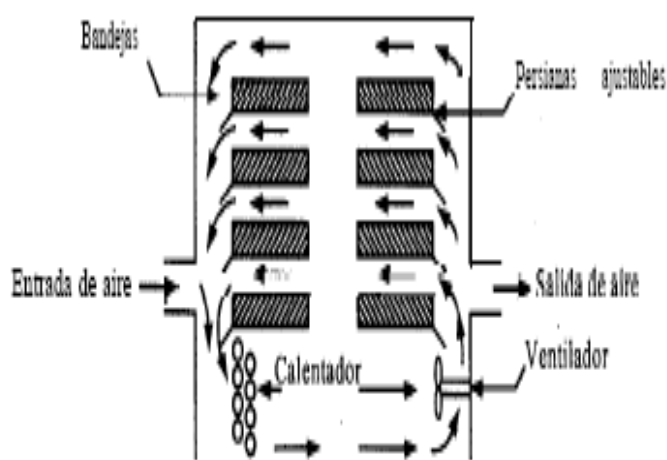


Figura 1. Secador de Bandejas
(Geankoplis, 1998)

Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas.

También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado.

Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se remplazan por otras con más material para secado. Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador. (Geankoplis, 1998, pág. 579)

2.2.1.2. Operación unitaria de deshidratación

La operación de secado o deshidratación transmite la idea de eliminación de agua de un cuerpo húmedo, pero la diferencia entre evaporación y secado radica en la cantidad de humedad removida pues la última elimina pequeñas cantidades de agua.

El secado suele ser “la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que muchos materiales, como los jabones en polvo y los colorantes, sean más adecuados para su manejo.”

Con respecto a fluidos o materiales biológicos se usa como técnica de preservación. Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua. Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso. Sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de

humedad por debajo del 5% en peso en los alimentos, para preservar su sabor y su valor nutritivo. Los alimentos secos pueden almacenarse durante periodos bastante largos. (Geankoplis, 1998, pág. 599)

2.2.2. Períodos de secado

Al deshidratar un sólido húmedo con aire caliente, el aire aporta al producto tanto calor sensible como calor latente de evaporación, y también actúa como acarreador del agua que se está evaporando.

Si el cambio en el contenido de humedad del producto se va registrando a intervalos pequeños de tiempo durante todo el proceso de deshidratación, pueden obtenerse una serie de gráficas o curvas en las que se distinguen muy claramente varias etapas del proceso (Colina I., 2010, pág. 46)

En general “siempre están presentes las dos zonas principales de la curva de velocidad de secado: el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente.” (Geankoplis, 1998, pág. 599)

2.2.2.1. Período de Secado a Velocidad Constante

La primera etapa o período se caracteriza porque “la superficie del sólido está muy mojada al principio y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua es agua no [ligada] y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Sin embargo, las ondulaciones y hendiduras en la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta de la que tendría una superficie completamente plana.

Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior. Este periodo continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora. La evaporación durante este periodo es similar a la que existe cuando se determina la temperatura de bulbo húmedo, y en ausencia de transferencia de calor por radiación o conducción, la temperatura de la superficie equivale en forma aproximada a la temperatura de bulbo húmedo.” (Geankoplis, 1998, pág. 599)

Durante esta etapa, la “velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transferencia de calor”. (Colina I., 2010, pág. 46)

2.2.2.2. Período de Secado a Velocidad Decreciente

Empezando por el contenido crítico de humedad, en este punto “no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante [este] periodo [...] hasta que la superficie queda seca en su totalidad.” (Geankoplis, 1998, pág. 600)

Luego, cuando “la superficie esta seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. [...]. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire.” (Geankoplis, 1998, pág. 600).

2.2.3. Fenómenos que gobiernan las etapas de secado

En vista de que se considera en forma generalizada dos etapas de secado, debe mencionarse que, “[e]l movimiento de la humedad a través de una pieza de tejido [...] vegetal que se está deshidratando, [...], es un fenómeno complejo que incluye fuerzas capilares, difusión de líquido debido a gradientes de concentración y difusión superficial, entre otros” (Colina I., 2010, pág. 49).

Un factor que incide directamente en la deshidratación es la naturaleza del material (Colina I., 2010), lo cual, “afecta[...] al secado durante [el] período[...] de velocidad [...] decreciente.” (Geankoplis, 1998, pág. 600)

2.2.3.1. Teoría de Movimiento Capilar

Los sólidos porosos (o granulares tales como arcillas, etc.) son aquellos que contienen poros y canales interconectados de diferentes tamaños, de ahí que la humedad libre se desplace a través de capilares y espacios vacíos de los sólidos por acción capilar y no por difusión. (Geankoplis, 1998, pág. 600)

En este mecanismo interviene “la tensión superficial; además, [la humedad no ligada] se mueve de la misma forma que el aceite se mueve a través de la mecha de una lámpara.[...] Conforme el secado continúa, al principio la humedad se mueve por capilaridad hasta la superficie, con la suficiente rapidez para mantener una superficie uniformemente húmeda; la rapidez de secado es constante.” (Treybal, pág. 749).

Mientras exista suficiente humedad libre para mantener la “superficie completamente mojada, la velocidad de secado es constante”. (McCabe L., Smith C., & Peter, 1991, pág. 841)

Cuando se presenta el período de velocidad decreciente de secado, al comienzo “[...] el agua es llevada hasta la superficie por acción capilar, pero la capa superficial de agua comienza a hundirse en el sólido.” (Geankoplis, 1998, pág. 600). Cuando esto ocurre, el aire ingresa para llenar los espacios vacíos, lo cual permite seguir eliminando agua de forma continua, pero se llega a un punto donde ya no hay agua suficiente para mantener la película de humedad en todos los poros y la velocidad de secado disminuye repentinamente al principio del segundo período de velocidad decreciente. (Geankoplis, 1998, pág. 600)

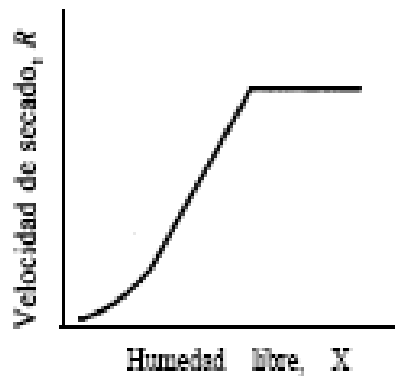


Figura 2. Velocidad decreciente de Secado, controlada por Capilaridad. (Geankoplis, 1998)

2.2.3.2. Teoría de Difusión

Esta teoría sostiene que la difusión de humedad líquida tiene lugar debido a diferencias de concentraciones entre el interior del sólido y su superficie, es un tipo de mecanismo de transporte de humedad se presenta en los sólidos no porosos, como una pasta, un jabón, una gelatina o un pegamento. Además, este mecanismo de transferencia de masa se presenta en muchos materiales alimenticios durante el período de secado a velocidad decreciente. (Geankoplis, 1998, pág. 600)

El período de secado a velocidad decreciente *controlado* por *difusión* se muestra a continuación: (Geankoplis, 1998, pág. 601)



Figura 3. Velocidad decreciente de Secado, controlada por Difusión (Geankoplis, 1998)

2.2.4. Curvas de velocidad de secado

Para elaborar dichas gráficas, se consideran los siguientes pasos (Geankoplis, 1998, pág. 597):

En un experimento de secado por lotes, los datos se suelen expresar como peso total W del sólido humedad a diferentes tiempos de t en horas. Estos valores se pueden convertir a datos de velocidad de secado por los siguientes procedimientos: si W es el peso del sólido húmedo en kilogramos totales de agua más sólido seco y W_s , es el peso del sólido seco en kilogramos,

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \left[\frac{\text{kg totales de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right] \quad \text{Ec.1}$$

Con el contenido de humedad de equilibrio X^* se procede a calcular los valores de contenido de humedad libre, en kg de agua libre/kg de sólido seco para cada valor de X_t , así:

$$X = X_t - X^* \quad \text{Ec.2}$$

Sin embargo, en vista de que la humedad de equilibrio suele ser muy pequeña, se desprecia y se toma como de valor cero.

Al sustituir los datos calculados en la ecuación anterior se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo t en h.

Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes a la curva, lo cual proporciona valores de dx/dt para ciertos valores de t . Se calcula entonces la velocidad R para cada punto con la expresión

$$R = -\frac{L_s}{A} * \frac{dX}{dt} \quad \text{Ec.3}$$

Donde R es la velocidad de secado en kg de agua/h*m², Ls es kg de sólido seco usado y A es el área superficial expuesta.

2.2.5. Ecuaciones para predicción de tiempos de secado

2.2.5.1. Período de Secado a Velocidad Constante

Anteriormente se estableció que “el movimiento de la humedad dentro del sólido es bastante rápido para mantener una condición saturada en la superficie, [...] la velocidad de desecación se controla [mediante] la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación.” (Perry, Green, & Maloney, págs. 20-10)

De ahí que, la velocidad de transferencia de masa puede expresarse así:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_c = -km * A * (Hs - Ha)$$

Donde: $(dW/dt)_c$: Velocidad de secado a velocidad constante (Kg agua/h); km: Coeficiente de transferencia de masa (kg/m²*h); A: área de la superficie de deshidratación (m²); Hs: humedad de la superficie del producto, equivalente a la humedad de saturación del aire a la temperatura de superficie del producto (kg de agua/kg de aire seco); Ha: humedad del aire (kg de agua/kg de aire seco). (Colina I., 2010, pág. 57)

A su vez, la velocidad de transferencia convectiva de calor se expresa así si se desprecia el efecto del calor transmitido por conducción y radiación (Geankoplis, 1998, pág. 693):

$$\dot{Q} = h(T - Tw)A$$

Donde h, es el coeficiente de transferencia de calor en W/m²K; A: área de secado expuesta (m²); T: temperatura del gas; Tw es la temperatura de la superficie del sólido.

Y puesto que la humedad absorbe calor latente de vaporización (λ), la superficie líquida llega y permanece en una temperatura constante y de equilibrio de tal forma que la rapidez del flujo de calor en la superficie es exactamente igual a la rapidez de absorción de calor la velocidad de transferencia de masa y de calor se relacionan de la siguiente forma (Colina I., 2010):

$$\left[\frac{dW}{dt} \right]_c \lambda = -\dot{Q}$$

Por tanto:

$$\left[\frac{dW}{dt} \right]_c = -\frac{\dot{Q}}{\lambda} = -\frac{h(T - T_w)A}{\lambda}$$

Donde, λ es el calor latente de vaporización de agua a T_w ; T_w : temperatura de bulbo húmedo del aire utilizado en el secado.

Si la velocidad de secado $(dW/dt)_c$ se llega a expresar como kg agua/kgss-h, la superficie de desecación de expresa como A' , Área efectiva de desecación en m^2/kg de solido seco, teniéndose la velocidad de evaporación así:

$$\left[\frac{dW}{dt} \right]_c = -\frac{h(T - T_w)A'}{\lambda}$$

Para flujo de aire paralelo al producto, donde el secado se efectúa por las dos caras de producto, el A' , se define como:

$$A' = \frac{1}{(\delta) \left(\frac{x}{2} \right)}$$

Donde: δ es densidad de los sólidos (kg/m^3) y x es el espesor del lecho (m). Entonces la velocidad de evaporación queda como:

$$\left[\frac{dW}{dt}\right]_c = -\frac{h(T - T_w)}{(\delta)\left(\frac{x}{2}\right)\lambda}$$

La integración de esta ecuación, para la predicción del tiempo de secado desde su contenido inicial de humedad hasta la humedad crítica, es:

$$t_c = \frac{(X_i - X_c)(\delta)\left(\frac{x}{2}\right)\lambda}{h(T - T_w)}$$

Donde t_c es el tiempo de secado en horas para el periodo de secado a velocidad constante. (Colina I., 2010, págs. 58-61)

El autor indica que las mediciones de velocidad del aire realizadas con anemómetro en *la superficie de las bandejas* de la cámara de secado fueron prácticamente nulas y desiguales por lo tanto *no es posible* utilizar la ecuación dimensional de estimación del coeficiente convectivo para secadores de bandejas:

$$h = 14.3G^{0.8}$$

pues la ecuación mencionada arriba, considera al coeficiente de transferencia de calor por *convección forzada*, es decir toma en cuenta el efecto de la velocidad homogénea del aire que circula sobre la superficie del producto húmedo para todas y cada una de las bandejas como factor que incrementa la transferencia de calor, pero como se puede ver el perfil de velocidades no es homogéneo y en ciertos casos nula así que el fenómeno aquí considerado es precisamente convección natural y /o forzada teniéndose mayormente el efecto de horno.

Para evaluar los coeficientes de transferencia de calor por convección natural, se emplean las siguientes correlaciones empíricas (Cengel., pág. 468), (Holpman, 1998, pág. 236):

$$Nu = 0.54(Ra)^{0.25} \quad 2 \times 10^4 < Ra < 8 \times 10^6 \quad \text{Ec.4}$$

$$Nu = 0.14(Ra)^{0.3333} \quad 8 \times 10^6 < Ra < 10^{11} \quad \text{Ec.5}$$

$$Nu = 0.27(Ra_L)^{0.25} \quad 10^5 < Ra < 10^{11} \quad \text{Ec.6}$$

Si el aire es obligado a fluir a baja velocidad, como sucede con las 3 últimas bandejas de arriba hacia abajo, las corrientes de flotabilidad (típicas de la convección natural) pueden ejercer efecto importante en el coeficiente convectivo. El criterio es que “cuando

$$\frac{Gr}{Re^2} > 10 \quad \text{Ec.7}$$

la convección natural es de primordial importancia” (Holpman, 1998, pág. 256)

Si se trata de convección forzada, para placas planas horizontales se tiene:

$$Nu = 0.664(Re)^{0.5}(Pr)^{0.3333} \quad \text{Ec.8}$$

Los números adimensionales mencionados anteriormente utilizados en las correlaciones empíricas tienen las siguientes definiciones:

$$Gr = \frac{\left(\frac{1}{T_\infty}\right)g(T_\infty - T_w)D^3\rho^2}{\mu^2} \quad \text{Ec.9}$$

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad \text{Ec.10}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad \text{Ec.11}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad \text{Ec.12}$$

$$Ra = Re \cdot Pr \quad \text{Ec.13}$$

2.2.5.2. Ecuación de secado a velocidad constante

“Con frecuencia, el secado se lleva a cabo en un gabinete cerrado, donde las paredes irradian calor al sólido que se está secando.

Además, en algunos casos, el sólido puede estar depositado en una bandeja metálica, y también existe una transferencia de calor por conducción a través del metal hacia el fondo del lecho sólido.[...] si las temperaturas del gas no son muy altas, la radiación desde la superficie superior a la bandeja será pequeña. Por consiguiente, no es necesario poner mucho énfasis en el calor por radiación” (Geankoplis, 1998, pág. 609), y la ecuación de velocidad de secado a velocidad constante se calcula como:

$$Rc = \frac{(Uk+hc)(T_{\infty}-T_s)}{hfg} \quad \text{Ec.14}$$

El coeficiente global de transferencia de calor se calcula mediante (Geankoplis, 1998)

$$U_k = \frac{1}{\frac{1}{hc} + \frac{z_{metal}}{k_{metal}} + \frac{z_{sólido}}{k_{sólido}}} \quad \text{Ec.15}$$

Donde hc=coeficiente de película ($W/m^2\text{°C}$), z_{metal} =espesor de la bandeja (m), k_{metal} =Conductividad térmica del acero inoxidable ($54W/(m\text{°C})$), $z_{sólido}$ =espesor de la capa de producto (m), $k_{sólido}$ =Conductividad térmica del sólido ($W/(m \text{°C})$)

2.2.5.3. Conductividad térmica de un alimento

Se sugiere la siguiente expresión para estimar la conductividad térmica de un alimento (Batty & Folkman, 1983)

$$k_{ef} = k_{agua} \left(\frac{V_{agua}}{V_{total\ producto}} \right) + k_{solidos} \left(\frac{V_{sólidos}}{V_{total\ producto}} \right) + k_{aire} \left(\frac{V_{aire}}{V_{total\ producto}} \right) \quad \text{Ec.16}$$

$$\left(\frac{V_{agua}}{V_{total\ producto}} \right) = \frac{M_{agua}/M_{total\ producto}}{\rho_{agua}/\rho_{total\ producto}}$$

$$\left(\frac{V_{sólidos}}{V_{total\ producto}} \right) = \frac{M_{solidos}/M_{total\ producto}}{\rho_{solidos}/\rho_{total\ producto}}$$

$$\left(\frac{V_{aire}}{V_{total\ producto}} \right) = 1 - \left(\frac{V_{agua}}{V} \right) - \left(\frac{V_{sólidos}}{V} \right)$$

2.2.5.4. Período de Secado a Velocidad Decreciente

Los períodos de secado a velocidad decreciente principian con el contenido crítico de humedad. (Perry, Green, & Maloney, págs. 20-11)

En este período se pueden presentar dos mecanismos ampliamente estudiados, los cuales determinan el tiempo de secado: capilaridad o difusión (sólo se realizará breve análisis del primero).

- Capilaridad

Si el movimiento de la humedad se realiza por capilaridad, la deducción de la ecuación de velocidad de secado se basa en una fuerza modificada de la

ecuación de Poiseville para flujo laminar en combinación con la ecuación de fuerza capilar, de este modo la velocidad de secado R varía linealmente con el contenido de humedad. (Geankoplis, 1998, pág. 616)

Se tiene:

$$R = Rc \frac{X}{Xc}$$

Y

$$t = \frac{LsXc}{ARc} \ln \left[\frac{Xc}{Xf} \right]$$

Donde, Xf es contenido de humedad final, Ls es kg de sólidos secos, así:

$$\frac{Ls}{A} = x\delta$$

Donde δ =densidad del sólido kg/m^3 .

Entonces:

$$td = \frac{\lambda Ls(Xc)}{A(h+Uk)(T-Ts)} \ln \left[\frac{Xc}{Xf} \right] \quad \text{Ec.17}$$

Y la fórmula de tiempo de secado constante sería:

$$tc = \frac{(Xi-Xc)Ls\lambda}{A(h+Uk)(T-Ts)} \quad \text{Ec.18}$$

El autor sostiene que estas ecuaciones son aplicables cuando se cumplen algunas condiciones, en especial la de velocidad del aire que fluye en **paralelo a la superficie del producto**; de no ser así no podrían aplicarse como tales, además la forma de estimar los coeficientes de transferencia de calor por convección deben estimarse de acuerdo con el fenómeno de convección presente y dominante durante el secado.

2.2.6. Ecuaciones para cantidad de calor total

Según Batty & Folkman (1983) para los secadores de bandeja, túnel, banda se tiene una ecuación para el cálculo de la cantidad de calor total requerida:

$$Q = M_p C_p (T_{pe} - T_{pi}) + M_a [(C_{p\ aire\ i} (T_{ae} - T_{ai}) + w_{aire\ i} (h_{ve} - h_{vi}))] + M_{evap} (h_{ve} - h_{vi}) + Q_p$$

Pero

$$M_a [(C_{p\ aire\ i} (T_{ae} - T_{ai}) + w_{aire\ i} (h_{ve} - h_{vi}))] = M_a C_s (T_{ae} - T_{ai})$$

Entonces la ecuación anterior, se reduce a:

$$Q = M_p C_p (T_{pe} - T_{pi}) + M_a C_s (T_{ae} - T_{ai}) + M_{evap} (h_{ve} - h_{vi}) + Q_p \quad \text{Ec.19}$$

Donde:

Q = calor total requerido (W)

M_p = masa de producto que sale (kg/s)

C_p = del producto que sale (J/kg°C)

T_{pe} = temperatura de salida del producto ($^{\circ}\text{C}$)

T_{pi} = temperatura de ingreso del producto ($^{\circ}\text{C}$)

M_a = masa de aire que ingresa desde el ambiente a la unidad de calentamiento (kg/s)

T_{ae} = temperatura de salida del aire ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ai} = temperatura de ingreso del aire ($^{\circ}\text{C}$)

$w_{aire\ i}$ = humedad absoluta del aire que ingresa desde al ambiente (kg agua/kg aire seco)

h_{ve} = entalpia de vapor saturado a T_{ae}

h_{vi} = entalpia de vapor saturado a T_{ai}

M_{evap} = masa de agua evaporada (kg agua/s)

Q_p = calor perdido o disipado al ambiente

C_s = calor húmedo del aire

El calor húmedo del aire C_s , (KJ/kgAireHúmedo), se aproxima como (Lomas, 2002):

$$C_s = 1.005 + 1.88w_{aire\ i} \quad \text{Ec.20}$$

2.2.7. *Matrix Laboratory*

MATLAB es un lenguaje de alto nivel orientado al desarrollo de cálculos técnicos. El entorno de MATLAB integra cálculo, visualización y programación de forma fácil e interactiva. Los problemas y las soluciones se expresan en la notación matemática habitual.

El elemento básico de información es una matriz a la que no hace falta asignar dimensiones con anterioridad. Por tanto, puede abordarse problemas que requieren una formulación vectorial o matricial de un modo más fácil que en un lenguaje tipo FORTRAN o C++. El nombre MATLAB es una abreviatura de *Matrix Laboratory*. (Vera, 2013, pág. 15).

2.2.7.1 Archivos *.m*

Los ficheros con extensión (*.m*) son ficheros de texto sin formato (ficheros ASCII) que constituyen el centro de la programación en MATLAB.

Existen dos tipos de ficheros *.m*, los *ficheros de comandos* (llamados *scripts* en inglés) y las *funciones*.

Los primeros contienen simplemente un conjunto de comandos que se ejecutan sucesivamente cuando se teclea el nombre del fichero en la línea de comandos de MATLAB o se incluye dicho nombre en otro fichero *.m*. Un fichero de comandos puede llamar a otros ficheros de comandos.

2.2.7.2. Simulación

Es [...] el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real y conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del

sistema o evaluar varias estrategias (dentro de límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del sistema. (Shannon, 1988)

2.2.8. Equipos Directos de Medición

2.2.8.1. Higrómetro

Permite cuantificar el porcentaje de Humedad Relativa (%HR), su temperatura de bulbo seco (además del punto de saturación adiabática) del aire que ingresa al desde el ambiente.



Figura 4. Higrómetro

Las características del mismo son las siguientes:

Rango de Lectura de Humedad Relativa: 3% - 95%

Rango de Lectura de Temperatura de Bulbo Seco: 0 – 60°C

Voltaje: 1.5V (2 pilas AAA), DC.

2.2.8.2. Anemómetro

Cuantifica la velocidad y la temperatura del aire (m/s) que es impulsado por el Blower Ø 4”.



Figura 5. Anemómetro

Sus características son las siguientes:

Rango de Velocidad: 0.4 – 30 m/s

Rango de Temperatura: -10 – 60 °C

Temperatura de operación: 0 – 50°C

Temperatura de almacenamiento: -10 – 60°C

Humedad relativa de operación: <80%

Humedad relativa de almacenamiento: <80%

Batería: 9 V; 8.3 mA DC aprox.

Dimensiones: Instrumento principal 7x2.9x1.2" (178x74x33 mm)

2.2.8.3. Medidor de temperatura

Cuantifica como parámetro fijo la temperatura de superficie de la Balanza.



Figura 6. Medidor de temperatura

Sus características son las siguientes:

Rango de lectura de temperatura: 0 – 400°C

Voltaje: 110V AC; 50/60 Hz

2.2.8.4. Balanza Electrónica.

Permite visualizar los pesos del producto.



Figura 7. Balanza electrónica

Sus características:

Masa máxima: 100kg

Error: ± 0.05 kg

Temperatura de operación: máx. 80°C (a excepción de la pantalla: 40°C)

Voltaje: 110V AC, 50/60 Hz.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Sitio de estudio

3.1.1 Sitio de estudio

3.1.1.1.-Localizacion Geográfica

La presente investigación se realizó en Santo Domingo, Universidad Tecnológica Equinoccial sede Santo Domingo, vía a Chone km 4 ½ , Av. Italia, en la Planta de la carrera de ingeniería Agroindustrial.

3.1.1.2.- Ubicación en el tiempo

La presente investigación se realizó entre los años 2013-2014.

3.1.2. Materiales, Instrumentos, equipos, recursos

3.1.2.1. Materiales

Crisoles, pinzas, cuchillo.

3.1.2.2. Instrumentos, equipos

Anemómetro, Higrómetro, Secador de Bandejas Didáctico, Computador, software (MatLab), Estufa, balanza analítica, termómetros de mercurio.

3.1.2.3. Recursos

Materias Primas (cereales/granos)

3.1.3.- Manejo del experimento

El primer paso consistió en hacer una revisión del equipo para visualizar el tipo de variables medibles a utilizarse posteriormente, se hizo funcionar al equipo Secador de Bandejas Didáctico para observar su funcionamiento y obtener los primeros datos.

El 2do paso fue el desarrollar un modelo preliminar que empleó las variables medibles y ecuaciones. Dicho modelo se lo comparó con los datos previamente obtenidos.

Pero al comparar ambos resultados se apreció variación entre estos y se procedió a corregir el modelo preliminar hasta lograr convergencia de los resultados. Este último paso se repitió hasta lograr la mayor exactitud posible, utilizando una misma materia prima (soya)

Llegado a este punto, se procedió a utilizar el simulador para predecir los resultados reales del equipo empleando otra materia prima (choclo tierno) y se hizo funcionar al equipo para recopilar resultados reales.

Al lograr la predicción de los resultados del equipo, se hizo otro ensayo adicional con otra materia prima (habas) para verificar la validez del modelo desarrollado.

A continuación se pasa a explicar la metodología para el análisis de los datos recopilados.

3.2. Procedimiento para manejo de ensayos

La recopilación de los datos se realizó de la siguiente manera:

1. Encendido del caldero: Llegados hasta los 80 psi, abrir la válvula hasta aproximadamente 5 líneas del hilo de la válvula principal; seguido remover todo el condensado acumulado en la línea de vapor de todo la Planta y asegurarse de que queden cerradas las válvulas de las purgas.

2. Encendido del secador: Antes, sacar el carro y una vez afuera remover las ruedas y colocar la estructura de platinas sobre la balanza con sus respectivos pernos, y dejarla dentro de la cámara de secado junto con la estantería sin las bandejas: dejar encendida la balanza y el medidor de temperatura. Luego abrir la válvula de paso de vapor hasta la mitad, y encender el equipo. Esperar a que el equipo se estabilice térmicamente en unos 20 minutos y mientras tanto, remover los condensados acumulados en el equipo (para mayores detalles véase Capítulo V).

Mientras el equipo se calienta, preparar la materia prima a colocarse sobre las bandejas; luego proceda a colocar los instrumentos de medición restantes (higrómetro y anemómetro).

3. Pasados los 20 minutos, se procede a colocar en la estantería las bandejas con producto.

4. Tome los datos requeridos cada 30 minutos

5. Una vez concluido el ensayo: hacer los análisis de humedad del producto inicial y final para el balance de materia.

Análisis de Datos: Analice los datos recopilados de pesos (véase Anexo N°6), y haga las curvas de secado.

Realice una estimación de la densidad del producto seco, con su conductividad térmica, finalmente compare los resultados reales con los teóricos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Examinación y puesta en marcha del Secador de Bandejas Didáctico

Durante el primer paso del manejo del experimento se hizo ensayos con materias primas (zanahoria amarilla y plátano verde) para verificar el funcionamiento del secador y conocer su funcionamiento; los datos tomados de los pesos no representaban la pérdida de pesos de los productos conforme avanza el tiempo.

Debido a ello se decidió utilizar una balanza digital con el objetivo de obtener datos de pesos y tener una idea o apreciación general del secado y con ésta se realizó ensayo preliminar con soya, cuyos resultados se presentan a continuación.

4.1.1. Ensayo 1 (preliminar)

Tabla 1. Secado de soya al 18% de humedad: 5 de junio 2014

Tiempo (hr)	Peso (kg)	W (kgAgua/kgSs)	dt (hr)	dW (kgAgua/kgss)	R (kgAgua/m ² -hr)	Wmedia (kgAgua/kgss)
0	11,529	0,219				
0,5	10,248	0,083	0,5	0,135	0,338	0,151
1	10,068	0,064	0,5	0,019	0,047	0,074

Se puede observar que con la utilización de la balanza electrónica sí se obtuvo lecturas de pesos que disminuían conforme avanzaba el tiempo.

Los datos de proceso se muestran en el Anexo N°7. Seguidamente se procedió a realizar más ensayos con la balanza para recopilar datos para la simulación.

4.2. Desarrollo del Simulador

Con los siguientes ensayos se procedió a desarrollar el simulador.

4.2.1. Ensayo 2

Tabla 2. Secado de Soya al 41.2% de humedad: 13 de Junio 2014

Tiempo (horas)	Pesos (kg)	W (kgAgua/kgSs)	dt (horas)	dW (kgAgua/kgSs)	R (kgAgua/m ² -Hr)	Wmedia (kgAgua/kgSs)
0	30	0,7006				
0,86	28,58	0,6202	0,86	0,0804	0,2166	0,6604
1,36	25,44	0,4425	0,5	0,1776	0,8289	0,5314
1,86	24,48	0,3883	0,5	0,0542	0,2532	0,4154
2,61	22,58	0,2805	0,75	0,1077	0,3352	0,3344
3,36	21,04	0,1930	0,75	0,0874	0,2721	0,2367
4,36	20,92	0,1863	1	0,0066	0,0155	0,1897
5,36	19,74	0,1194	1	0,0667	0,1561	0,1529
5,86	19,44	0,1025	0,5	0,0168	0,0786	0,1110

Gráficas de secado:

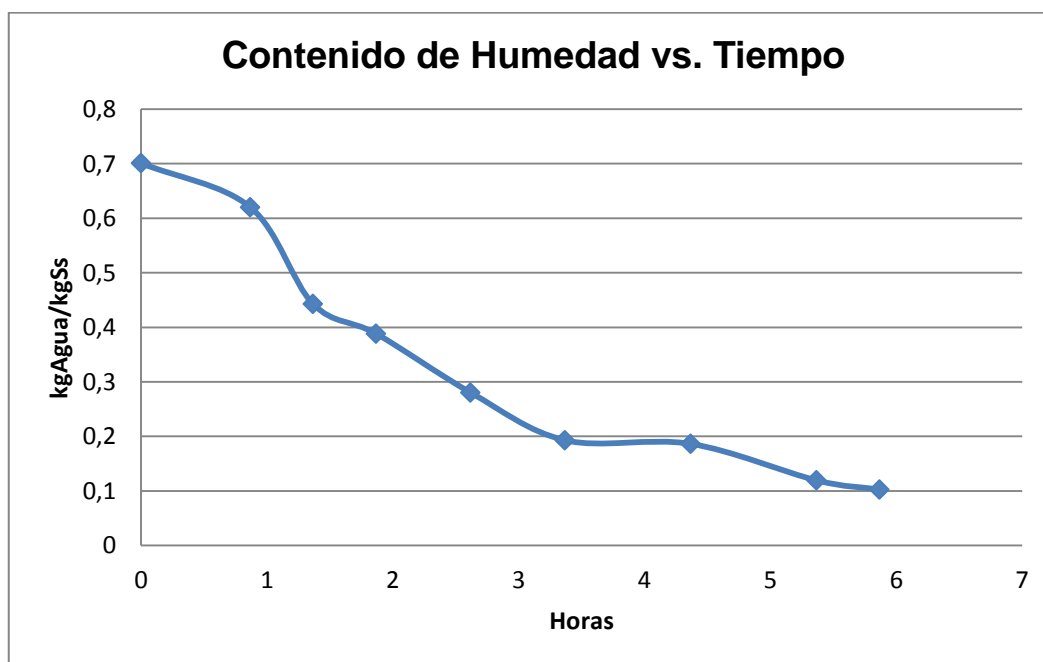


Figura 8. Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 2

En la Figura 8 se puede observar que las disminuciones del contenido de humedad son cuasi-lineales es decir tienen una tendencia bastante lineal, lo cual hace recordar al período de secado a velocidad constante en todo el proceso.

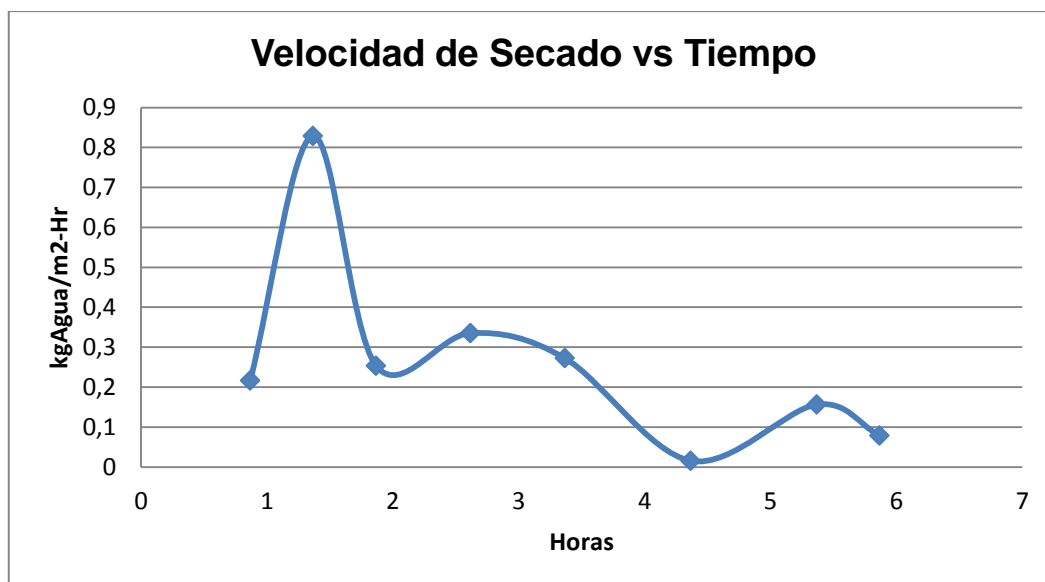


Figura 9. Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 2

En la Figura 9 se puede observar que la velocidad de secado aumenta y luego procede a disminuir, pero vuelve a aumentar en el penúltimo dato, lo cual puede indicar que el secado constante duró hasta las 5.366 horas.

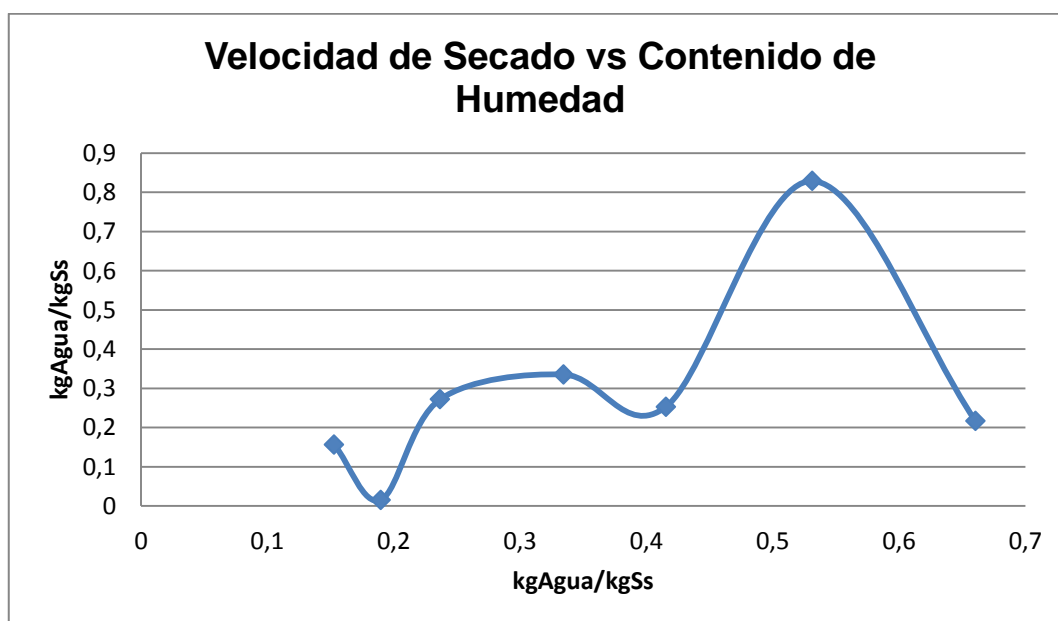


Figura 10. Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 2

La Figura 10, muestra que la velocidad de secado aumenta, luego disminuye, pero termina con un aumento de ella, lo cual puede estar indicando que el proceso se efectuó a velocidad constante.

4.2.1.1. Análisis de datos

Unos aspectos de importancia son las temperaturas, pues son cambiantes con el tiempo: mientras en uno se “enfria” el otro se “calienta”: el aire y el producto respectivamente. (Para los datos de proceso véase Anexo N°8 “Tabla de datos de proceso N°2”)

Precisamente es que cuando el producto se encuentra en un ambiente caliente éste comienza a experimentar elevaciones en su temperatura; es decir *varía con el tiempo*, de modo que *durante* el proceso se dio paso a variaciones de temperatura, lo cual indica que sucede lo siguiente: la temperatura del producto comienza a elevarse poco a poco, de modo que al principio es $T_a - T_i$, luego la temperatura de superficie si aumenta en 1°C , la nueva diferencia de temperaturas es $T_a - (T_i + 1)$, después si vuelve a subir 1°C más la nueva diferencia de temperaturas es $T_a - (T_i + 2)$, y así hasta que la diferencia mínima de temperatura entre el aire y el producto es 58.5-54.42.

Estas variaciones continuas desde el inicio hasta el final nos conducen a tomar como ejemplo a los intercambiadores de calor cuya situación es muy similar: estos equipos se caracterizan porque durante el proceso de transmisión de calor, las temperaturas de las sustancias *cambia*: mientras el fluido “calefactor” **disminuye** en dT_1 , el fluido “enfriador” **aumenta** en dT_2 , desde luego $dT_1 \neq dT_2$ pues los calores específicos de ambos son distintos, pero para fines de cálculo se toma como fuerza impulsora la temperatura media logarítmica que es una aproximación más cercana para la diferencia de temperatura entre las dos sustancias *cambiante* para conocer la cantidad de calor transferido (Holpman, 1998).

Como los datos tomados presentan esta situación, esto lleva a concluir que se debe tomar en seria consideración un tipo de temperatura media logarítmica también, por analogía con los intercambiadores de calor.

La ecuación que describe la diferencia de temperatura media logarítmica es la siguiente:

$$DTML = \frac{(T_{f\text{aire}} - T_{f\text{alimento}}) - (T_{i\text{aire}} - T_{i\text{alimento}})}{\ln\left(\frac{T_{f\text{aire}} - T_{f\text{alimento}}}{T_{i\text{aire}} - T_{i\text{alimento}}}\right)} \quad \text{Ec.21}$$

Entonces considérese:

	Fluido "calefactor"= Aire	Sustancia "enfriadora"=alimento	ΔTML
Ti	78.5	29	26.15
Tf	66	54.42	

$$DTML = \frac{(66 - 54.42) - (78.5 - 29)}{\ln\left(\frac{66 - 54.42}{78.5 - 29}\right)} = 26.15^\circ\text{C}$$

La diferencia media de temperatura logarítmica es de 26.15°C , lo cual se utilizará en la predicción de los tiempos de secado y de la velocidad teórica constante, de modo que las ecuaciones Ec.14, Ec.17 y Ec.18 resultan ser:

$$Rc = \frac{(Uk+hc) \cdot (\Delta TML)}{hfg} \quad \text{Ec.22}$$

$$tc = \frac{(Wi - Wc) \cdot Ls \cdot \lambda}{2 \cdot A \cdot (h + Uk) \cdot (\Delta TML)} \quad \text{Ec.23}$$

$$td = \frac{Ls \cdot \lambda \cdot (Wc)}{2 \cdot A \cdot (h + Uk) \cdot (\Delta TML)} \ln \left[\frac{Wc}{Wf} \right] \quad \text{Ec.24}$$

4.2.1.2. Cálculo de velocidad de secado teórica constante

Para esto se parte de que la densidad de la soya es de aprox. 875kg/m^3 que a un espesor medio de 1.25cm y un hc promedio de $3.14\text{W/m}^2\text{-Hr}$, proporcionan un $U_k=2.48\text{W/m}^2\text{-Hr}$ (para visualizar los cálculos, véase Anexo N°9). El hfg a 54.42°C es de 2368870J/kg (véase Anexo N°5)

Por lo tanto, según la Ec.22 (véase pág. 35):

$$R_{C_{teórico}} = \frac{(2.48 + 3.14)(26.15)}{2368870} * 3600 = \frac{0.2224\text{kgAgua}}{\text{m}^2 \text{ Hr}}$$

Este $R_{C_{teórico}}$, en vista de que utiliza una DTML, representa en realidad la velocidad *promedio* en todo el proceso de secado.

De acuerdo con los cálculos de velocidad de secado, el promedio de todas las velocidades es de:

$$R_{C_{práctico}} = \frac{0.26\text{kgAgua}}{\text{m}^2 \text{ Hr}}$$

Entonces

$$R_{C_{teórico}} < R_{C_{práctico}}$$

Si tal condición se da, entonces esto significa que se puede obtener el tiempo de secado, a partir de la fórmulas de tiempo de secado, si se hace el uso de la DTML en tales.

4.2.1.3. Cálculo del tiempo de secado

Lo último indica que el tiempo de secado puede predecirse utilizando la $R_{c_{teórica}}$, de modo que de acuerdo con la Ec.23 (véase pág. 35):

$$t_c = \frac{\frac{2368870J}{kg} * \frac{(0.7 - 0.1025)kg_{Agua}}{kg_{ss}} * 17.64kg_{ss}}{\frac{(2.67 + 3.34)J}{s * m^2C} * (0.54 * 2 * 7)m^2 * (26.15)^{\circ}C} = 6.27Horas$$

El tiempo total teórico para el proceso de secado es de 6.27 horas, y el práctico es de 5.86 horas. Esto permite concluir que la fuerza que impulsa la transferencia de calor es acertadamente la diferencia de temperatura media logarítmica, pues ésta representa la fuerza impulsora promedio que induce a la transferencia de energía.

Esto indica que la DTML permite calcular o de otra manera *predecir* el comportamiento promedio de las velocidades de secado y por lo tanto el tiempo de secado.

4.2.1.4. Cantidad de calor total

Se procede a describir 3 Métodos para el cálculo de la cantidad de calor total:

1. Método 1

Consiste en determinar la energía cedida por el vapor:

$$\begin{aligned} \text{Calor cedido} = \text{masa}_{vapor} * [(h_{g_{vapor}}165 - h_{g_{vapor}}100) + (h_{f_{cond}}100) \\ + (h_{f_{liq}}100 - h_{f_{liq}}75)] \end{aligned} \quad \text{Ec.25}$$

2. Método 2:

Consiste en determinar la cantidad de calor ganada por el aire, desde su temperatura de ingreso hasta la temperatura de calentamiento

$$\text{Calor ganado aire} = Ma * Cs * (T_{cal.} - T_{ini.}) * 3600 * \text{Tiempo_Practico} \quad \text{Ec.26}$$

3. Método 3

Consiste en determinar el calor sensible del producto, el calor latente de vaporización, el calor removido por el aire y el calor perdido hacia el ambiente (véase Ec.18, pág. 18).

$$\begin{aligned} \text{Calor Total requerido} = & \text{Calor removido}_{\text{aire}} + \text{Calor latente}_{\text{agua evaporada}} + \dots \\ & \dots + \text{Calor sensible} + \text{Calor perdido total} \end{aligned} \quad \text{Ec.27}$$

Donde:

$$\text{Calor removido}_{\text{aire}} = Ma * Cs * (T_{salida} - T_{ini.}) * 3600 * \text{Tiempo}_{\text{Práctico}} \quad \text{Ec.28}$$

$$\text{Calor latente}_{\text{agua evaporada}} = (M_{pi} - M_{pf}) * h_{fg} \quad \text{Ec.29}$$

$$\text{Calor sensible} = M_{pf} * C_p * (T_{salida} - T_{ini.}) \quad \text{Ec.30}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor perdido} = & h_{\text{promedio}} * \frac{A}{\text{pared}} * (T_w - T_{\text{ambiente}}) * \text{numero}_{\text{paredes}} * 3600 * \dots \\ & \dots * \text{Tiempo}_{\text{práctico}} \end{aligned} \quad \text{Ec.31}$$

Con esto se calculó la cantidad de calor total usando el Método 1 (véase Ec.25, pág.37):

Datos (véase Anexo N°5)

$$h_{g_{vapor}} 165^{\circ}C = 2763.5 \frac{KJ}{kg}; h_{g_{vapor}} 100^{\circ}C = 2676.1 \frac{KJ}{kg}; h_{f_{g_{cond}}} 100^{\circ}C = 2257 \frac{KJ}{kg};$$

$$h_{f_{liq}} 100^{\circ}C = 419.04 \frac{KJ}{kg}; h_{f_{liq}} 75^{\circ}C = 313.93 \frac{KJ}{kg}$$

$$Calor\ cedido = 55 * [(2763.5 - 2676.1) + (2257) + (419.04 - 313.93)]$$

$$Calor\ cedido = 1.34 * 10^5 KJ$$

4.2.1.5. Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador

Los resultados antes observados sirven de base para el desarrollo del programa que realiza cálculos teóricos de curvas de secado y cantidad de calor total.

SIMULADOR

A continuación explica brevemente el funcionamiento del simulador de *MatLab* codificado en archivo de extensión *.m.

El programa ejecuta sentencias en el siguiente orden:

1. Pedir datos de pesos y tiempos.
2. Cálculo de curvas de secado reales

3. Pedir datos, de masa inicial, temperatura de calentamiento del aire, etc., y las humedades del producto y su temperatura promedio, la masa de condensados y el tiempo práctico para desarrollar el cálculo de cantidad de calor total práctico según los Métodos 1 y 3.
4. Evaluar las propiedades del aire a temperatura pelicular y la entalpías del vapor de agua.
5. Cálculo del tiempo de secado y la velocidad.
6. Cálculo del tiempo total teórico y cálculo de curvas de secado teóricas.
7. Pedir datos de masa de condensado obtenido en la realidad.
8. Cálculo de la cantidad de calor total práctica.
9. Cálculo de la cantidad de calor teórica en base al tiempo teórico de secado, se pide la cantidad de calor disipada al ambiente (W/m^2) (véase Método 3).
10. Graficas de curvas de secado reales y teóricas.

Con esto, se procede a realizar la simulación, cuyos resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla como las gráficas de secado, reales y las teóricas.

Tabla 3. Resultados teórico-prácticos – Ensayo 2, Soya

PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	 %ERROR
Tiempo total (horas)	5.86	6.27	6.99
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -hr)	0.26	0.23	11.5
Calor total (KiloJoules)			
Método 1	1.3473x10 ⁵	-	-

Gráficas de secado reales y teóricas – Ensayo 2

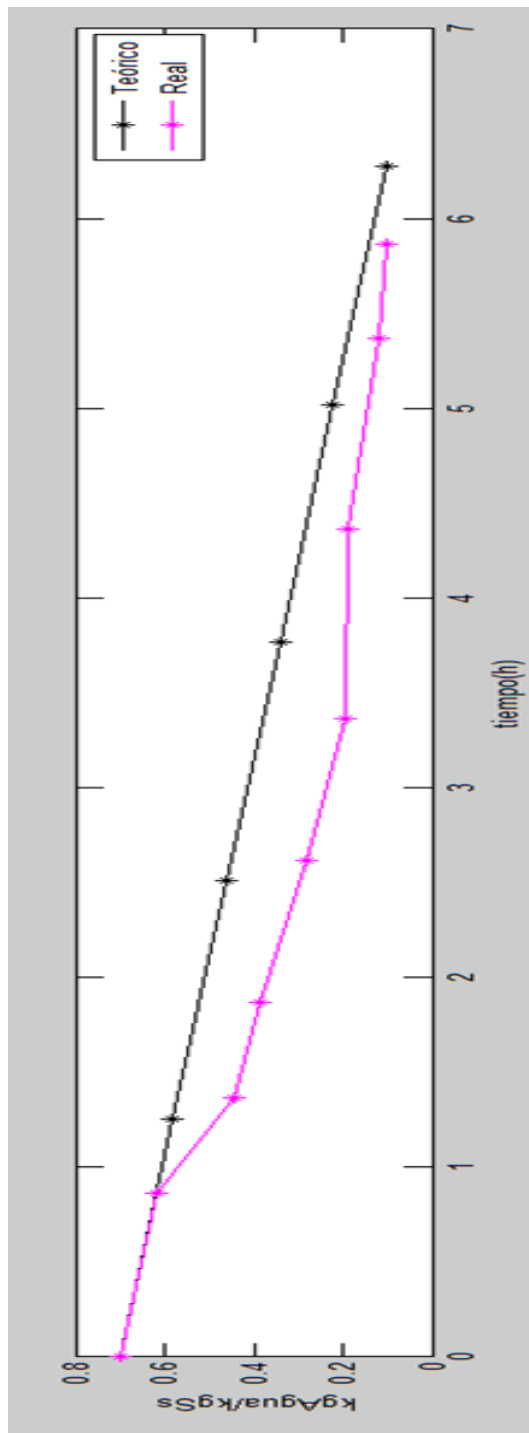


Figura 11. Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 2

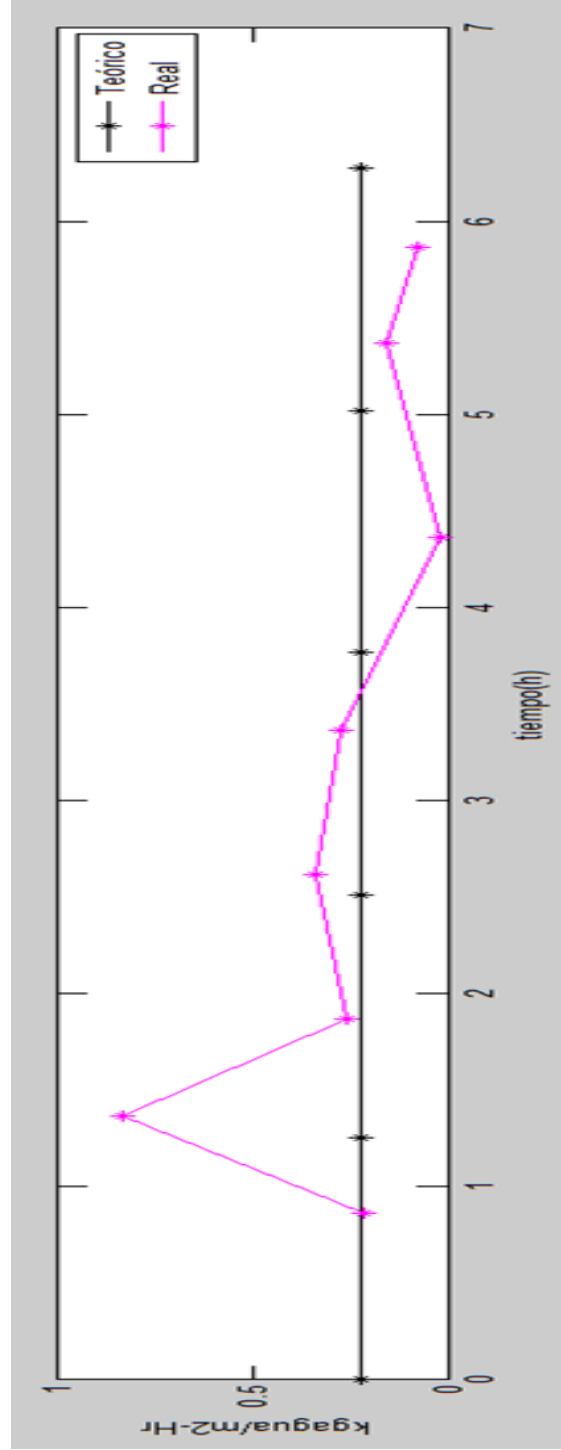


Figura 12. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 2

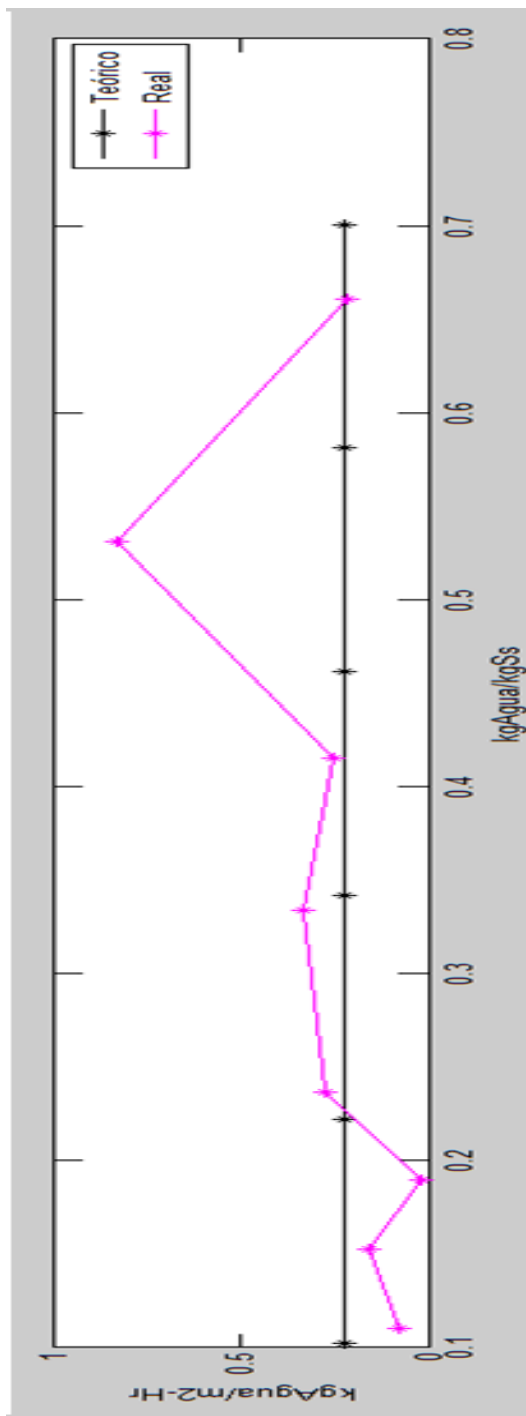


Figura 13. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs. Contenido de Humedad – Ensayo 2

4.2.1.6. Análisis de resultados

La Tabla 3 en los resultados obtenidos, se puede apreciar los parámetros de interés en la presente investigación, entre ellos está el Tiempo Total de deshidratación, el cual en forma experimental es de 5.86 horas, pero el teórico calculado, según se analizó anteriormente es de 6.27 horas, lo cual da lugar a un % de error del 6.99%, lo cual indica que existe una alta convergencia de los resultados teóricos con los datos reales.

Otro aspecto de interés es la velocidad de secado constante, la cual es, en realidad, la velocidad de secado *promedio* durante la operación; de la misma manera el valor experimental es de 0.26kgAgua/m²-Hr, pero el teórico es de 0.23kgAgua/m²-Hr (que se calculó utilizando un coeficiente global de transferencia de calor $U_k = 2.48\text{W/m}^2\text{°C}$), con un error del 11.5%, lo cual se debe a los bajos valores que maneja este parámetro.

Finalmente, el parámetro de Cantidad de Calor Total, en forma práctica se tiene un valor de $1.34 \cdot 10^5$ KJ, el cual es calculado a según lo establece el Método 1, sin embargo, no se pudo calcular el mismo en forma teórica ni práctica según el Método 3, pues no se disponía de velocidad de aire porque no estaba instalado el anemómetro.

Los gráficos de secado reales y teóricos, como en el caso de Contenido de humedad vs tiempo (Figura 11), muestran una tendencia muy similar, es más hasta se ve, al principio del tiempo que ambas gráficas coinciden en las reducciones del contenido de humedad, y terminan en el mismo contenido de humedad. En cambio las 2 gráficas últimas, de Velocidad de secado vs tiempo (Figura. 12), como de Velocidad de secado vs contenido de humedad (Figura 13), muestran apropiadamente que la velocidad de secado teórica corresponde a la tendencia promedio de las velocidades de secado reales.

(Para visualizar las gráficas de secado Reales y capturas del simulador para Cálculos de Tiempo de secado y Cantidad de calor Total, véase Anexo N°10 y Anexo N°11 respectivamente)

4.2.2. Ensayo 3

Tabla 4. Secado de Soya al 54% de humedad: 19 de Junio 2014

Tiempo (horas)	Peso (kg)	W (kgAgua/kgSs)	dt (horas)	dW (kgAgua/kgSs)	R(kgAgua/m ² -Hr)	Wmedia (kgAgua/kgSs)
0	9,996	1,2726				
0,5	9,661	1,1964	0,5	0,0762	0,0887	1,2345
1	8,136	0,8498	0,5	0,3466	0,4033	1,0231
1,5	7,061	0,6055	0,5	0,2444	0,2844	0,7276
2	6,477	0,4725	0,5	0,1330	0,1547	0,5390
2,5	6,043	0,3738	0,5	0,0987	0,1148	0,4232
3	5,717	0,2999	0,5	0,0739	0,0860	0,3369
3,5	5,107	0,1610	0,5	0,1389	0,1616	0,2305
4	5	0,1367	0,5	0,0243	0,0283	0,1489
4,5	4,916	0,1178	0,5	0,0189	0,0220	0,1273

Las gráficas de secado se presentan como sigue:

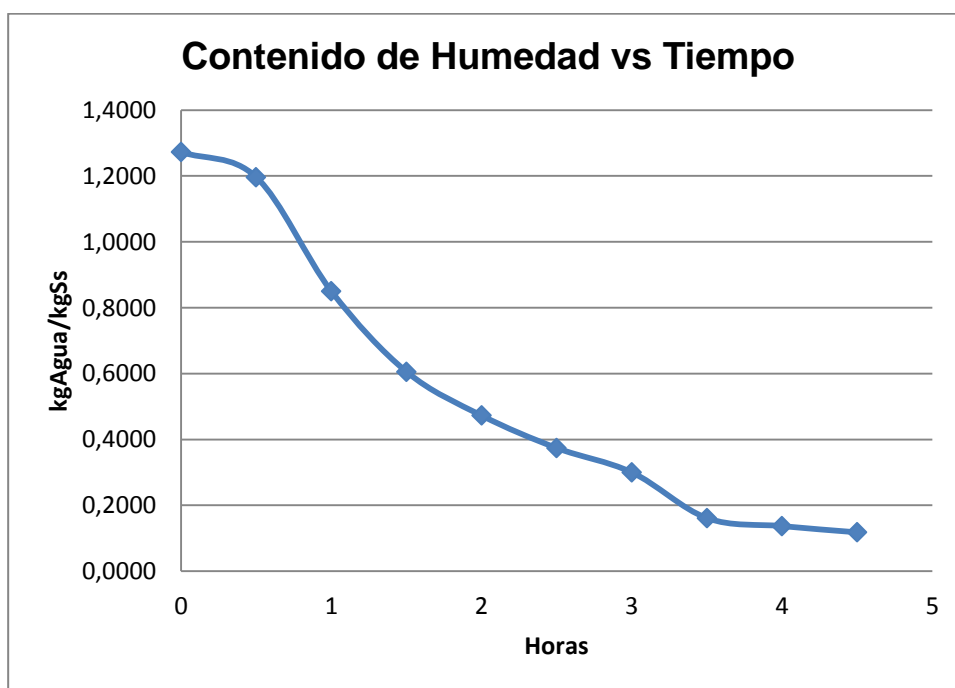


Figura 14. Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 3

En la Figura 14, se puede observar que la tendencia de los datos, de contenido de humedad, es a ser lineales pero a partir de las 2 horas las pendientes disminuyen paulatinamente, lo cual podría ser el comienzo del período decreciente.

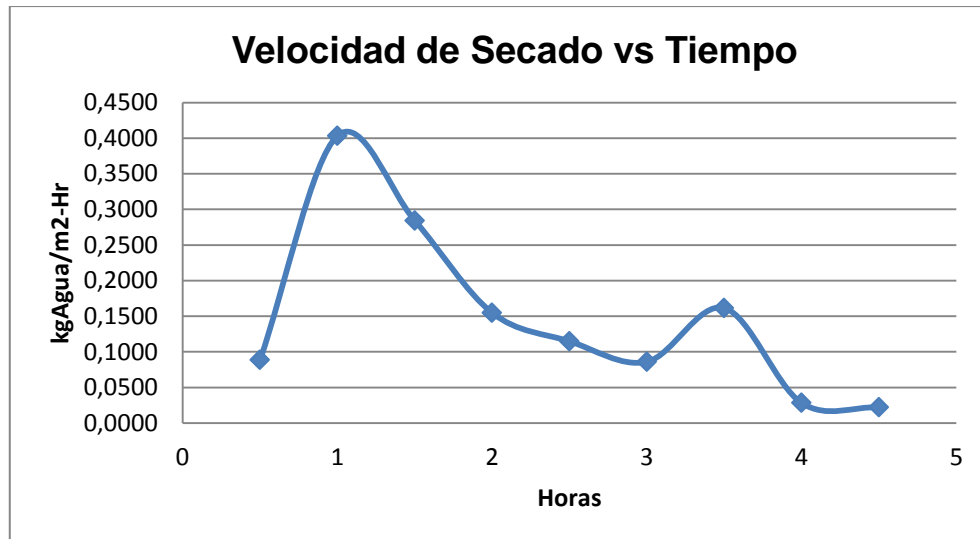


Figura 15. Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 3

En la Figura 15, se puede observar que la velocidad de secado experimenta un aumento, luego disminuye como si se tratara del período decreciente, pero a las 3.5 horas vuelve a experimentar un aumento, lo cual es posible indicio de que el período de secado constante permaneció hasta las 3.5 horas.

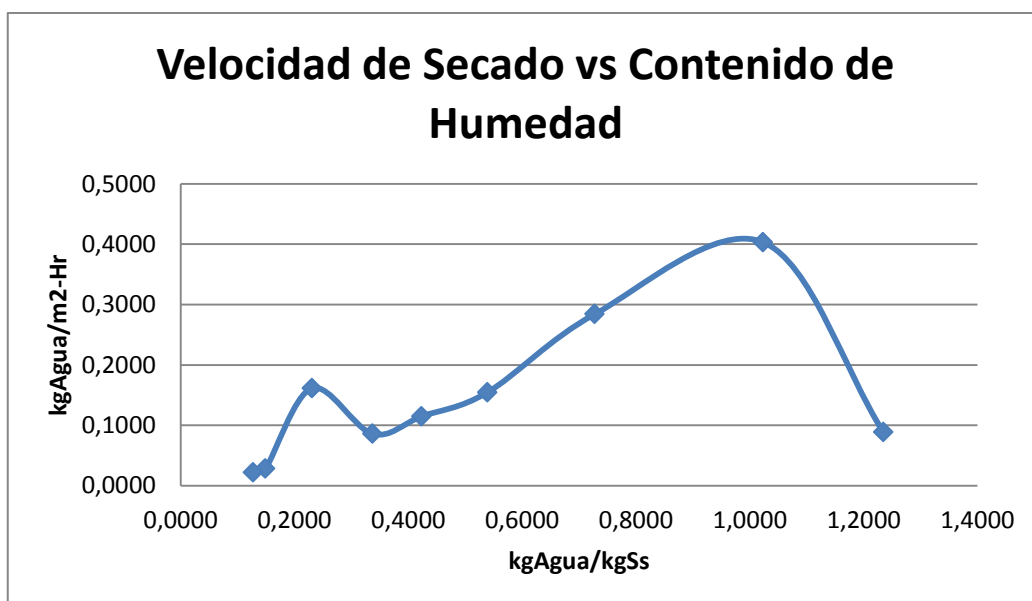


Figura 16. Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 3

La Figura 16, apoya lo deducido en la Figura 15, pues el proceso casi termina con un aumento en la velocidad de secado.

4.2.2.1. Análisis de datos

Se calcula inmediatamente la velocidad teórica de secado, a partir de la ΔTML que se calcula mediante la Ec.21 (pág.35; para los datos de proceso véase Anexo N°12 Tabla de datos de proceso N°3):

	Fluido "calefactor"= Aire	Sustancia "enfriadora"=alimento	ΔTML
Ti	64	29	14.52
Tf	59.6	55.4	

$$DTML = \frac{(59.6 - 55.4) - (64 - 29)}{\ln\left(\frac{59.6 - 55.4}{64 - 29}\right)} = 14.52^{\circ}C$$

Para soya seca, el $h_c=2.728W/m^2\text{ }^{\circ}C$, con una densidad de $875kg/m^3$ y un espesor de $0.005m$, el $U_k=2.505W/m^2\text{ }^{\circ}C$ (para los cálculos de estos parámetros véase Anexo N°13)

4.2.2.2. Cálculo de velocidad promedio de secado

Con la Ec.22 (véase pág. 35), se tiene:

$$R_{C_{teórico}} = \frac{(2.505 + 2.728)(14.52)}{2370700} * 3600 = \frac{0.1153kgAgua}{m^2 Hr}$$

De acuerdo con los cálculos de velocidad de secado, el promedio de todas las velocidades es de:

$$R_{C_{práctico}} = \frac{0.1493kgAgua}{m^2 Hr}$$

Entonces

$$R_{C_{teórico}} < R_{C_{práctico}}$$

Como el Rc teórico es menor al Rc práctico, se concluye que el secado se realizó totalmente bajo régimen “constante” puesto que la Rc teórica representa el promedio de las velocidades de secado, y como es menor entonces se puede emplear la fórmula de tiempo de secado constante (esto es así pues como la velocidad de secado constante es tan solo una línea horizontal, “se parece” a la tendencia media de las velocidades de secado practicas).

4.2.2.3. Cálculo del tiempo de secado

Lo anterior es prueba de que el secado se efectuó bajo régimen “constante” en su totalidad, pero para corroborar esto, se procede a calcular el tiempo de secado constante, a partir de la Ec.23 (véase pág. 35):

$$t_c = \frac{\frac{2373900J}{kg} * \frac{(1.27 - 0.11)kg_{Agua}}{kg_{ss}} * 4.39kg_{ss}}{\frac{(2.505 + 2.728)J}{s * m^2C} * (0.54 * 2 * 7)m^2 * (14.52)^{\circ}C} = 5.83Horas$$

El tiempo práctico es de 4.5 horas, pero el teórico es de 5.83 horas: esto permite ser concluyentes al tomar como fuerza impulsora a la DTML.

Además también se observó que si se cumple la condición

$$R_{C_{teórico}} < R_{C_{práctico}}$$

el fenómeno de secado se puede estimar utilizando la fórmula del tiempo de secado constante.

Observaciones

Esto indica que es posible estimar el promedio de las velocidades de secado, a partir de la DTML, pero ya que:

$$\overline{Rc_{pr\acute{a}ctica}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Ri}{n}$$

Pero también:

$$Rc_{te\acute{o}rica} = \frac{(Uk + hc)(DTML)}{hfg}$$

Si:

$$\overline{Rc_{pr\acute{a}ctica}} \sim Rc_{te\acute{o}rica}$$

Entonces:

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=n} Ri}{n} \sim \frac{(Uk + hc)(DTML)}{hfg}$$

Por tanto:

$$t = \frac{hfg * (Wi_{i=1} - Wf_{f=n}) * Ls}{(hc + Uk) * 2A * DTML}$$

4.2.2.4. Cantidad de calor total

Según el Método 1 (véase la Ec.25, pág. 37), se tiene lo siguiente tomando las entalpías de vapor empleadas en el ensayo anterior (véase pág.39) con una masa de condensados de 43.7kg (véase Anexo N°12):

$$\text{Calor cedido} = 43.7 * [(2763.5 - 2676.1) + (2257) + (419.04 - 313.93)]$$

$$\text{Calor cedido} = 1.07 * 10^5 \text{ KJ}$$

4.2.2.5. Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador

Inmediatamente se presentan en la siguiente tabla los resultados obtenidos por simulación y los prácticos:

Tabla 5. Resultados teórico-prácticos – Ensayo 3, Soya

PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	%ERROR
Tiempo total (horas)	4.5	5.82	29
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -Hr)	0.149	0.123	17
Calor total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	1.07x10 ⁵	-	-

Gráficas de secado reales y teóricas – Ensayo 3

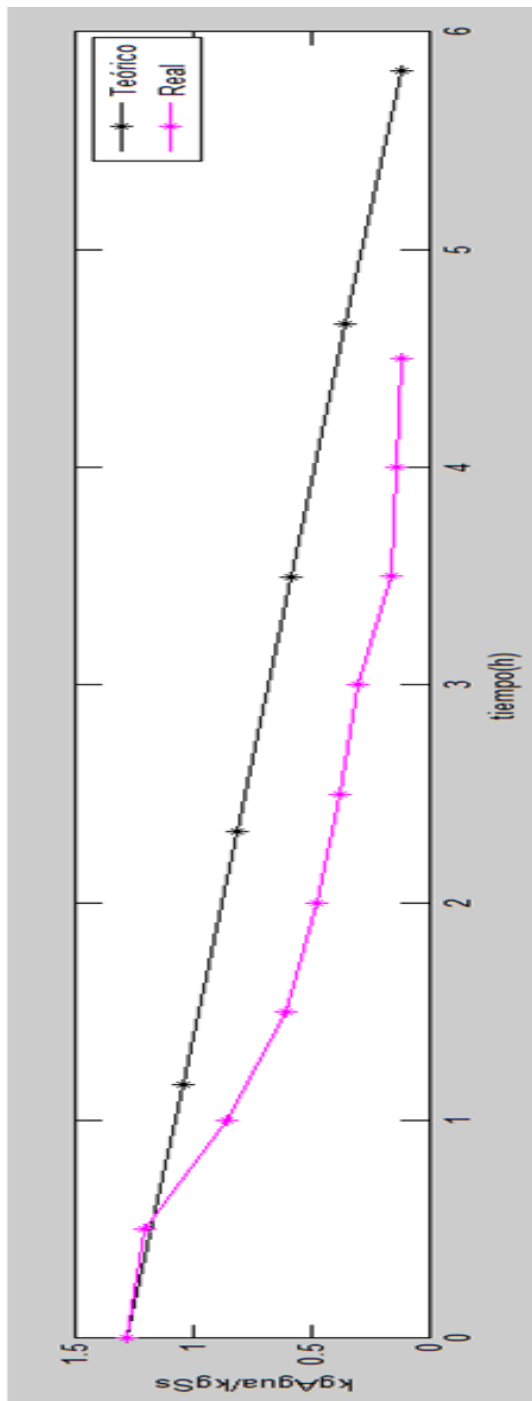


Figura 17. Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 3

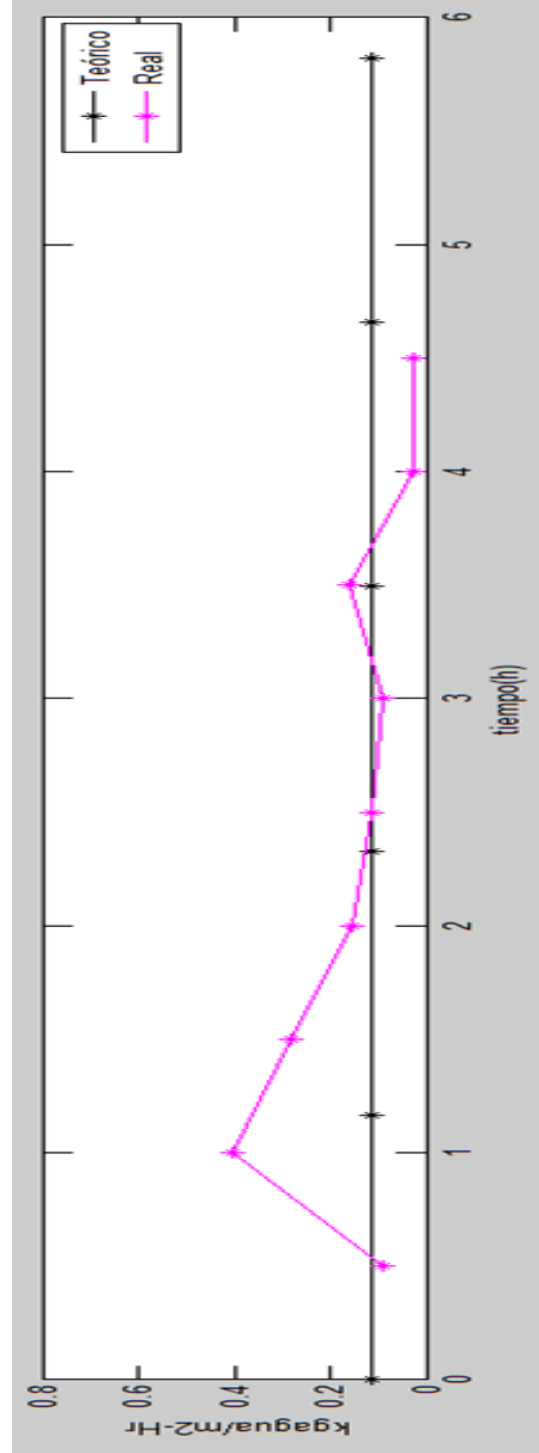


Figura 18. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 3

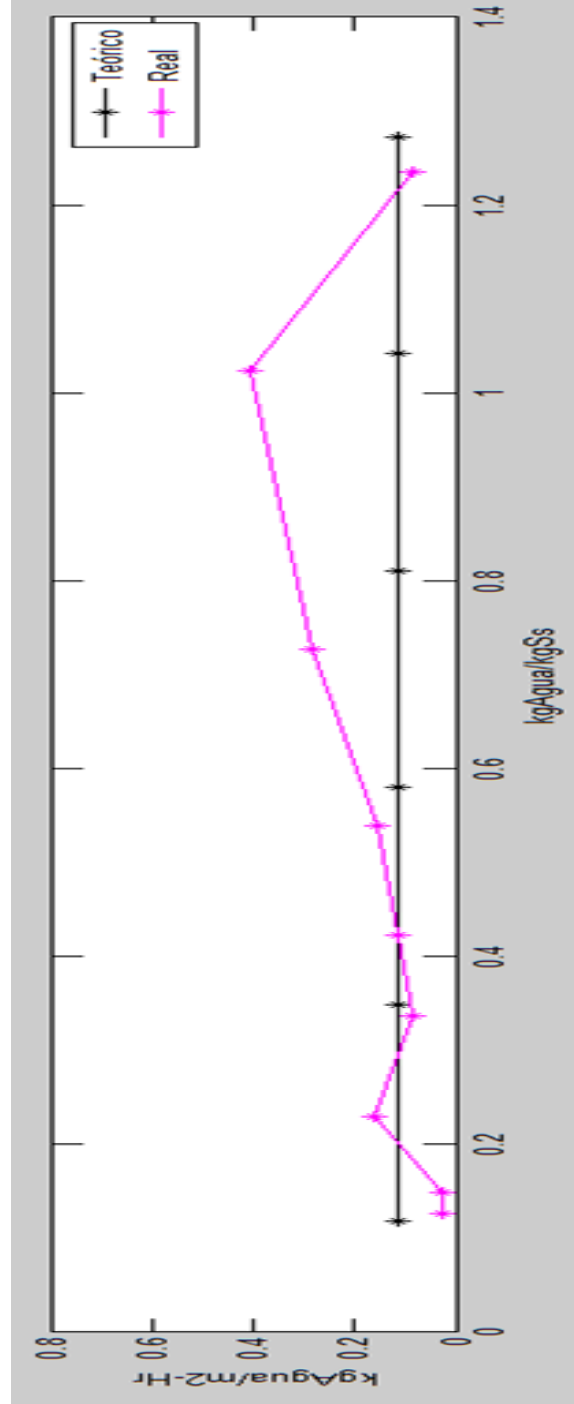


Figura 19. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 3

4.2.2.6. Análisis de resultados

La Tabla 5, muestra que el Tiempo Total de deshidratación, el cual en forma experimental es de 4.5 horas, en forma teórica calculado es de 5.82, lo cual da lugar a un % de error del 29%, sin embargo se debe tomar en cuenta la incidencia de la incertidumbre existente en las correlaciones para estimar los coeficientes de película, que generalmente es del 20 o 25%. (Holpman, 1998).

La velocidad de secado promedio experimental es de $0.149 \text{ kg Agua/m}^2\text{-Hr}$, pero el teórico es de $0.123 \text{ kg Agua/m}^2\text{-Hr}$ (el cual se basa en un coeficiente global de transferencia de calor $U_k = 2.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$), con un error del 17%.

Finalmente, el parámetro de Cantidad de Calor Total, en forma práctica se tiene un valor de $1.07 \cdot 10^5 \text{ KJ}$, el cual es calculado a según lo establece el Método 1, sin embargo, no se puede calcular el mismo en forma teórica ni práctica según el Método 3, pues no se dispone de velocidad de aire.

Los gráficos de secado reales y teóricos, como en el caso de Contenido de Humedad vs tiempo (Figura 17), muestran una tendencia muy similar, inclusive al principio del tiempo ambas gráficas, tanto la real como la teórica coinciden en las reducciones del contenido de humedad. En cambio las 2 gráficas últimas, de velocidad de secado vs Tiempo (Figura 18), como de velocidad de secado vs contenido de humedad (Figura 19), muestran apropiadamente que la velocidad de secado teórica corresponde a la tendencia promedio de las velocidades de secado reales.

(Para visualizar las gráficas de secado Reales y capturas del simulador para Cálculos de Tiempo de secado y Cantidad de calor Total, véase Anexo N°14 y Anexo N°15 respectivamente)

4.2.3. Ensayo 4

Tabla 6. Secado de Soya 52.19%: 23 Junio 2014

Tiempo (horas)	Pesos (kg)	W (kgAgua/kgSs)	dt (horas)	dW (kgAgua/kgSs)	R (kgAgua /m ² -Hr)	Wmedia (kgAgua/kgSs)
0	10,6092	1,09249				
0,5	9,3340	0,84098	0,5	0,25151	0,33735	0,96674
1	8,6280	0,70172	0,5	0,13926	0,18679	0,77135
1,5	7,8117	0,54072	0,5	0,16100	0,21595	0,62122
2	7,2135	0,42274	0,5	0,11798	0,15825	0,48173
2,5	6,8236	0,34583	0,5	0,07691	0,10316	0,38429
3	6,4731	0,27670	0,5	0,06913	0,09272	0,31127
3,5	6,3034	0,24324	0,5	0,03346	0,04488	0,25997
4	6,0607	0,19537	0,5	0,04787	0,06421	0,21931
4,5	5,9757	0,17861	0,5	0,01677	0,02249	0,18699
5	5,8030	0,14454	0,5	0,03406	0,04569	0,16158
5,5	5,7746	0,13895	0,5	0,00559	0,00750	0,14175

Las gráficas se muestran a continuación:

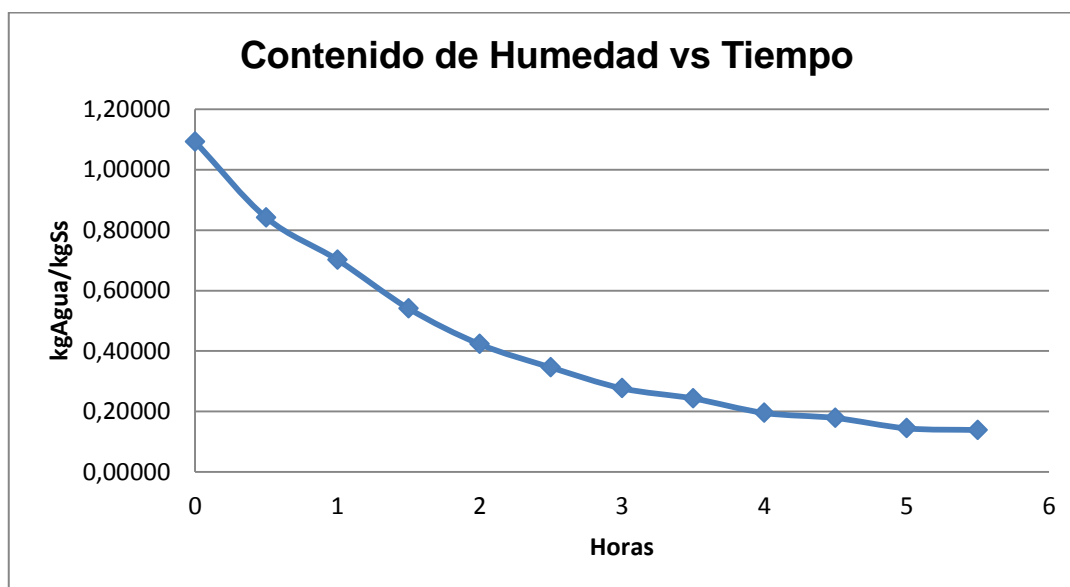


Figura 20. Contenido de humedad vs tiempo – Ensayo 4

En la Figura 20, se puede apreciar cómo se reduce el contenido de humedad conforme aumenta el tiempo en forma casi uniforme hasta las 1.5 o 2 horas de proceso, posteriormente las pendientes se hacen más pequeñas tomando esta forma como si se tratara del período de secado a velocidad decreciente.

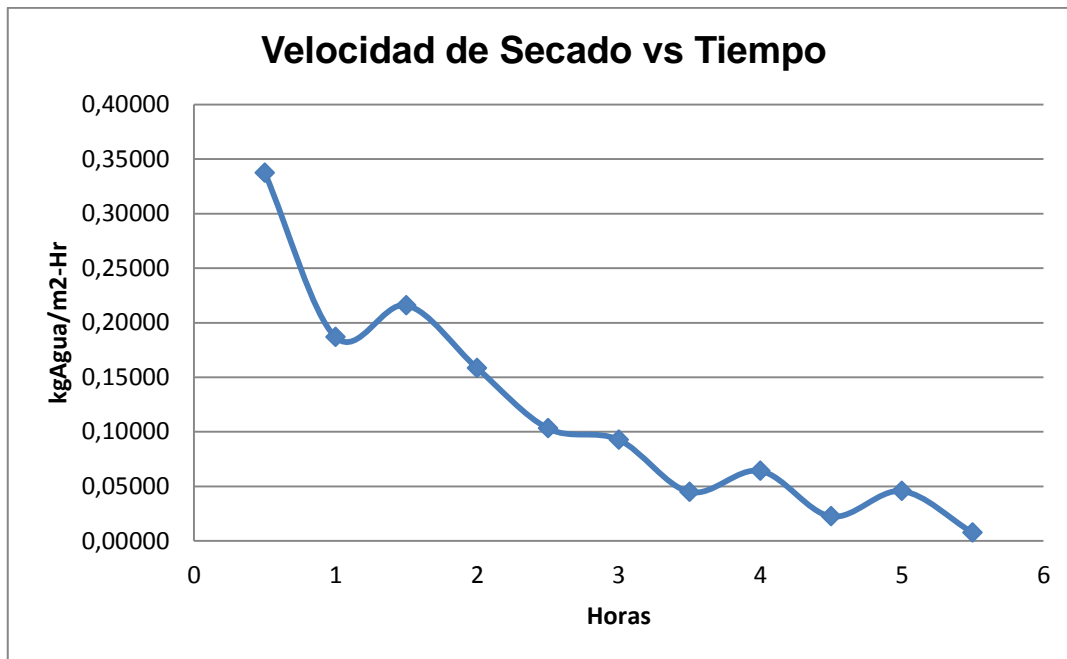


Figura 21. Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 4

La Figura 21, muestra las velocidades de secado: aquí se debe hacer hincapié en el hecho de las velocidades manifiestan un aumento, luego disminuyen, lo cual parecería la etapa de velocidad decreciente, pero luego vuelve a aumentar y nuevamente disminuye; estas fluctuaciones pueden estar indicando la presencia del período de secado constante, luego cuando las fluctuaciones cesan o al menos son muy pequeñas, puede tratarse como velocidad decreciente.

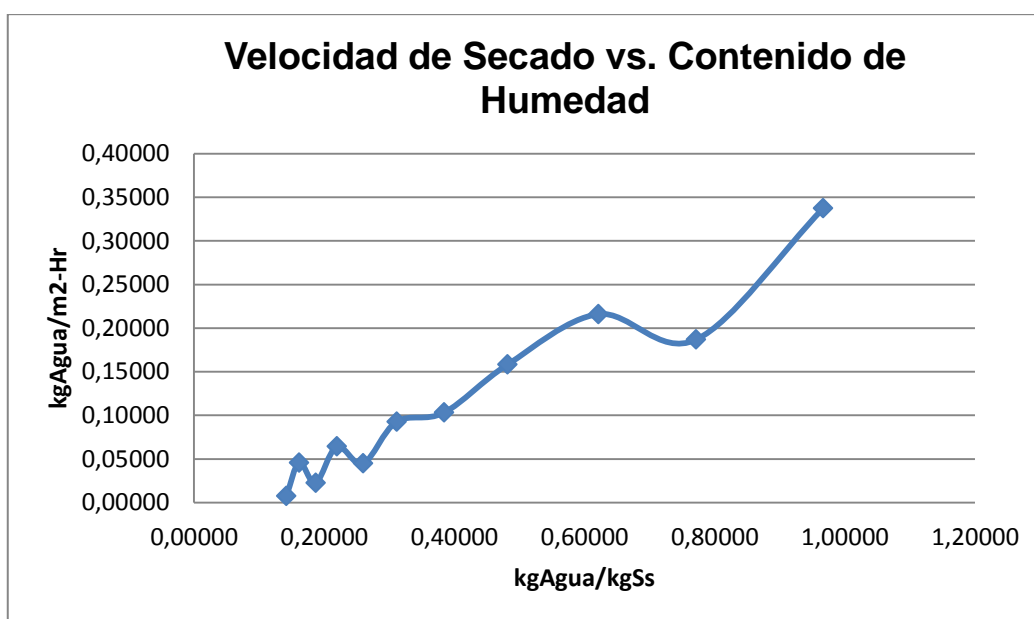


Figura 22. Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 4

La Figura 22, muestra las velocidades de secado como función del contenido de humedad, y se observa cómo la velocidad de secado disminuye conforme disminuye el contenido de humedad, y el comportamiento de la velocidad de secado es igual al señalado en la Figura 21.

Para los datos de proceso véase Anexo N°16 “Tabla de datos de proceso N°4”.

4.2.3.1. Análisis de datos

Se calcula inmediatamente la velocidad teórica de secado, a partir de la DTML (véase Ec.21, pág.35):

	Fluido “calefactor”= Aire	Sustancia “enfriadora”=alimento	DTML
Ti	62.58	29	13.90
Tf	58.67	54.67	

$$DTML = \frac{(58.67 - 54.67) - (62.58 - 29)}{\ln\left(\frac{58.67 - 54.67}{62.58 - 29}\right)} = 13.9^{\circ}\text{C}$$

Para soya al 3.8% de humedad con densidad de 875kg/m^3 y un espesor medio de 0.005m , el $hc=2.7\text{W/m}^2\text{C}$ y se tiene un $Uk=2.491\text{W/m}^2\text{C}$ (para los cálculos de estos parámetros véase Anexo N°17), el hfg a $54^{\circ}\text{C}=2370700\text{J/kg}$ (véase Anexo N°5).

4.2.3.2. Cálculo de velocidad constante de secado

Según la Ec.22 (véase pág. 35), se tiene lo siguiente:

$$R_{C_{teórico}} = \frac{(2.491 + 2.70)(13.90)}{2370700} * 3600 = \frac{0.1094\text{kgAgua}}{\text{m}^2 \text{Hr}}$$

De acuerdo con los cálculos de velocidad de secado, el promedio de todas las velocidades de secado es de:

$$R_{C_{pr\acute{a}ctico}} = \frac{0.116kgAgua}{m^2 Hr}$$

Entonces

$$R_{C_{te\acute{o}rico}} = R_{C_{pr\acute{a}ctico}}$$

Como el Rc teórico es menor al Rc práctico pero aun así son muy similares, se concluye que el tiempo de secado se puede calcular utilizando la fórmula de tiempo de secado constante.

4.2.3.3. Cálculo del tiempo de secado

De acuerdo con la Ec.23 (véase pág. 35):

$$t_c = \frac{\frac{2370700J}{kg} * \frac{(1.092 - 0.13895)kgAgua}{kgss} * 5.07kgSs}{\frac{(2.491 + 2.70)J}{s * m^2C} * (0.54 * 2 * 7)m^2 * (13.90)^{\circ}C} = 5.84Horas$$

El tiempo total práctico es de 5.5 horas, pero el teórico es de 5.84 Horas, lo cual produce un error del 9%: esto corrobora aún más la necesidad de tomar como fuerza impulsora a la DTML.

Observaciones

Se observó que si

$$R_{C_{te\acute{o}rico}} \cong R_{C_{pr\acute{a}ctico}}$$

el tiempo de secado se puede expresar y calcular con mucho acierto usando la fórmula de tiempo de secado a velocidad constante, mientras dicha condición se cumpla.

4.2.3.4. Cantidad de calor total

Según el Método 1 (véase Ec.25, pág.37) tomando las entalpías utilizadas anteriormente (véase pág. 39) para una masa de condensados de 38kg (véase Anexo N°16):

$$\text{Calor cedido} = 38 * [(2763.5 - 2676.1) + (2257) + (419.04 - 313.93)]$$

$$\text{Calor cedido} = 9.3 * 10^4 \text{ KJ}$$

4.2.3.5. Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador

Se muestra los resultados prácticos y los teóricos obtenidos por simulación:

Tabla 7. Resultados teórico-prácticos – Ensayo 4, Soya

PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	%ERROR
Tiempo total (horas)	5.5	5.84	6.1
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -Hr)	0.116	0.1094	5.68
Calor total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	9.30x10 ⁴	-	-

Gráficas de secado reales y teóricas – Ensayo 4

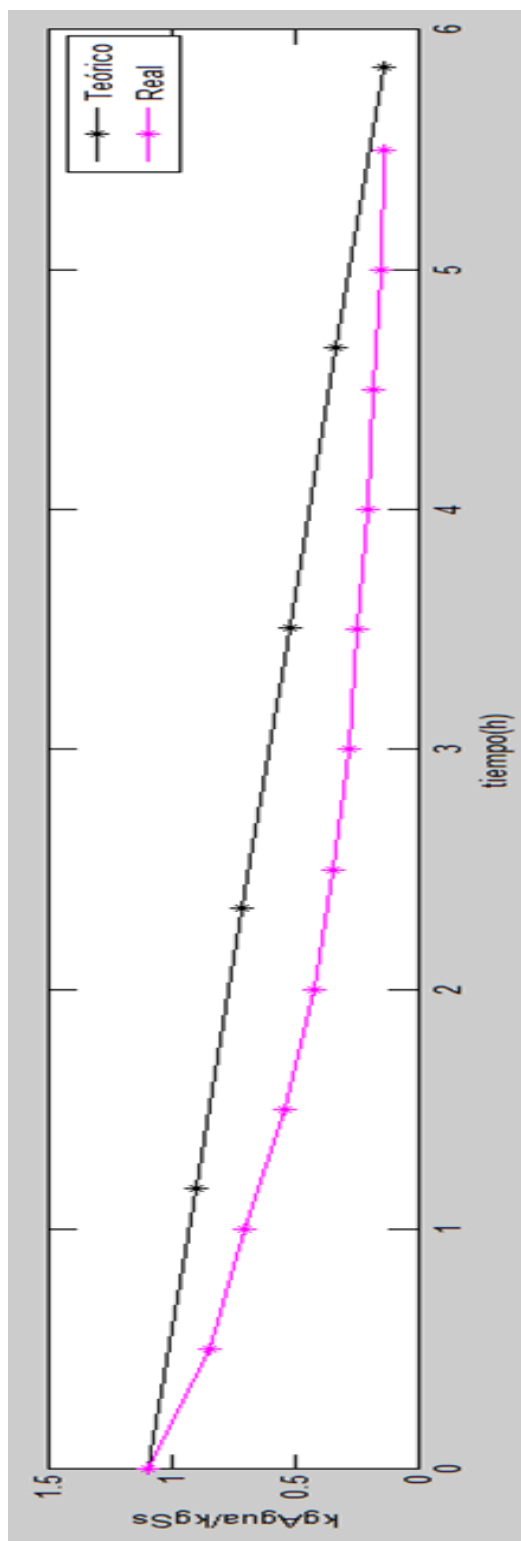


Figura 23. Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 4

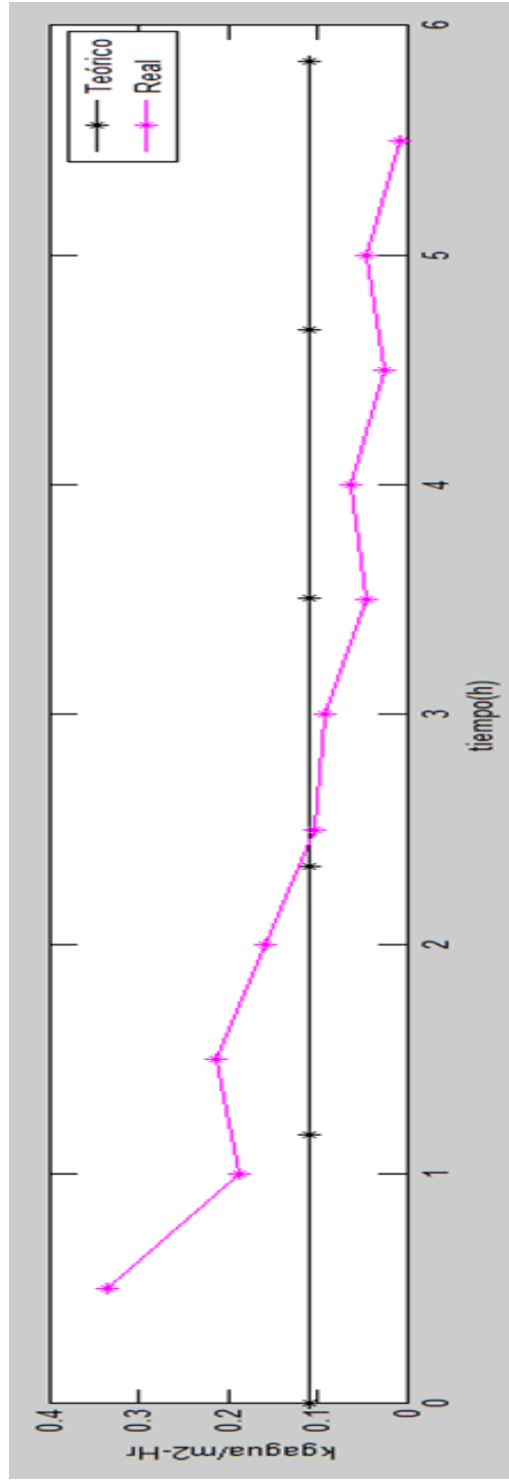


Figura 24. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 4

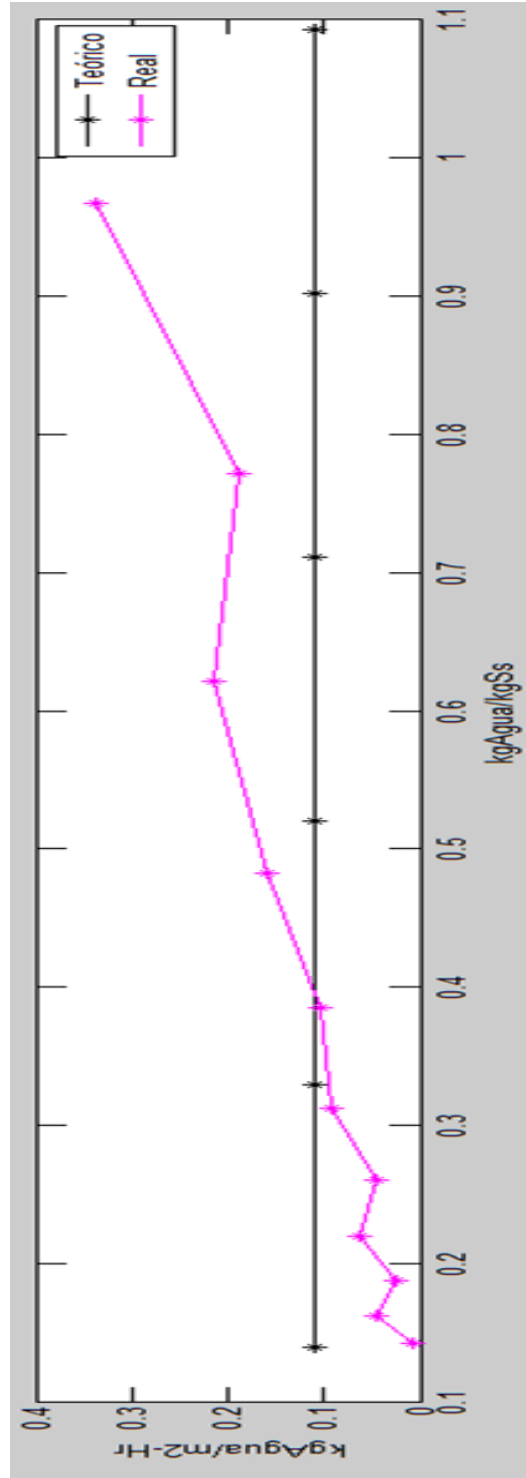


Figura 25. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 4

4.2.3.6. Análisis de Resultados

En la Tabla 7, los resultados del tiempo de secado práctico es de 5.5 horas y el calculado o teórico es de 5.84 horas con un error del 6.1%

La Velocidad promedio de secado es de $0.116 \text{ kgAgua/m}^2\text{-Hr}$ y la teórica es de $0.1094 \text{ kgAgua/m}^2\text{-Hr}$ (la cual usa un $U_k = 2.49 \text{ W/m}^2\text{°C}$), lo cual genera un error del 5.68%

En la cantidad de calor total, de acuerdo con el Método 1, el valor práctico es de $9.3 \cdot 10^4 \text{ KJ}$, aunque el porcentaje error no se puede determinar en vista de la velocidad del aire como dato faltante.

Con respecto a las gráficas de secado, la curva de Contenido de Humedad vs tiempo (Figura 23), tanto la real como la teórica ambas presentan esa tendencia a decrecer lógicamente la teórica es una línea recta inclinada pues se basa en la pendiente promedio de secado. Del mismo modo las 2 curvas restantes ponen de manifiesto el comportamiento real y teórico de la velocidad de secado vs tiempo (Figura 24) y vs el contenido de humedad (Figura 25) respectivamente; es claro que en estos 2 últimos casos la curva teórica es solamente una línea horizontal debido a que representa la velocidad *promedio* durante el proceso de deshidratación.

(Para visualizar las gráficas de secado Reales y capturas del simulador para Cálculos de Tiempo de secado y Cantidad de calor Total, véase Anexo N°18 y Anexo N°19 respectivamente)

Resumen de Resultados

En resumen, de acuerdo con los resultados teórico-prácticos de las tablas 1 al 3

el simulador arroja datos teóricos que en comparación con los prácticos tienen un error promedio del 12.7% lo cual es aceptable.

Observaciones adicionales

De los 3 últimos casos se obtuvo dificultad al colocar la estantería de las bandejas sobre la balanza, de modo que se decidió corregir esta dificultad mediante modificar las ruedas de la estantería, se las hizo removibles (véase Anexo N°20)

A continuación se construyó una estructura de acero inoxidable (véase Anexo N° 21) con platinas de 1"x1/4" que va ubicada sobre la balanza y se sujeta a ésta mediante pernos de acero inoxidable en 4 puntos de apoyo que además consta de 8 puntos de unión adicionales para dar firmeza a la estructura, y a su vez la estantería con las ruedas removidas se apoya sobre la estructura de acero inoxidable.

Consecuentemente, se procedió a desmontar el difusor con el objetivo de instalar los instrumentos de medición (véase Anexo N°22), tanto el anemómetro como el higrómetro.

Finalmente, se procedió a hacer arreglos finales al Secador de Bandejas Didáctico, concernientes a pintado con pintura de aluminio de alta temperatura (90°C), y otros detalles adicionales como la instalación de un gabinete pesado de 30cmx30cmx20cm que contiene a la pantalla de visualización de la balanza y de su medidor de temperatura (véase Anexo N°31)

4.3. Pruebas finales del secador didáctico y comparaciones con simulador con distintos tipos de granos

4.3.1. Ensayo 5

Los datos y cálculos efectuados para la obtención de curvas de secado son:

Tabla 8. Secado de choclo tierno: 28-29/Agosto/2014

Tiempos (horas)	Pesos (kg)	W(kgAgua/kgSs)	dt (horas)	dW (kgAgua/kgSs)	R(kgAgua/m ² -Hr)	Wmedia (kgAgua/kgSs)
0	16,77	2,444	0			
0,5	16,125	2,312	0,5	0,132	0,170	2,378
1	15,307	2,144	0,5	0,168	0,216	2,222
1,5	14,343	1,946	0,5	0,197	0,254	2,045
2	13,422	1,757	0,5	0,189	0,243	1,851
2,5	12,529	1,573	0,5	0,183	0,236	1,665
3	11,581	1,378	0,5	0,194	0,250	1,476
3,5	10,789	1,216	0,5	0,162	0,209	1,297
4	9,970	1,048	0,5	0,168	0,216	1,132
4,5	9,251	0,900	0,5	0,147	0,190	0,974
5	8,585	0,763	0,5	0,136	0,176	0,832
5,5	7,970	0,637	0,5	0,126	0,162	0,700
6	7,406	0,521	0,5	0,115	0,149	0,579
6,5	6,893	0,416	0,5	0,105	0,135	0,468
7	6,534	0,342	0,5	0,073	0,094	0,379
7,5	6,217	0,277	0,5	0,065	0,083	0,309
8	5,909	0,213	0,5	0,063	0,081	0,245
8,5	5,653	0,161	0,5	0,052	0,067	0,187
9	5,362	0,101	0,5	0,059	0,076	0,131
9,5	5,147	0,057	0,5	0,044	0,056	0,079
10	5,046	0,036	0,5	0,020	0,026	0,046
10,5	5,018	0,030	0,5	0,005	0,007	0,033

Los resultados análisis de humedad del laboratorio para los choclos son:

% de Humedad	Inicial	Final
	70%*	3%
* El balance parcial de sólidos sugiere que la humedad inicial es del 70%, en lugar del 67%; Ls=4.86kg Sólidos secos.		

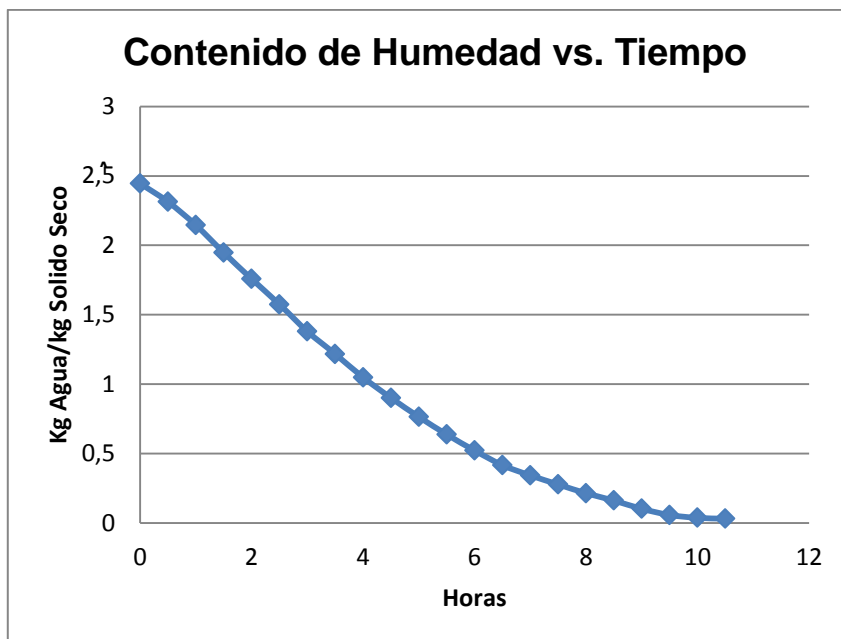


Figura 26. Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 5

La Figura 26 presenta la variación del contenido de humedad vs tiempo, se puede observar que al principio se muestran disminuciones cuasi-constantes, o la forma de la línea es cuasi-lineal inclinada dando una pauta sobre la duración del período de secado constante hasta aproximadamente 4 horas, el resto de la curva donde las variaciones del contenido de humedad se reducen conforme avanza el tiempo se identifica como período de secado a velocidad decreciente.

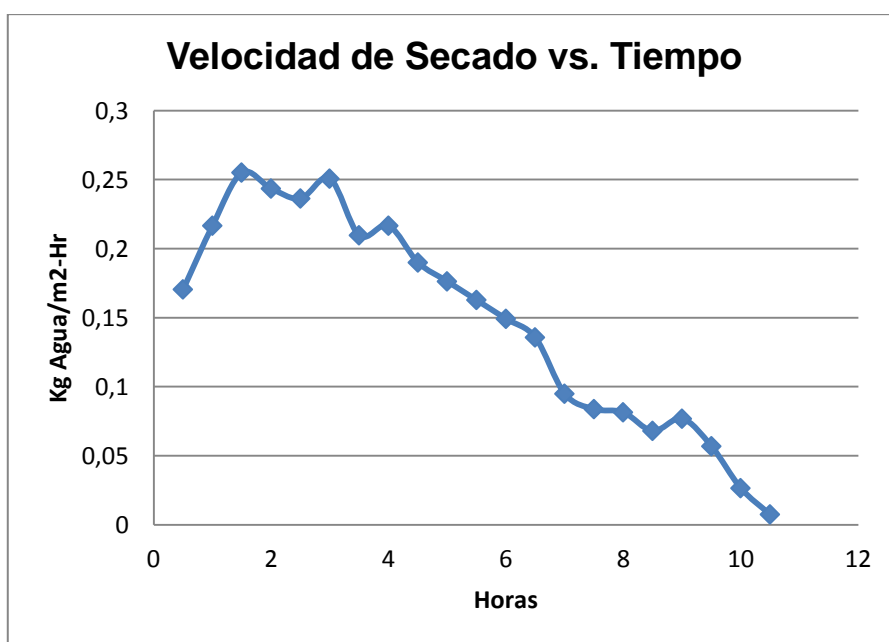


Figura 27. Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 5

En la Figura 27 se observa la velocidad de secado vs. Tiempo, donde se puede apreciar valores de velocidad muy similares al principio, pues se trata del período de velocidad constante o aquel lapso donde el sólido está cubierto por una fina mono capa de líquido que se evapora constantemente, los valores de velocidades se parecen mucho y coinciden con las variaciones cuasi-constantes del contenido de humedad. Como se ve, luego de las 4 horas, la velocidad comienza a reducirse sin superar su valor anterior o sea sólo se observa que solamente empieza a desacelerar, reconociéndose esto como el período de secado a velocidad decreciente.

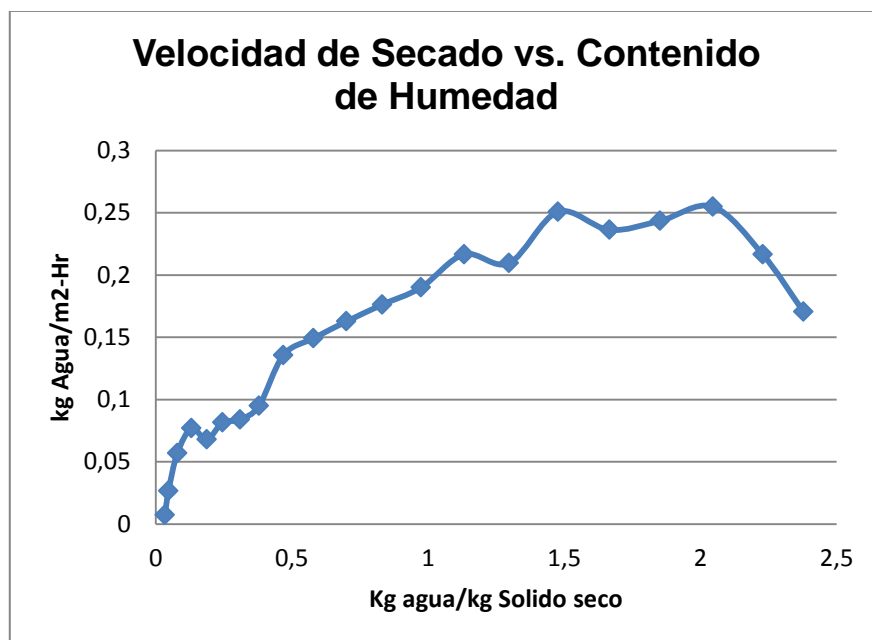


Figura 28. Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 5

En la Figura 28, se puede notar cómo la velocidad de secado se mantiene casi constante hasta un contenido de humedad medio de 1.037 kg agua/kg Sólido seco, luego de ello se visualiza una reducción de la velocidad de secado conforme se reduce el contenido de humedad dándose así a conocer el período de secado a velocidad decreciente.

Lo anterior sugiere que el período de secado a velocidad constante culmina a las 4 horas, con un contenido de humedad medio de 1.048 kg Agua/kg Sólido seco; el resto del tiempo está siendo gobernado por secado a velocidad decreciente. [A4](#)

4.3.1.1. Análisis de datos

Como antes, se requiere estimar la velocidad de secado promedio; para su cálculo se procede inmediatamente a determinar la DTML con la Ec.21 (véase pág. 35):

	Fluido "calefactor"= Aire	Sustancia "enfriadora"=alimento	ΔTML
Ti	82.78	29	22.92
Tf	77.33	70.35	

$$DTML = \frac{(77.33 - 70.35) - (82.78 - 29)}{\ln\left(\frac{77.33 - 70.35}{82.78 - 29}\right)} = 22.92^{\circ}C$$

A continuación se realizan los cálculos para determinar la densidad, la conductividad térmica del choclo, el coeficiente de convección y el coeficiente global de transferencia de calor, para luego calcular la velocidad promedio de secado.

4.3.1.2. Estimación del coeficiente global de transferencia de calor por conducción y convección

Para esto se requiere de la densidad y conductividad térmica del producto y del coeficiente de transferencia de calor por convección:

1. Densidad de choclo seco al 3% de humedad

Masa=480gr ; Volumen ocupado=1000 cc

$$\rho_{choclo} = \frac{480g}{1000cc} = 480 \frac{kg}{m^3}$$

2. Conductividad térmica del choclo al 3% de humedad (véase Ec.16, pág.18), los valores de las fracciones volumen de los principales componentes del choclo seco son:

$$\left(\frac{V_{agua}}{V}\right) = \frac{0.03}{1001/480} = 0.0143$$

$$\left(\frac{V_{sólidos}}{V}\right) = \frac{0.97}{1550/480} = 0.3003$$

$$\left(\frac{V_{aire}}{V}\right) = 1 - \left(\frac{V_{agua}}{V}\right) - \left(\frac{V_{sólidos}}{V}\right) = 1 - (0.0143 + 0.3003) = 0.6853$$

$$k_{ef} = 0.0777 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

3. Estimación del coeficiente de convección en el interior del secador h_c :

- Para las primeras 4 bandejas de arriba hacia abajo, velocidad del aire es nula; mecanismo dominante es la convección natural:

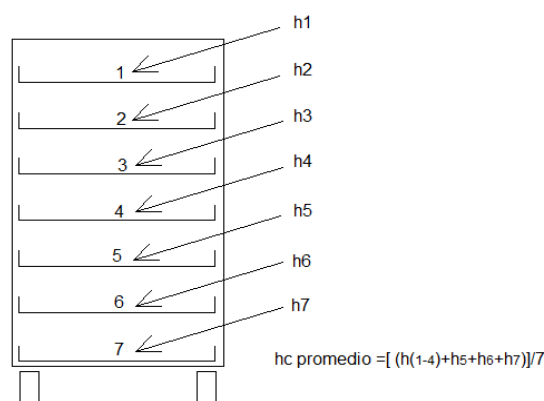


Figura 29. Coeficientes de Convección para Bandejas de Estantería

$$A = 0.9 * 0.6 = 0.54m^2$$

$$P = (0.9 + 0.6) * 2 = 3m$$

$$Dimensión_{característica} = \frac{A}{P} = \frac{0.54}{3} = 0.18m$$

Las propiedades del aire evaluadas a Tf, entre 82.78 y 70.35°C (véase Anexo N°1)

$$\begin{aligned} \mu_f &= 2.0978 * 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot seg}; k_f = 0.0288 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}; \rho_f = 1.0102 \frac{kg}{m^3}; c_{pf} \\ &= 1.0321 \frac{KJ}{kg \cdot ^\circ C} \end{aligned}$$

$$Pr_f = 0.7525$$

El número de Grashoft, se calcula como (véase Ec.9, pág.16):

$$Gr_{horizontal} = \frac{9.8}{273 + 82.78} * (82.78 - 70.35) * (1.0102^2) * (0.18^3) \\ = \frac{(2.0978 * 10^{-5})^2}{(2.0978 * 10^{-5})^2} = 4.63 * 10^6$$

El número de Rayleigh, según la Ec.13 (véase pág. 17):

$$Ra = Gr * Pr = 4.63 * 10^6 * 0.7525 = 3.4842 * 10^6$$

Se utiliza la correlación dada por la Ec.6 (véase pág. 16) para placa cara superior calentada:

$$Nu_{horizontal superior} = 0.27 * (3.4842 * 10^6)^{0.25} = 11.66$$

Despejando el h de la Ec.12 (véase pág. 17)

$$h_{horizontal superior} = Nu_{horizontal superior} = 11.66 * \frac{0.0288}{0.18}$$

$$h_{horizontal superior} = \frac{1.866W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Para placa cara inferior calentada, según la Ec.4 (véase pág. 16)

$$Nu_{horizontal inferior} = 0.54 * (3.4842 * 10^6)^{0.25} = 23.33$$

$$h_{horizontal inferior} = Nu_{horizontal inferior} = 23.33 * \frac{0.0288}{0.18}$$

$$h_{horizontal inferior} = \frac{3.73W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

$$h_{promedio 4 bandejas superiores} = \frac{h_{horizontal superior} + h_{horizontal inferior}}{2}$$

$$h_{promedio 4 bandejas superiores} = \frac{1.866 + 3.73}{2} = \frac{2.79W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- Para la 5ta. Bandeja de arriba hacia abajo; cuya velocidad media del aire es de 0.295m/seg.

$$Dimensión_{caracteristica} = 0.6m$$

El número de Reynolds, según la Ec.10 (véase pág. 16):

$$Re_L = \frac{0.295 * 1.0102 * 0.6}{2.0978 * 10^{-5}} = 8523.4$$

Criterio, Ec.7 (véase pág.16):

$$\frac{4.63 * 10^6}{8523.4^2} = 0.0637 < 10, \text{convección forzada importante}$$

Para placas planas horizontales a convección forzada, Ec.8 (véase pág.16):

$$Nu_5 = 0.664 * (8523.4)^{0.5} * \left(0.7525^{\frac{1}{3}}\right) = 55.75$$

Se despeja el h de la Ec.12 (véase pág.17):

$$h_5 = Nu_5 * \frac{k_f}{L} = 55.75 * \frac{0.0288}{0.6}$$

$$h_5 = \frac{2.67W}{m^2 \cdot C}$$

- Para la 6ta. Bandeja de arriba hacia abajo; cuya velocidad media del aire es de 0.2171m/seg.

$$Dimensión_{característica} = 0.6m$$

El número de Reynolds, Ec.10 (véase pág. 16):

$$Re_L = \frac{0.2171 * 1.0102 * 0.6}{2.0978 * 10^{-5}} = 6272.7$$

Criterio, Ec.7 (véase pág. 16):

$$\frac{4.63 * 10^6}{6272.7^2} = 0.1177 < 10, \text{convección forzada importante}$$

Se aplica la Ec.8 (véase pág. 16):

$$Nu_6 = 0.664 * (6272.7)^{0.5} * \left(0.7525^{\frac{1}{3}}\right) = 47.83$$

Se despeja el h de la Ec.12 (véase pág. 17)

$$h_6 = Nu_6 * \frac{k_f}{L} = 47.83 * \frac{0.0288}{0.6}$$

$$h_6 = \frac{2.29W}{m^2 \cdot C}$$

- Para la 7ma. Bandeja de arriba hacia abajo; cuya velocidad media del aire es de 0.58m/seg.

$$Dimensión_{característica} = 0.6m$$

Número de Reynolds, Ec.10 (véase pág. 16):

$$Re_L = \frac{0.58 * 1.0102 * 0.6}{2.0978 * 10^{-5}} = 16758$$

Criterio, la Ec.7 (véase pág. 16):

$$\frac{4.63 * 10^6}{16758^2} = 0.0165 \ll 10, \text{convección forzada importante}$$

Se aplica la Ec.8 (véase pág. 16):

$$Nu7 = 0.664 * (16758)^{0.5} * \left(0.7525^{\frac{1}{3}}\right) = 78.18$$

Despeje del h de la Ec.12 (véase pág. 17)

$$h7 = Nu7 * \frac{kf}{L} = 78.18 * \frac{0.0288}{0.6} = \frac{3.75W}{m^2 \cdot C}$$

Coefficiente medio de transferencia de calor por convección:

$$hc_{medio} = \frac{h_{1-4} + h5 + h6 + h7}{7}$$

$$hc_{medio} = \frac{(2.79 * 4) + 2.67 + 2.29 + 3.75}{7}$$

$$hc_{medio} = \frac{2.8436W}{m^2 \cdot C}$$

4. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor U_k (véase Ec.15, pág.18), el cual se representa en una bandeja esquemáticamente en la siguiente figura:

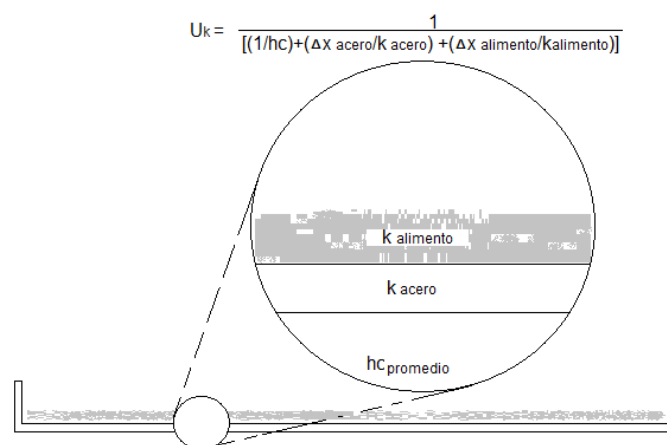


Figura 30. Coeficiente Global de Transferencia de Calor

$$h_{c_{medio}} = \frac{2.8436W}{m^2 \text{ } ^\circ C}; z_{metal} = \frac{0.7}{1000} m; z_{sólido} = \frac{4}{1000} m; k_{sólido} = \frac{0.0754W}{m \text{ } ^\circ C}$$

$$k_{acero} = \frac{54W}{m \text{ } ^\circ C} \text{ (Holpman, 1998) } \square$$

$$U_k = \frac{1}{\frac{1}{2.8436} + \frac{0.7/1000}{54} + \frac{4/1000}{0.0777}}$$

$$U_k = \frac{2.4806W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

4.3.1.3. Cálculo de velocidad promedio teórica de secado

Según la Ec.22 (véase pág. 35), se tiene:

$$R_{C_{teórico}} = \frac{(2.48 + 2.84)(22.92)}{2368870} * 3600 = \frac{0.18788kgAgua}{m^2 Hr}$$

Este valor corresponde al promedio de las velocidades hasta 7.5 horas con un $w=0.27kgAgua/kgSs$. Esto significa que se puede predecir el tiempo de secado con la fórmula de tiempo de secado a velocidad constante hasta dicho valor de humedad, pues anteriormente se estableció que “si

$$R_{C_{teórico}} \cong R_{C_{práctico}}$$

el tiempo de secado se puede expresar y calcular con mucho acierto usando la fórmula de tiempo de secado a velocidad constante, mientras dicha condición se cumpla.” (El autor, pág.59)

Observación

Si la $R_{c\text{teórico}} \neq R_{c\text{práctico}}$, como este caso a partir de $w=0.27\text{kgAgua/kgSs}$ en adelante, el $R_{c\text{práctico}}=0.05\text{kgAgua/m}^2\text{-Hr}$, entonces $R_{c\text{práctico}} \ll R_{c\text{teórico}}$. De modo que si $R_{c\text{práctico}} < R_{c\text{teórico}}$, entonces $R_{c\text{práctico}} = R_{d\text{práctico}}$, lo cual indica que se utilizaría la ecuación de tiempo de secado a velocidad “decreciente”. (Aquí la terminología “decreciente” alude a velocidades de secado menores al comportamiento promedio, y cuyo promedio es claramente menor a la velocidad promedio de secado práctica y/o teórica).

Tabla 9. Datos de proceso – Ensayo 5, Choclo tierno

SALIDA DEL AIRE		ENTRADA AIRE		CALENTAMIENTO		SECADOR		ANEMÓMETRO		CALDERO	
Tbh	Tbs	HR	Ting	T	P	T interna	T salida	Velocidad	P	Tgases	Thogar
27	41	50	33,4	86	40	61	62	2,52	92	240	879
30	49	46	34,8	86	40	64	74	2,7	100	190	928
30	51	44	35	86	40	67	75	2,72	92	230	867
29,5	51	43	36,1	86,5	40	68	76	2,65	100	275	936
29	50	43	35,5	86	40	68	76	2,67	92	250	879
29,5	50	42	36	86,5	40	69	77	2,77	92	230	865
30,5	52	40	37	87	40	69	78	2,7	104	210	950
30	51	40	36,4	86,5	40	70	78	2,82	108	280	1002
30	53	39	36,2	86,25	40	71	78	2,75	92	270	852
30	52,5	38	36,1	86	40	71	79	2,77	100	280	931
30	53	39	35,8	86	40	72	79	2,7	104	285	990
29,5	50	42	35,5	86	40	72	80	2,6	94	160	869
31	58	42	35	85	40	72	80	2,87	95	270	890
30	52	43	34,7	85	39	73	81	2,82	96	260	897
29	53	44	34,4	84,75	38	74	81	2,77	92	275	875
27,5	49	44	34,1	84	38	75	82	2,65	100	280	951
29	54	43	34	84	37	76	82	2,75	94	155	878
28	51	43	33,7	84	35	77	83	2,77	100	270	975
24	43	49	33	83	38	66	66	2,65	102	280	994
26	49	46	33,4	83,5	38	75	79	2,72	96	260	915
26	47	44	34,7	72	0	80	80	2,54	100	255	934
27	48	45	33,1	62	0	64	65	2,67	102	175	960
26,5	42,5	44	33,2	62	0	64	65	2,77	98	145	922
28,65	50,00	43,17	34,83	82,78	34,04	70,35	76,35	2,71	97,61	240,22	919,09

Peso de Condensados = 95.65kg

4.3.1.4. Aplicación de ecuaciones de predicción del tiempo de secado

Tiempo Constante, según la Ec.23 (véase pág. 35):

$$t_c = \frac{(2.44 - 0.27) * 2333800 * 4.86}{2 * 7 * 0.54 * ((2.48 + 2.84)(22.92))} = 7.41 \text{ Horas}$$

Tiempo Decreciente, según la Ec.24 (véase pág. 35):

$$t_d = \frac{4.86 \cdot 2333800 \cdot (0.27)}{2 * 0.54 * 7 \cdot (2.48 + 2.84)(22.92)} \ln \left[\frac{0.27}{0.0309} \right] = 2 \text{ horas}$$

El tiempo total teórico de deshidratación es de 7.41+2=9.41 horas.

4.3.1.5. Aplicación de ecuaciones para cálculo de la cantidad de calor total práctico

Método 1

La cantidad de calor total que se consumió en forma práctica se calcula según el Método 1 (véase Ec.25, pág.37); la masa de condensados es de 95.65kg (véase Tabla 9), con las entalpías de vapor (véase Anexo N°5, o pág.39):

$$\text{Calor cedido} = 95.65 * [(2763.5 - 2676.1) + (2257) + (419.04 - 313.93)]$$

$$\text{Calor total cedido} = 2.3516 * 10^5 \text{ KJ}$$

Método 2

Esto se puede corroborar calculando la cantidad de calor ganado por el aire durante todo el proceso: en vista de que se lo mantuvo siempre a 82.78°C (véase Tabla 9), se tiene:

Velocidad del flujo de aire fresco (V_a) = 2.72 m/s (véase Tabla 9)

Diámetro de medición (\emptyset) = 22 cm = 0.22 m

Temperatura media de ingreso del aire (T_a) = 34.83 (véase Tabla 9)

Constante R del aire = 287 Pa/m³(kg-K) (véase Anexo N°2)

La ecuación de gas ideal resulta ser:

$$P\dot{V} = \dot{M}RT \quad \text{Ec.32}$$

$$Caudal_{aire} = 3.1416 \left(\frac{22}{200} \right)^2 * 2.72 = \frac{0.103396 m^3}{seg}$$

Despejando el \dot{M} de la Ec.32:

$$Flujo\ mássico_{aire} = \frac{0.103396 m^3}{seg} * \frac{101350 Pa}{\frac{287 Pa}{m^3 kg K} * (273 + 34.83) K} = \frac{0.118 kg\ AireSeco}{seg}$$

El calor húmedo del aire se calcula, según la Ec.20 (véase pág. 21):

$$C_s = 1.005 + 1.88 * 0.015 = \frac{1.0332 KJ}{kg\ ^\circ C}$$

El calor ganado por el aire se calcula, según la Ec.26 (véase pág. 38):

$$\text{Calor ganado aire} = 0.118 * 1.0332 * (82.78 - 34.83) * 3600 * 10.5 = 2.22 * 10^5 \text{ KJ}$$

$$\text{Calor ganado aire} = 2.22 * 10^5 \text{ KJ}$$

Método 3

Nuevamente se hace un cálculo de la cantidad de calor utilizada para evaporar el agua del producto, elevar la temperatura del mismo y la energía que se lleva el aire a la salida además del calor perdido.

El calor removido por el aire es, según la Ec.28 (véase pág. 38), con una temperatura media de salida del aire de 76.35°C (véase Tabla 9):

$$\text{Calor removido}_{\text{aire}} = 0.118 * 1.033 * (76.35 - 34.83) * 3600 * 10.5$$

$$\text{Calor removido}_{\text{aire}} = 1.95 * 10^5 \text{ KJ}$$

El calor latente del agua evaporada es, según la Ec.29 (véase pág. 38), con calor latente de vaporización se toma a temperatura de vaporización del agua a 70.35°C, de 2333.8 KJ/kg (véase Anexo N°5), de:

$$\text{Calor latente}_{\text{agua evaporada}} = (16.77 - 5.013) * 2333.8 = 2.7438 * 10^4 \text{ KJ}$$

A continuación se procede a calcular el calor sensible del producto, con la Ec.30 (véase pág. 38), con una Tsalida de 70.35°C:

El cp del producto se calcula como:

$$C_p = \%solidos * C_{psolidos} + \%agua * C_{pagua} \quad \text{Ec.33}$$

$$C_p = 0.97 * 1.38 + 0.03 * 4.183 = 1.4641 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$Calor\ sensible = 5.013 * 1.4641 * (70.35 - 29)$$

$$Calor\ sensible = 303\ KJ$$

Calor perdido hacia el ambiente

En seguida se calcula la cantidad de calor perdida a ambiente desde las paredes del secador, tomándose en cuenta que el mecanismo que gobierna tal pérdida de energía es convección natural en 2 paredes horizontales y 4 paredes verticales.

En la siguiente figura se presentan las temperaturas de las paredes (vista del individuo que se coloca al frente del secador)

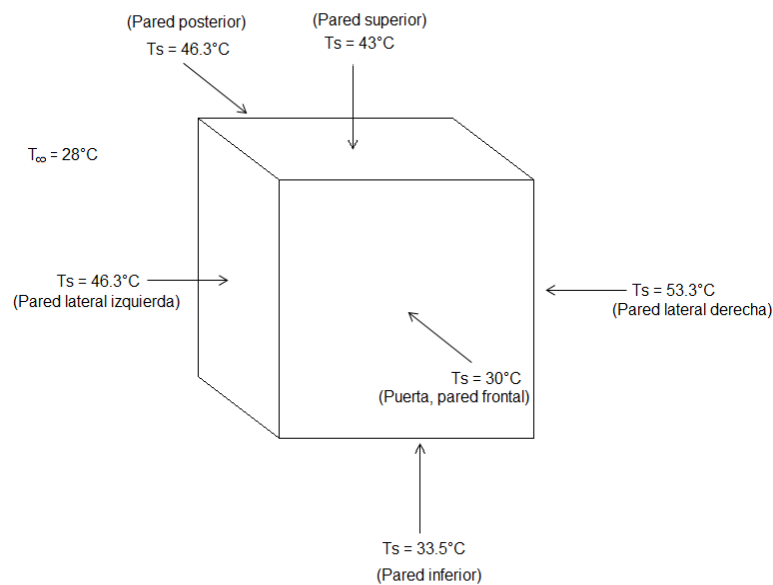


Figura 31. Temperaturas de las Paredes del Secador

En vista de que las temperaturas de las paredes son iguales sólo para la pared lateral izquierda y posterior se calculará el h_{ext} de uno de ellos y se multiplicará por 2, para las paredes restantes se harán los cálculos por separado para conocer el h_{ext} de cada uno de ellos.

PAREDES HORIZONTALES

Se indica que la dimensión característica para placas horizontales corresponde a (Holpman, 1998)

$$Dimensión_{característica} = \frac{\text{área}}{\text{perímetro}} = \frac{1.2^2}{(1.2 * 4)} = 0.3m$$

Pared superior: se encuentra a una temperatura media de 43°C, por lo que las propiedades evaluadas a temperatura pelicular ($T_f = 43+28/2=35.5^\circ\text{C}$) son (véase Anexo N°1):

$$\mu_f = 1.885 * 10^{-5} \frac{kg}{m - seg}; k_f = 0.0248843 \frac{W}{m^\circ C}; \rho_f = 1.1446 \frac{kg}{m^3};$$

$$c_{pf} = 1.006261 \frac{KJ}{kg^\circ C}; Pr_f = 0.7055$$

El número de Grashof, según la Ec.9 (véase pág. 16):

$$Gr_{horizontal} = \frac{9.8}{273 + 35.5} * (43 - 28) * (1.1446^2) * (0.3^3) \\ \frac{}{(1.885 * 10^{-5})^2} = 4.74 * 10^7$$

El número de Rayleigh, según la Ec.13 (véase pág. 17):

$$Ra_h = (4.74 * 10^7) * 0.7055 = 3.34 * 10^7$$

La correlación empírica para placas planas horizontales con cara superior enfriada expuesta a convección natural (véase Ec.5, pág.16)

$$Nu_{horizontal superior} = 0.15 * (3.34 * 10^7)^{\frac{1}{3}} = 48.33$$

Despejando el h de la Ec.12 (véase pág. 17), se tiene:

$$h_{horizontal superior} = \frac{Nu_{horizontal superior} * kf}{Dimensión_{caracteristica}} = 48.33 * \frac{0.0248843}{0.3} = \frac{4.00957W}{m^2 \cdot C}$$

Pared inferior: se encuentra a una temperatura media de 33.5°C, por lo que las propiedades evaluadas a temperatura pelicular ($T_f = 33.5 + 28/2 = 30.75^\circ C$) son (véase Anexo N°1):

$$\mu_f = 1.86336 * 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot seg}; kf = 0.02652 \frac{W}{m \cdot C}; \rho_f = 1.1625 \frac{kg}{m^3}$$

$$cpf = 1.005947 \frac{KJ}{kg \cdot C}; Prf = 0.706689$$

El número de Grashof, según la Ec.9 (véase pág. 16):

$$Gr_{horizontal} = \frac{\frac{9.8}{273 + 30.75} * (33.5 - 28) * (1.1625^2) * (0.3^3)}{(1.86336 * 10^{-5})^2} = 1.86 * 10^7$$

El número de Rayleigh, según la Ec.13 (véase pág. 17):

$$Ra_h = (1.86 * 10^7) * 0.706689 = 1.3178 * 10^7$$

La correlación empírica para placa plana horizontal con cara inferior enfriada expuesta a convección natural (véase Ec.6, pág.16):

$$Nu_{horizontal inferior} = 0.27 * (1.3178 * 10^7)^{\frac{1}{4}} = 16.26$$

Despejando el h de la Ec.12 (véase pág. 17), se tiene:

$$h_{horizontal inferior} = \frac{Nu_{horizontal inferior} * k_f}{Dimensión_{característica}} = 16.26 * \frac{0.02652}{0.3} = \frac{1.43W}{m^2°C}$$

PAREDES VERTICALES

Para placas verticales expuestas a convección natural, la correlación utilizada es (Holpman, 1998):

$$Nu = C * Ra^m \quad \text{Ec.34}$$

$$Dimensión_{característica} = altura = 1.2m$$

Paredes lateral izquierda y posterior: Las paredes se encuentran a una temperatura media de 46.3°C; las propiedades del aire a temperatura pelicular ($T_f = 46.3 + 28/2 = 37.25°C$) son (véase Anexo N°1):

$$\mu_f = 1.89196 * 10^{-5} \frac{kg}{m - seg}; k_f = 0.027016 \frac{W}{m°C}; \rho_f = 1.1382 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_{pf} = 1.00636 \frac{KJ}{kg°C}; Pr_f = 0.70476$$

Cálculo del Número de Grashoft, según la Ec.9 (véase pág. 17):

$$Gr_{vertical} = \frac{\frac{9.8}{273 + 37.25} * (46.3 - 28) * (1.1382^2) * (1.2^3)}{(1.89196 * 10^{-5})^2} = 3.6151 * 10^9$$

Número de Rayleigh, con la Ec.13 (véase pág. 17):

$$Ra_v = (3.6151 * 10^9) * 0.70476 = 2.5477899 * 10^9$$

Con este valor de Ra, los coeficientes C y m son respectivamente 0.1 y 1/3 (Holpman, 1998), se utiliza entonces la Ec.34 (véase pág. 84):

$$Nu_{vertical} = 0.1 * (2.5477899 * 10^9)^{\frac{1}{3}} = 136.58$$

Se despeja el h de la Ec.12 (véase pág. 17):

$$h_{vertical} = \frac{Nu_{vertical} * kf}{Dimensión_{caracteristica}} = 136.58 * \frac{0.027016}{1.2} = \frac{3.07487W}{m^2 \cdot C}$$

Pared frontal (puerta): se encuentra a una temperatura media de 30°C; las propiedades del aire a temperatura pelicular ($T_f = 30 + 28/2 = 29^\circ C$) son (véase Anexo N°1):

$$\mu_f = 1.8553 * 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot seg}; kf = 0.02639 \frac{W}{m^2 \cdot C}; \rho_f = 1.1382 \frac{kg}{m^3}$$

$$cp_f = 1.005832 \frac{KJ}{kg \cdot ^\circ C}; Pr_f = 0.70708$$

Cálculo del Número de Grashoft, según la Ec.9 (véase pág. 16):

$$Gr_{vertical} = \frac{\frac{9.8}{273 + 29} * (30 - 28) * (1.1693^2) * (1.2^3)}{(1.8553 * 10^{-5})^2} = 4.45 * 10^8$$

Número de Rayleigh, con la Ec.13 (véase pág. 17):

$$Ra_v = (4.45 * 10^8) * 0.70708 = 3.1499 * 10^8$$

Con este valor de Ra, los coeficientes C y m son respectivamente 0.021 y 2/5 (Holpman, 1998), se utiliza entonces la Ec.34 (véase pág. 84):

$$Nu_{vertical} = 0.021 * (3.1499 * 10^8)^{\frac{2}{5}} = 52.66$$

Se despeja el h de la Ec.12 (véase pág. 17):

$$h_{vertical} = \frac{Nu_{vertical} * kf}{Dimensión_{característica}} = 52.66 * \frac{0.02639}{1.2} = \frac{1.158W}{m^2 \cdot C}$$

Pared lateral derecha: se encuentra a una temperatura media de 53.3°C; las propiedades del aire a temperatura pelicular ($T_f = 53.3 + 28/2 = 40.65^\circ C$) son (véase Anexo N°1):

$$\mu_f = 1.908662 * 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot seg}; kf = 0.02727 \frac{W}{m^2 \cdot C}; \rho_f = 1.1258 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_{pf} = 1.0066 \frac{KJ}{kg \cdot ^\circ C}; Pr_f = 0.7045$$

Cálculo del Número de Grashoff, según la Ec.9 (véase pág. 16):

$$Gr_{vertical} = \frac{9.8}{273 + 40.65} * (53.3 - 28) * (1.1258^2) * (1.2^3) \\ = \frac{(1.908662 * 10^{-5})^2}{1.2} = 4.75 * 10^9$$

Número de Rayleigh, con la Ec.13 (véase pág. 17):

$$Ra_v = (4.75 * 10^9) * 0.7045 = 3.348 * 10^9$$

Con este valor de Ra, los coeficientes C y m son respectivamente 0.10 y 1/3 (Holpman, 1998), se utiliza entonces la Ec.34 (véase pág. 84):

$$Nu_{vertical} = 0.1 * (3.348 * 10^9)^{1/3} = 149.59$$

Se despeja el h de la Ec.12 (véase pág. 17):

$$h_{vertical} = \frac{Nu_{vertical} * kf}{Dimensión_{caracteristica}} = 149.59 * \frac{0.02727}{1.2} = \frac{3.3996W}{m^2 \cdot C}$$

Calor perdido por paredes

- Pared superior:

El calor perdido se calcula, según la Ec.31 (véase pág. 38), como:

$$Calor\ perdido_p = 4.00957 * \frac{(1.2)^2}{pared} * (43 - 28) * 1\ pared * 3600 * \frac{10.5}{1000}$$

$$Calor\ perdido = 3273.73\ KJ$$

- Pared inferior:

El calor perdido se calcula, según la Ec.31 (véase pág. 38), como:

$$\text{Calor perdido}_p = 1.43 * \frac{(1.2)^2}{\text{pared}} * (33.5 - 28) * 1 \text{ pared} * 3600 * \frac{10.5}{1000}$$

$$\text{Calor perdido} = 428.10 \text{ KJ}$$

- Paredes lateral izquierda y posterior:

El calor perdido se calcula, según la Ec.31 (véase pág. 38), como:

$$\text{Calor perdido}_p = 3.07487 * \frac{(1.2)^2}{\text{pared}} * (46.3 - 28) * 2 \text{ paredes} * 3600 * \frac{10.5}{1000}$$

$$\text{Calor perdido} = 6125.79 \text{ KJ}$$

- Pared frontal (puerta):

El calor perdido se calcula, según la Ec.31 (véase pág. 38), como:

$$\text{Calor perdido}_p = 1.158 * \frac{(1.2)^2}{\text{pared}} * (30 - 28) * 1 \text{ pared} * 3600 * \frac{10.5}{1000}$$

$$\text{Calor perdido} = 126.064 \text{ KJ}$$

- Pared lateral derecha:

El calor perdido se calcula, según la Ec.31 (véase pág. 38), como:

$$\text{Calor perdido}_p = 3.3996 * \frac{(1.2)^2}{\text{pared}} * (53.3 - 28) * 1 \text{ pared} * 3600 * \frac{10.5}{1000}$$

$$\text{Calor perdido} = 4681.68 \text{KJ}$$

El calor perdido por cada pared suma:

$$\text{Calor perdido total} = \text{calores perdidos}$$

$$\text{Calor perdido total} = 3273.73 + 428.10 + 6125.79 + 126.064 + 4681.68 = \mathbf{1.46 * 10^4 \text{ KJ}}$$

CÁLCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL TOTAL DEL TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor perdido total es de 14635.37 KJ durante todo el proceso, de modo que si se desea conocer la velocidad de transferencia de calor por unidad de área, se tiene:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{14635}{1.44 * 6} * \frac{1000}{3600 * 10.5} = 44.81 \frac{W}{m^2}$$

El coeficiente global total de transferencia de calor que encierra el sistema ambiente interno del secador – pared compuesta secador – ambiente externo secador y que se representa esquemáticamente en la figura 32:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U_{\text{global total}} * (T_{\infty \text{ interno}} - T_{\infty \text{ externo}})$$

Reordenando:

$$\frac{\frac{\dot{Q}}{A}}{(T_{\infty \text{ interno}} - T_{\infty \text{ externo}})} = U_{\text{global total}}$$

Donde

$$T_{\infty \text{ interno}} = 82.78^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\infty \text{ externo}} = 28^{\circ}\text{C}$$

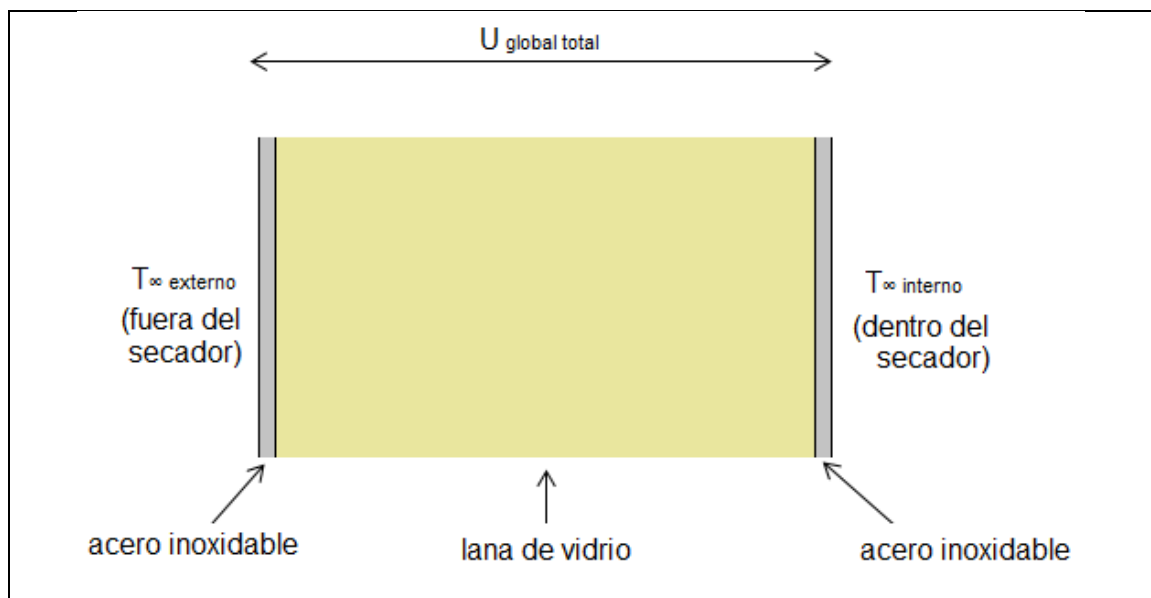


Figura 32. Coeficiente Global Total de Transferencia de Calor

Entonces:

$$U_{\text{global total}} = \frac{\frac{44.81\text{W}}{\text{m}^2}}{(82.78 - 28)^{\circ}\text{C}} = 0.818 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$$

Este valor de coeficiente global total de transferencia de calor se utilizará como referencia para ensayo posterior.

Entonces la cantidad de calor práctica, según la Ec.27, es:

$$\mathbf{Calor\ Total\ requerido = 1.95 * 10^5 + 2.7438 * 10^4 + 303 + 1.46 * 10^4}$$

$$\mathbf{Calor\ Total\ requerido = 2.374 * 10^5\ KJ}$$

4.3.1.6. Estimación de la cantidad de calor requerida teóricamente

La cantidad de calor requerida en teoría es como sigue, tomando como base el último método (véase Método 3, Ec.27 pág.38) expuesto para evaluar la cantidad de calor práctica.

Se hace un cálculo de la cantidad de calor utilizada para evaporar el agua del producto, elevar la temperatura del mismo y la energía que se lleva el aire a la salida además del calor perdido.

$$\begin{aligned} \mathit{Calor\ removido}_{\mathit{aire}} &= \mathit{Ma} * \mathit{Cs} * (\mathit{T}_{\mathit{salida}} - \mathit{T}_{\mathit{ini.}}) * 3600 * \dots \\ &\dots * \mathit{T}_{\mathit{tiempo\ Teórico}} \dots \dots \dots \text{Ec.35} \end{aligned}$$

La temperatura media de salida del aire es de 76.35°C, y con la Ec.35, que se tiene lo siguiente:

$$\mathit{Calor\ removido}_{\mathit{aire}} = 0.118 * 1.033 * (76.35 - 34.83) * 3600 * 9.41$$

$$\mathbf{Calor\ removido}_{\mathit{aire}} = \mathbf{1.715 * 10^5\ KJ}$$

El calor latente del agua evaporada, según la Ec.29 (véase pág. 38), es:

$$\mathbf{Calor\ latente}_{\mathit{agua\ evaporada}} = (16.77 - 5.013) * 2396.7 = \mathbf{2.7438 * 10^4\ KJ}$$

A continuación se procede a calcular el calor sensible del producto, con la Ec.30 (véase pág. 38), con una Tfinal de 70.35:

El cp del producto se calcula, según la Ec.33 (véase pág. 81), como:

$$Cp = 0.97 * 1.38 + 0.03 * 4.183 = 1.4641 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Ahora aplicando la Ec.30 (véase pág. 38), se tiene:

$$Calor\ sensible = 5.013 * 1.4641 * (70.35 - 29)$$

$$Calor\ sensible = 303\ KJ$$

Calor perdido teóricamente

Los cálculos anteriormente efectuados la cantidad de calor disipada al ambiente para las paredes externas del Secador de Bandejas Didáctico proporcionan flujo promedio de calor (Q/A) de 44.81W/m² (véase, pág.89); se tomará este valor para determinar la cantidad de calor perdida en forma teórica que es:

$$Calor\ perdido = \frac{Q}{A} * A_{pared} * numero_{paredes} * 3600 * ...$$

$$... * Tiempo_{teórico} \tag{Ec.36}$$

$$Calor\ perdido = 44.81 * \frac{(1.2)^2}{pared} * 6\ paredes * 3600 * \frac{9.41}{1000}$$

$$Calor\ perdido = 1.31 * 10^4\ KJ$$

Entonces la cantidad teórica total de calor es, según la Ec.27 (véase pág. 38), de:

$$\text{Calor Total requerido Teóricamente} = 1.71 * 10^5 + 2.74 * 10^4 + 303 + 1.31 * 10^4$$

$$\text{Calor Total requerido Teóricamente} = 2.12 * 10^5 \text{ KJ}$$

4.3.1.7. Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador

Los resultados teóricos anteriores obtenidos por el simulador se muestran a continuación:

Tabla 10. Resultados teórico-prácticos – Ensayo 5, choclo tierno

PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	%ERROR
Tiempo total (horas)	10.5	9.41	10.3
Tiempo Secado Constante	7.5	7.41	1.2
Tiempo Secado Decreciente	3	2	33
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -Hr)	0.1861	0.1878	0.9
Calor Total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	2.35x10 ⁵		
Método 2	2.22x10 ⁵		
Método 3 ^{**}	2.37x10 ⁵	2.11x10 ⁵	10.6
*utilizado para el cálculo del % de error; +utilizados en la simulación			

Las gráficas de secado, reales y teóricas, se muestran a continuación:

Gráficas de secado reales y teóricas – Ensayo 5

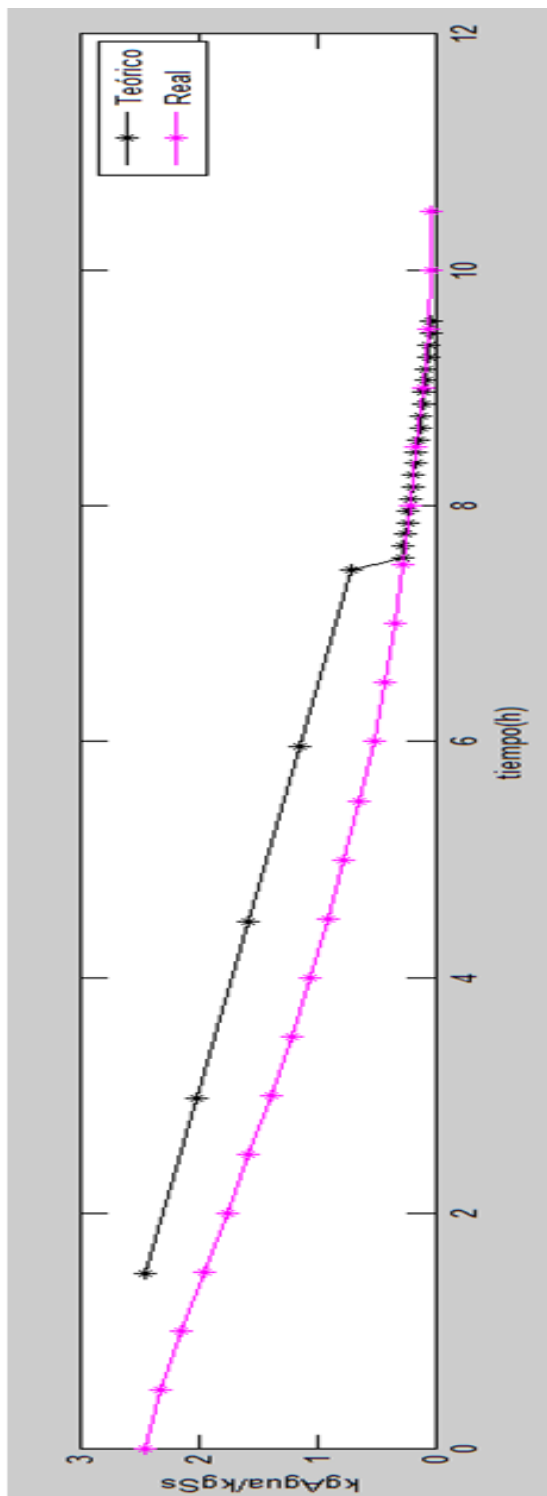


Figura 33. Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 5

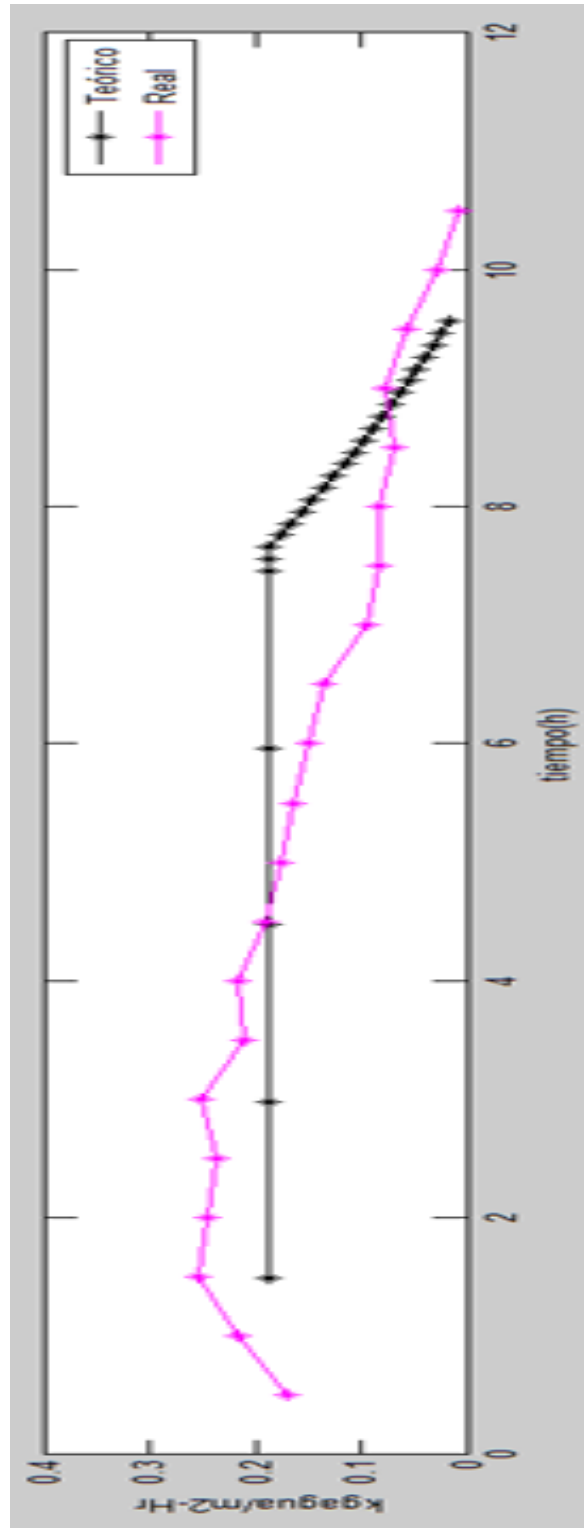


Figura 34. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 5

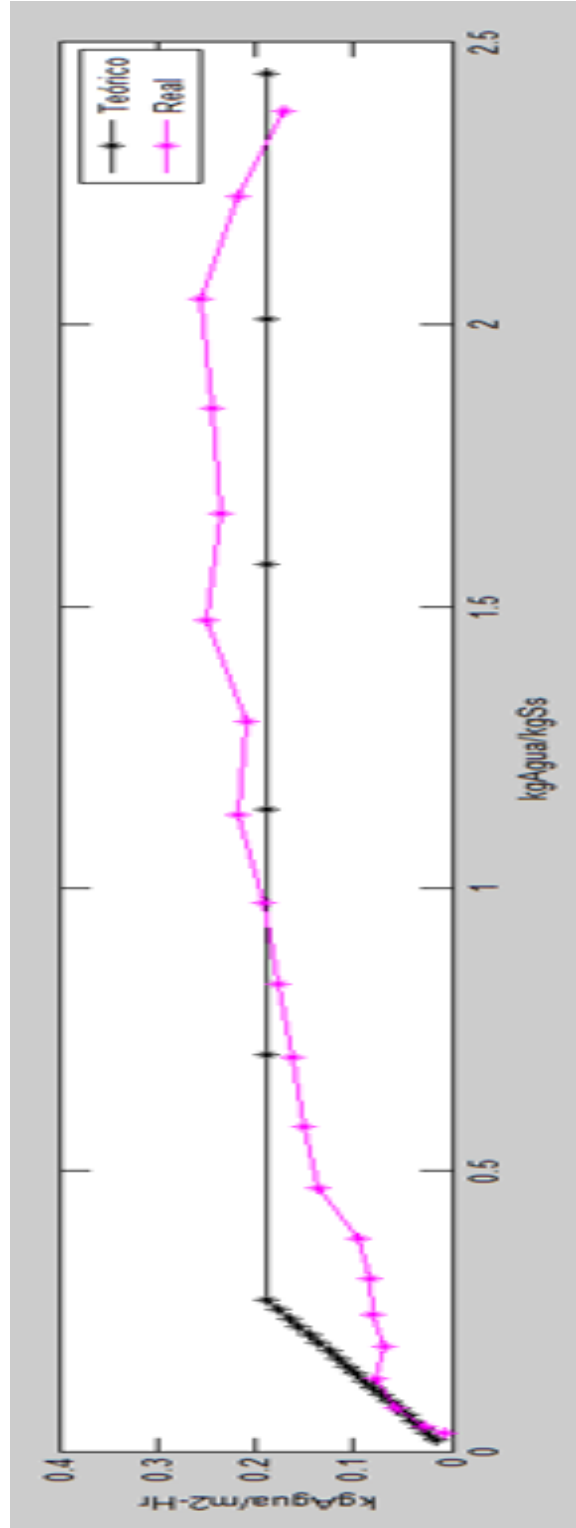


Figura 35. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 5

4.3.1.8. Análisis resultados

La Tabla 10 presenta los resultados obtenidos con el simulador. El tiempo de secado real es de 10.5 horas, pero el teórico es de 9.41 horas lo cual produce un error del 10.3%.

El otro parámetro es la velocidad de secado, cuyo valor es de $0.01861 \text{ kgAgua/m}^2\text{-Hr}$ y $0.0187801861 \text{ kgAgua/m}^2\text{-Hr}$ para el caso práctico y teórico (calculado a partir de un $U_k = 2.48 \text{ W/m}^2\text{°C}$) respectivamente con un error del 0.9%.

Finalmente el parámetro de Calor Total, el valor práctico es de $2.43 \cdot 10^5 \text{ KJ}$ y el valor teórico es de $2.175 \cdot 10^5 \text{ KJ}$, con un error del 10.53%, ya que el valor de la cantidad de calor teórico es función directa y proporcional al tiempo teórico de deshidratación.

Las gráficas de secado Reales y Teóricas muestran un comportamiento muy similar, como es el caso de la de Contenido de humedad vs tiempo (Figura 33) donde se puede apreciar un descenso de ambas curvas casi en forma paralela y luego para el período de velocidad decreciente de secado se superponen lo que significa una muy elevada convergencia de resultados teórico-prácticos ; las gráficas de velocidad de secado vs tiempo (Figura 34) y velocidad de secado vs contenido de humedad (Figura 35) muestran apropiadamente que la velocidad *promedio* teórica de secado es una línea horizontal que corresponde a muy cercanamente a la velocidad *promedio* de secado mientras se cumpla que $R_{C_{teórica}} \approx R_{C_{práctica}}$, más allá, donde la $R_{C_{teórica}} \gg R_{C_{práctica}}$ se observa un decrecimiento lineal en la curva de velocidad de secado teórica, lo interesante es que en las últimas etapas de velocidad de secado, tanto la teórica como la práctica, ambas casi coinciden en los últimos datos, lo cual señala el criterio certero utilizado por el simulador.

(Para visualizar las gráficas de secado Reales y capturas del simulador para Cálculos de Tiempo de secado y Calor Total y el Balance de Masa de Operación Unitaria de Secado, véase Anexo N°23, Anexo N°24, y Anexo 25 respectivamente).

4.3.2. Ensayo 6

A continuación se presentan los datos y cálculos efectuados para la obtención de curvas de secado.

Tabla 11. Secado de habas: 1-2/septiembre/2014

Tiempos (horas)	Pesos (kg)	W (kgAgua/kgSs)	dt (horas)	dW (kgAgua/kgSs)	R (kgAgua/m ² -Hr)	Wmedia (kgAgua/kgSs)
0	20,699	2,364	0			
0,5	19,304	2,137	0,5	0,226	0,369	2,250
1	17,820	1,896	0,5	0,241	0,392	2,016
1,5	16,383	1,662	0,5	0,233	0,380	1,779
2	15,041	1,444	0,5	0,218	0,355	1,553
2,5	13,761	1,236	0,5	0,207	0,338	1,340
3	12,666	1,058	0,5	0,178	0,289	1,147
3,5	11,679	0,898	0,5	0,160	0,260	0,978
4	10,806	0,756	0,5	0,141	0,231	0,827
4,5	10,073	0,637	0,5	0,119	0,193	0,696
5	9,442	0,534	0,5	0,102	0,167	0,585
5,5	8,875	0,442	0,5	0,092	0,149	0,488
6	8,361	0,358	0,5	0,083	0,136	0,400
6,5	7,949	0,291	0,5	0,066	0,108	0,325
7	7,752	0,259	0,5	0,031	0,052	0,275
7,5	7,441	0,209	0,5	0,050	0,082	0,234
8	7,182	0,167	0,5	0,042	0,068	0,188
8,5	6,978	0,134	0,5	0,033	0,053	0,150
9	6,788	0,103	0,5	0,030	0,050	0,118
9,5	6,616	0,075	0,5	0,027	0,045	0,089
10	6,479	0,053	0,5	0,022	0,036	0,064
10,5	6,412	0,042	0,5	0,010	0,017	0,047
11	6,343	0,030	0,5	0,011	0,018	0,036

Los resultados análisis de humedad del laboratorio para las habas son:

% de Humedad	Muestra
Inicial	70.5%
Final	3.8%*

* El cálculo de balance parcial de sólidos sugiere que la humedad final es del 3.8%, en lugar del 1.6%; Ls=6.15kg Sólidos secos.

Las gráficas de secado se muestran a continuación:

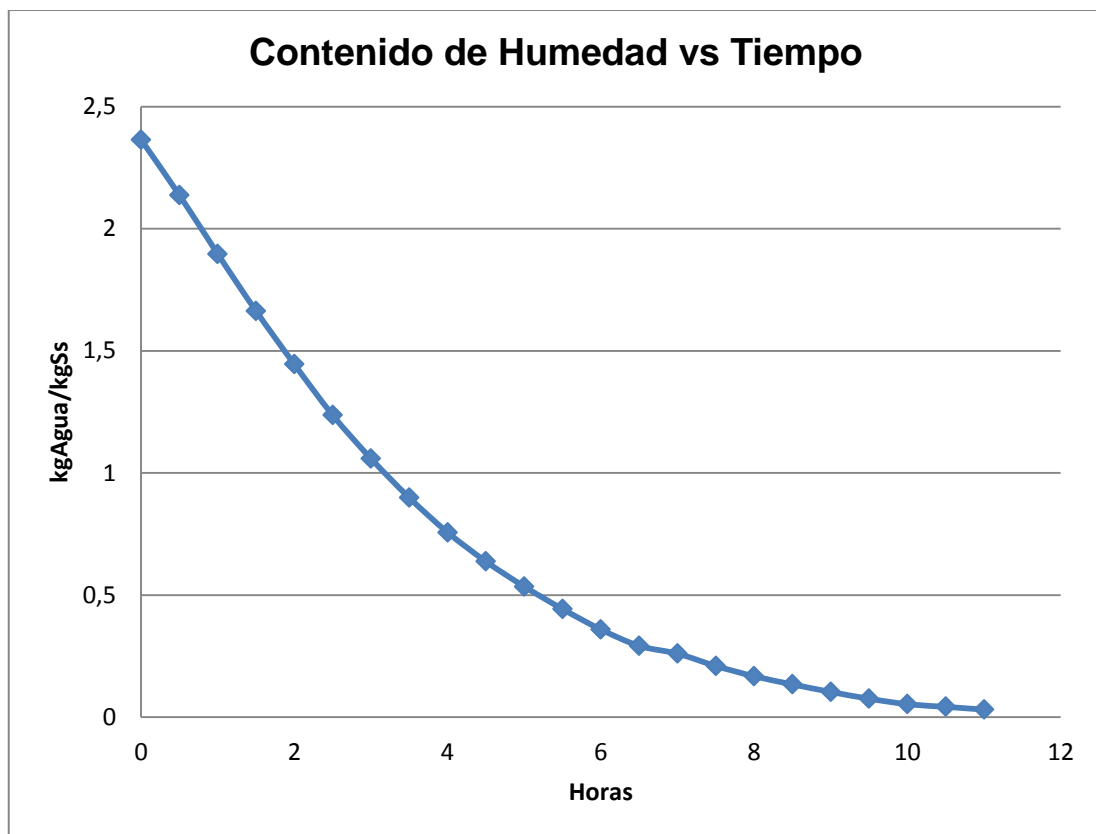


Figura 36. Contenido de Humedad vs Tiempo

La Figura 36, presenta la variación del contenido de humedad vs tiempo, se puede observar que al principio se muestran disminuciones cuasi-constantes, o la forma de la línea es cuasi-lineal inclinada dando una pauta sobre la duración del período de secado constante hasta aproximadamente 2.5 horas, el resto de la curva se identifica como período de secado a velocidad decreciente.

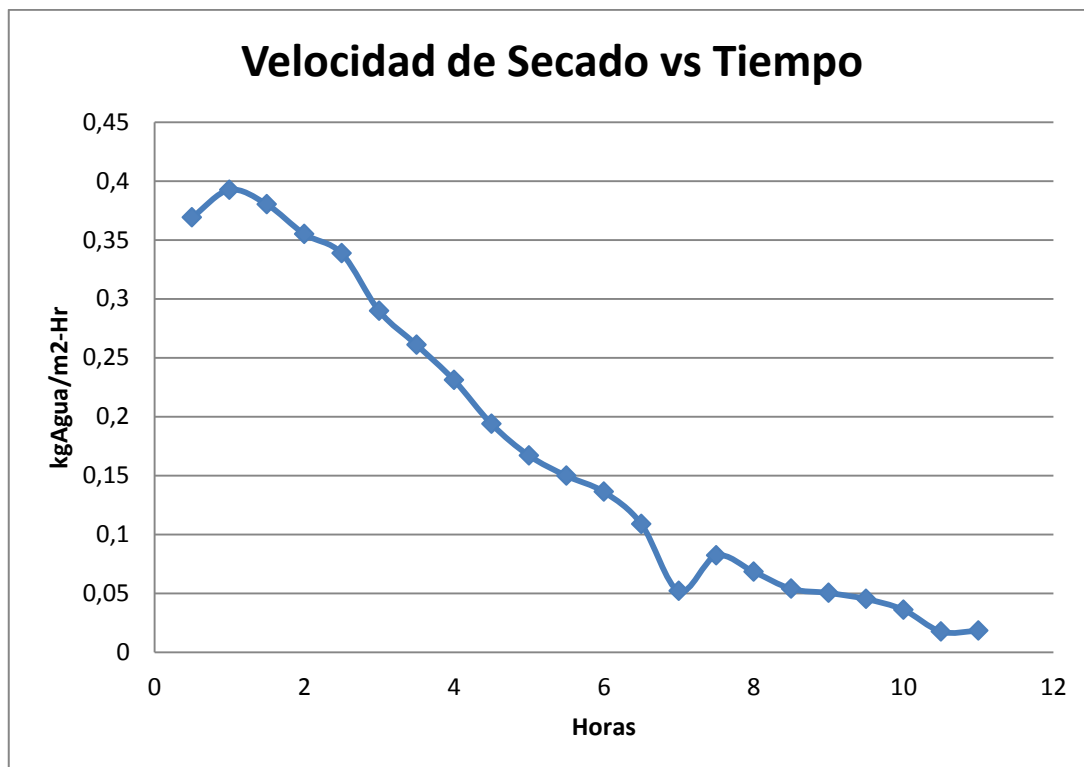


Figura 37. Velocidad de Secado vs Tiempo

En la Figura 4.5.2.2, se observa la velocidad de secado vs. Tiempo, donde se puede apreciar valores de velocidad muy similares al principio, pues se trata del período de velocidad constante o aquel lapso donde el sólido está cubierto por una fina mono capa de líquido que se evapora constantemente, los valores de velocidades se parecen mucho, variaciones contenido de humedad son bastante pequeñas. Pero luego de las 2.5 horas, se ve que las variación se hace 3 veces más grande que la variación anterior, y luego esas variaciones siguen haciéndose más pequeñas cada vez.

En la Figura 38, se puede notar cómo la velocidad de secado se mantiene casi constante hasta un contenido de humedad medio de 1.23 kg agua/kg Sólido seco, luego de ello se visualiza una reducción de la velocidad de secado dándose así a conocer el período de secado a velocidad decreciente.

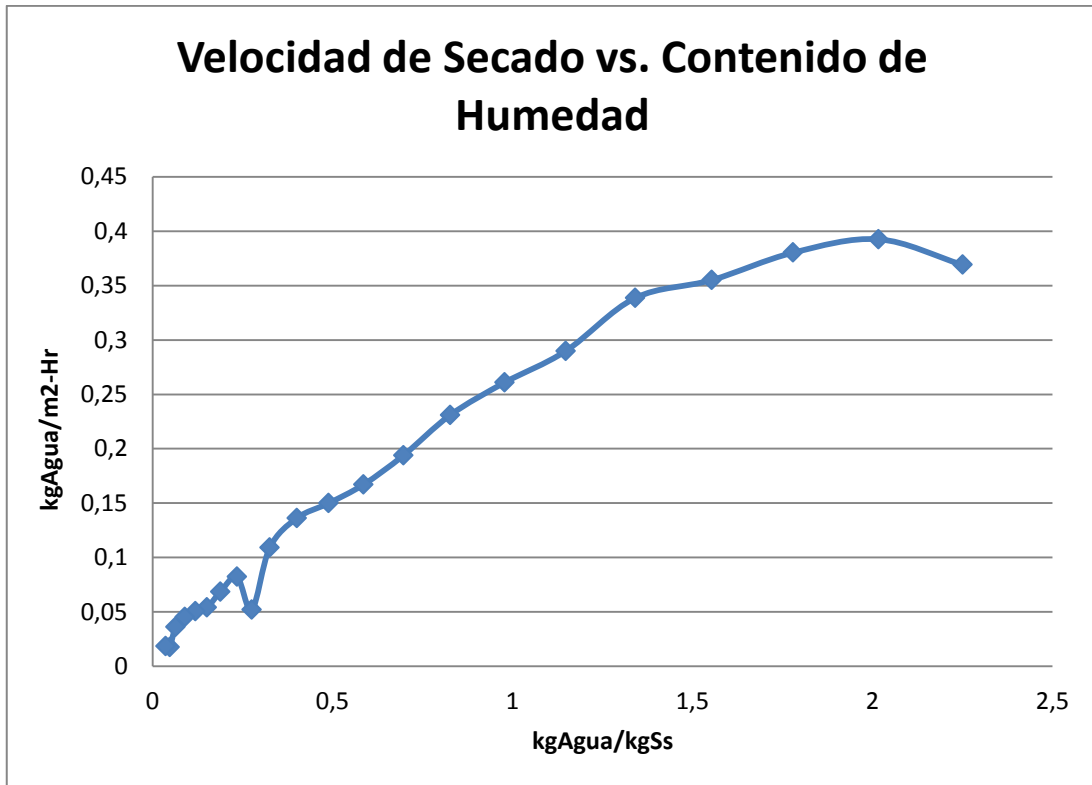


Figura 38. Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad

4.3.2.1. Análisis de datos

De forma inmediata se procede a calcular la DTML, según la Ec.21 (véase pág.35):

	Fluido "calefactor"= Aire	Sustancia "enfriadora"=alimento	ΔTML
Ti	86.49	29	23.95
Tf	77.87	70.89	

$$DTML = \frac{(77.87 - 70.89) - (86.49 - 29)}{\ln\left(\frac{77.87 - 70.89}{86.49 - 29}\right)} = 23.95^{\circ}C$$

4.3.2.2. Estimación del coeficiente global de transferencia de calor por conducción y convección

Los cálculos se resumen en la siguiente tabla, ya que siguen el mismo procedimiento utilizado en el ensayo anterior:

Tabla 12. Propiedades de las habas	
Densidad (kg/m^3)	396
Conductividad térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	0.0709

Los cálculos efectuados para determinar los coeficientes convectivos también siguen el procedimiento efectuado en el ensayo anterior, así como para determinar el coeficiente global de transferencia de calor (U_k), de modo que los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 13. Coeficientes de convección internos, promedio y Global de transferencia de calor.	
h_1 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.94
h_2 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.94
h_3 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.94
h_4 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.94
h_5 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.67
h_6 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.29
h_7 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	3.74
h_c promedio ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.932
Coeficiente Global aire-bandeja-producto (U_k) ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$)	2.074

4.3.2.3. Cálculos de velocidad, tiempo de secado y cantidades real y teórica de calor total

Los cálculos efectuados para determinar la velocidad y los tiempos de secado y la cantidad de calor total en forma práctica y teórica se determinan de la misma forma como en el ensayo anterior, por lo tanto se resumen los resultados en la Tabla 13 (para los datos de proceso véase Anexo N°26).

Velocidad promedio de secado (kgAgua/m ² -hr) ⁺	0.1886
Tiempo de secado a Velocidad constante (hr)	10.13
Tiempo de secado a Velocidad decreciente (hr)	0.068
Tiempo total de secado (hr)	10.27
Cantidad de Calor (KJ)	
- Método 1	2.475x10 ⁵
- Método 2	2.37x10 ⁵
- Método 3 – práctico*	2.47x10 ⁵
- Método 3 – teórico*	2.32x10 ⁵
* Basados en un $U_{\text{global total}} = 0.818 \text{ W/m}^2\text{°C}$	
+ Hasta un valor promedio de velocidad se secado real de 10 horas.	

4.3.2.4. Comparaciones de datos reales vs teóricos empleando simulador

Tabla 15. Resultados teórico-prácticos – Ensayo 6, Habas

PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	%ERROR
Tiempo total (horas)	11	10.27	6.6
Tiempo secado constante (horas)	10	10.13	1.3
Tiempo secado decreciente (horas)	1	0.068	93.2
Velocidad de secado (kgagua/m ² -hr)	0.1880	0.1846	1.8
Calor Total (kilojoules kj)			
Método 1*	2.475x10 ⁵		
Método 2	2.37x10 ⁵		
Método 3 ⁺⁺	2.47x10 ⁵	2.32x10 ⁵	6
*utilizado para el cálculo del % de error. ++Utilizados en el simulador			

Las gráficas de secado, reales y teóricas a partir de simulación, se muestran a continuación:

Gráficas de secado reales y teóricas – Ensayo 6, Habas

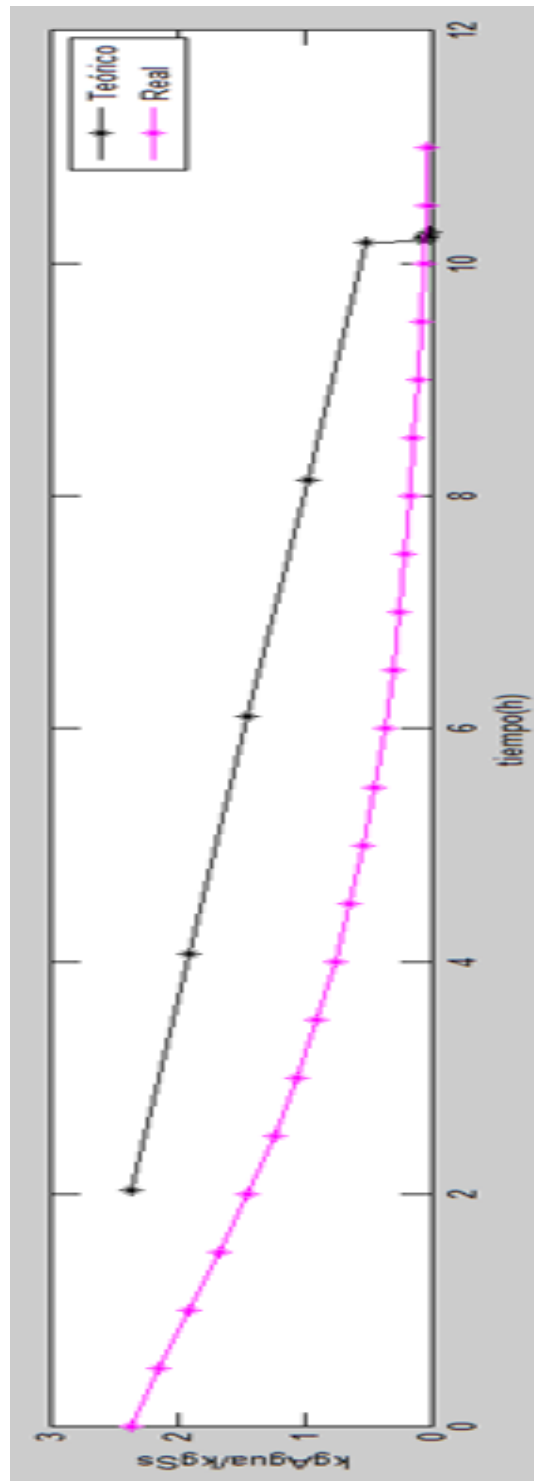


Figura 39. Curvas Real y Teórica de Contenido de Humedad vs Tiempo – Ensayo 6

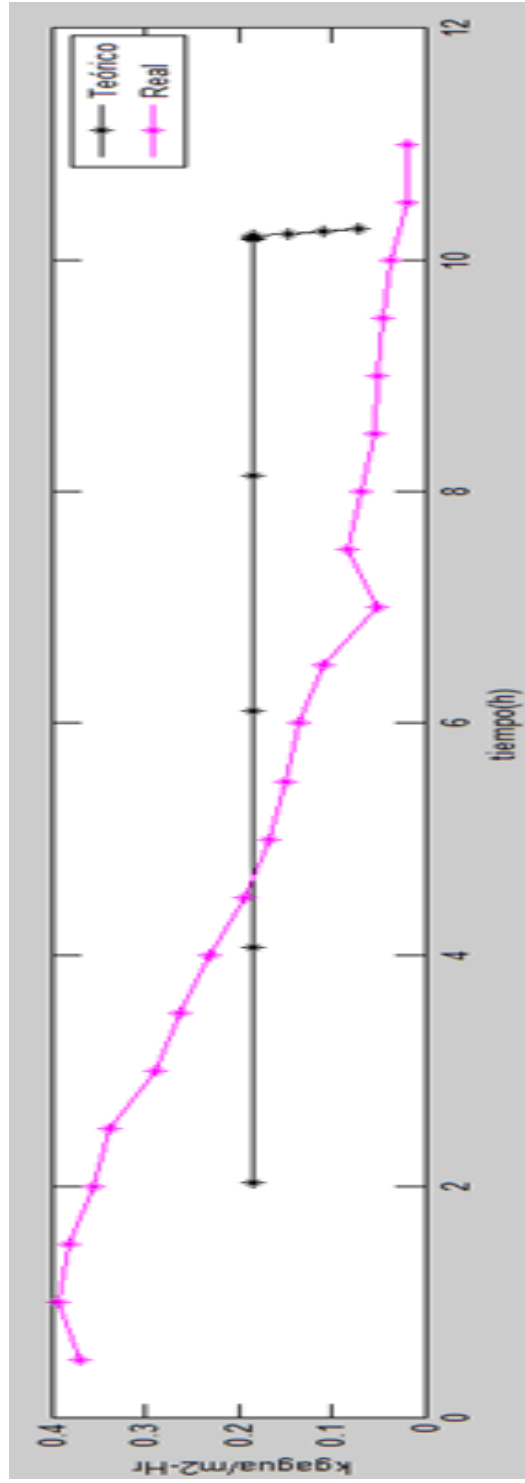


Figura 40. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Tiempo – Ensayo 6

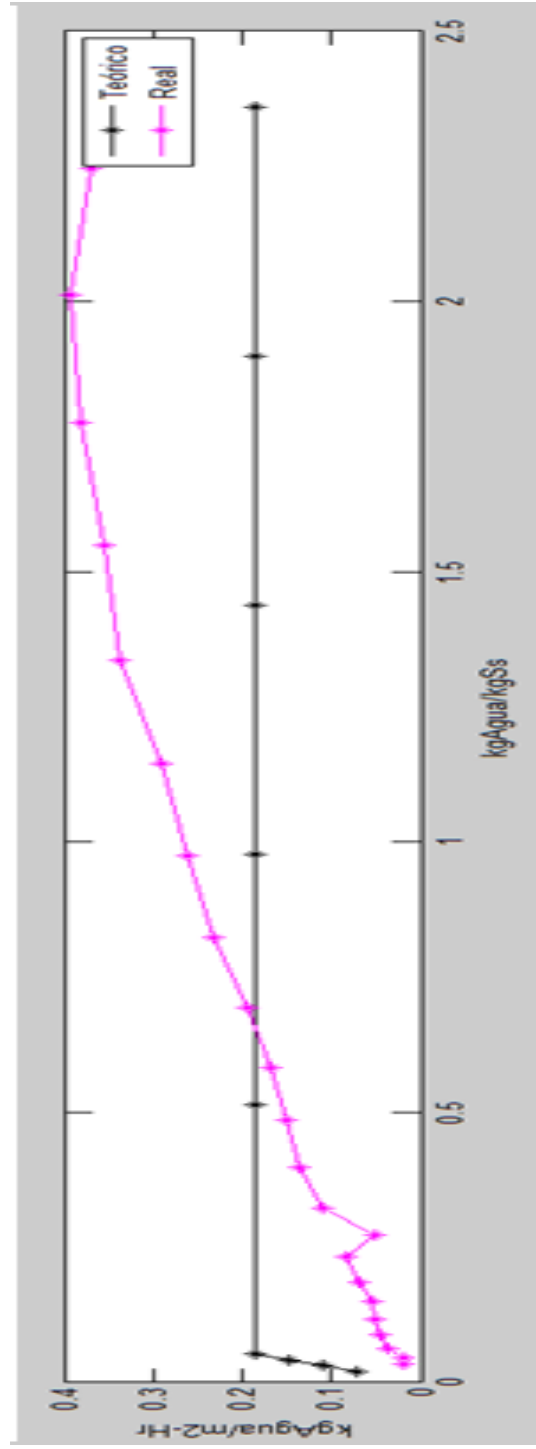


Figura 41. Curvas Real y Teórica de Velocidad de Secado vs Contenido de Humedad – Ensayo 6

4.3.2.5 Análisis de resultados

En la Tabla 15 de Resultados Teórico-Prácticos se puede visualizar que la cantidad total de horas invertidas teóricamente para efectuar el secado de 20.7kg de haba al 70% de humedad hasta reducir su humedad hasta el 3.8%, es de 10.27 horas lo cual produce un error del 6.6% respecto al tiempo empleado en forma práctica para cumplir tal objetivo, pues el forma práctica se requieren 11 horas.

En cuanto a la velocidad promedio de secado, el valor teórico (el cual se basa en un $U_k = 2.074\text{W/m}^2\text{°C}$) y práctico es de $0.1846\text{kgAgua/m}^2\text{-Hr}$ y $0.1880\text{kgAgua/m}^2\text{-Hr}$ respectivamente con un error del 1.8%.

Otro aspecto que es importante es la cantidad de calor real requerida la cual se evaluó de 3 formas distintas y todas ellas tienen una alta similitud, las diferencias son despreciables, sin embargo se decide tomar como base la cantidad de calor real calculada según lo establece el Método 3: con éste, se obtuvo un valor teórico de 2.45×10^5 KJ, el cual difiere del valor práctico de 2.6×10^5 KJ con un error del 5.76%.

La Figura 39, muestra que la curva teórica de contenido de humedad es precisamente una función lineal del tiempo pues se basa en la velocidad promedio de secado, y justamente las Figura 40 y Figura 41 representan a la velocidad de secado como una línea horizontal a la velocidad promedio hasta aproximadamente un contenido de humedad de 0.022kgAgua/kgSs , más allá la velocidad teórica decrece en forma lineal representando en parte al período de secado a velocidad decreciente.

(Para visualizar las gráficas de secado Reales y capturas del simulador para Cálculos de Tiempo de secado y Calor Total y el Balance de Masa de Operación

Unitaria de Secado, véase Anexo N°27, Anexo N°28, y Anexo N°29 respectivamente).

4.4. Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en forma teórica y práctica se muestran compilados en la siguiente Tabla 16 de Resumen de Resultados:

Tabla 16. Resumen de resultados teórico-prácticos

Fecha de ensayo: 13 de Junio 2014 – Soya			
PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	 %ERROR
Tiempo total (horas)	5.86	6.27	6.99
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -hr)	0.26	0.23	11.5
Calor total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	1.3473x10 ⁵	-	-
Fecha de ensayo: 19 de Junio 2014 – Soya			
PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	 %ERROR
Tiempo total (horas)	4.5	5.82	29
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -Hr)	0.149	0.123	17
Calor total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	1.07x10 ⁵	-	-
Fecha de ensayo: 23 de Junio 2014 – Soya			
PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	 %ERROR
Tiempo total (horas)	5.5	5.84	6.1
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -Hr)	0.116	0.1094	5.68
Calor total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	9.30x10 ⁴	-	-
Fecha de Ensayo: 28-29 Agosto 2014 - Choclo tierno			
PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	 %ERROR
Tiempo total (horas)	10.5	9.41	10.3
Tiempo Secado Constante	7.5	7.41	1.2
Tiempo Secado Decreciente	3	2	33
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -Hr)	0.1861	0.1878	0.9
Calor Total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	2.35x10 ⁵		
Método 2	2.22x10 ⁵		
Método 3 ^{**}	2.4312x10 ⁵	2.175x10 ⁵	10.53
Fecha de ensayo: 1-2 Septiembre 2014 – Habas			
PARÁMETRO EVALUADO	PRÁCTICO	TEÓRICO	 %ERROR
Tiempo total (horas)	11	10.27	6.6
Tiempo Secado Constante	10	10.13	1.3
Tiempo Secado Decreciente	1	0.068	93.2
Velocidad media de secado (kgAgua/m ² -Hr)	0.1880	0.1846	1.8
Calor total (KiloJoules)			
Método 1 ⁺	2.47x10 ⁵		
Método 2	2.37x10 ⁵		
Método 3 ^{**}	2.6x10 ⁵	2.45x10 ⁵	5.76

*Utilizado en el cálculo de % de error; +Utilizado por el simulador.

Los resultados presentados en el resumen anterior, muestran implícitamente los siguientes puntos:

1. Que el fenómeno que gobierna la transferencia de calor se basa en lo siguiente:(véase la Tabla 17):

Numero de bandeja	Velocidad media (m/s)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0.295
6	0.2171
7	0.58

Dado que la velocidad es nula en cada una de las primeras 4 bandejas es lógico que las fuerzas de flotabilidad dominasen la transferencia de calor, que los coeficientes de convección se basen en dicho fenómeno y que las correlaciones a utilizarse se basen en números adimensionales que consideren a dichas fuerzas, precisamente el número representativo para la convección natural es el de Grashof, ya que representa la relación que existe entre las fuerzas de flotación (por efecto de la variación de temperatura que experimenta el fluido) y las fuerzas viscosas.

La Tabla 17 también muestra que las velocidades para cada bandeja de las 3 últimas sí tienen velocidades de fluido pero la cuestión es que en vista de las baja magnitud de tales se debe realizar un cálculo para determinar si las fuerzas de flotabilidad o las fuerzas inerciales son las que dominan el fenómeno de transmisión de calor (véase Ec.7), pero en vista de que no se supera el límite de 10 en la Ec.7, para los casos analizados en la presente investigación y para facilitar el análisis, se considera entonces que la convección forzada está ejerciendo dominio sobre la natural y por ende las correlaciones se basan en el

número que representa el cociente entre las corrientes inerciales y las fuerzas viscosas, es decir el Reynolds.

Lo anterior muestra que no se puede utilizar la ecuación dimensional para secadores de bandejas ($h = 14.3G^{0.8}$) para estimar los coeficientes de película, sino más bien las correlaciones para placas planas horizontales de convección natural y forzada para la estimación del coeficiente de película en la cámara de secado.

2. Que en el Secador de Bandejas Didáctico, el efecto de la conducción hacia la parte inferior de las bandejas de producto ejerce una influencia importante en la velocidad de secado, y por lo tanto se requiere determinar el coeficiente global de transferencia de calor por conducción y convección (U_k).

3. Que la fuerza que impulsa la transferencia de calor puede aproximarse mediante la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica, la misma que permite tener un acercamiento teórico de la velocidad promedio de secado.

A continuación se presentan figuras que engloban parámetros de interés a saber el tiempo de secado (ubicado en las ordenadas) y las variables Cantidad de Calor Total (10^5 KJ), el Coeficiente Pelicular ($W/m^2\text{°C}$) y la Velocidad Promedio de Secado ($kg\text{Agua}/m^2\text{-Hr}$) los mismos que comparten una abscisa común, estas figuras permitirán apreciar con mayor facilidad la relación que existe entre algunos de los resultados presentados en la Tabla 16.

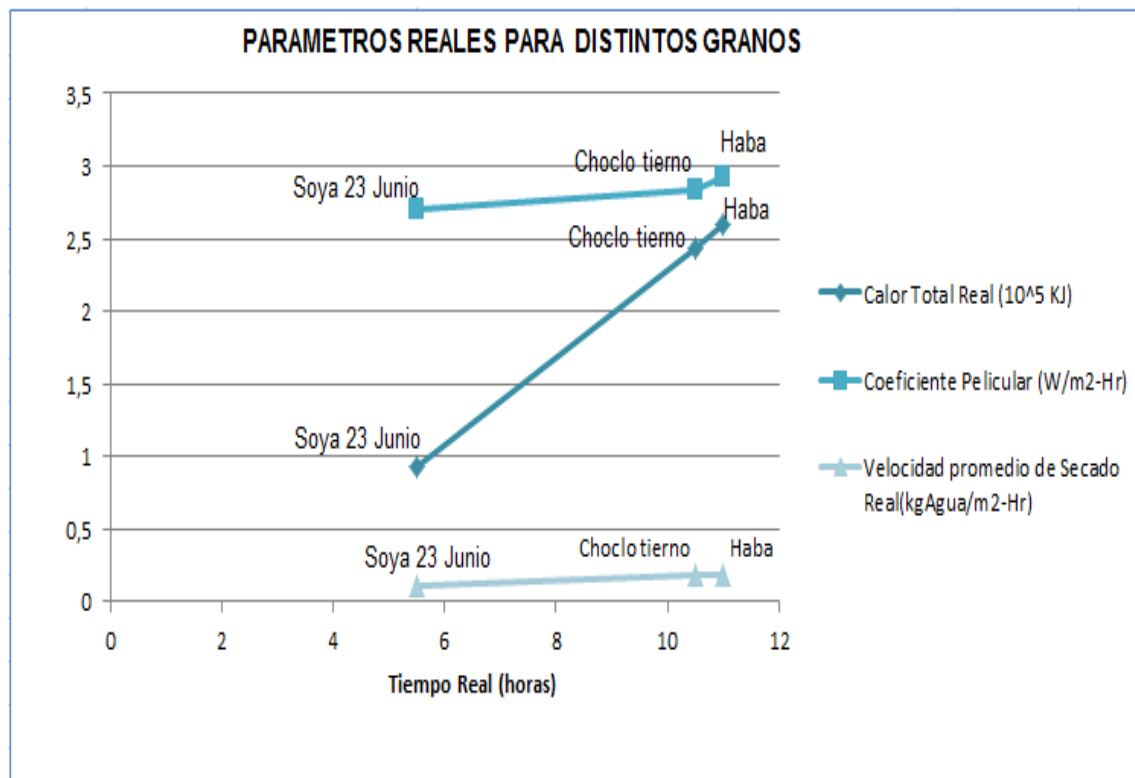


Figura 42. Parámetros Reales para diversos Productos Alimenticios

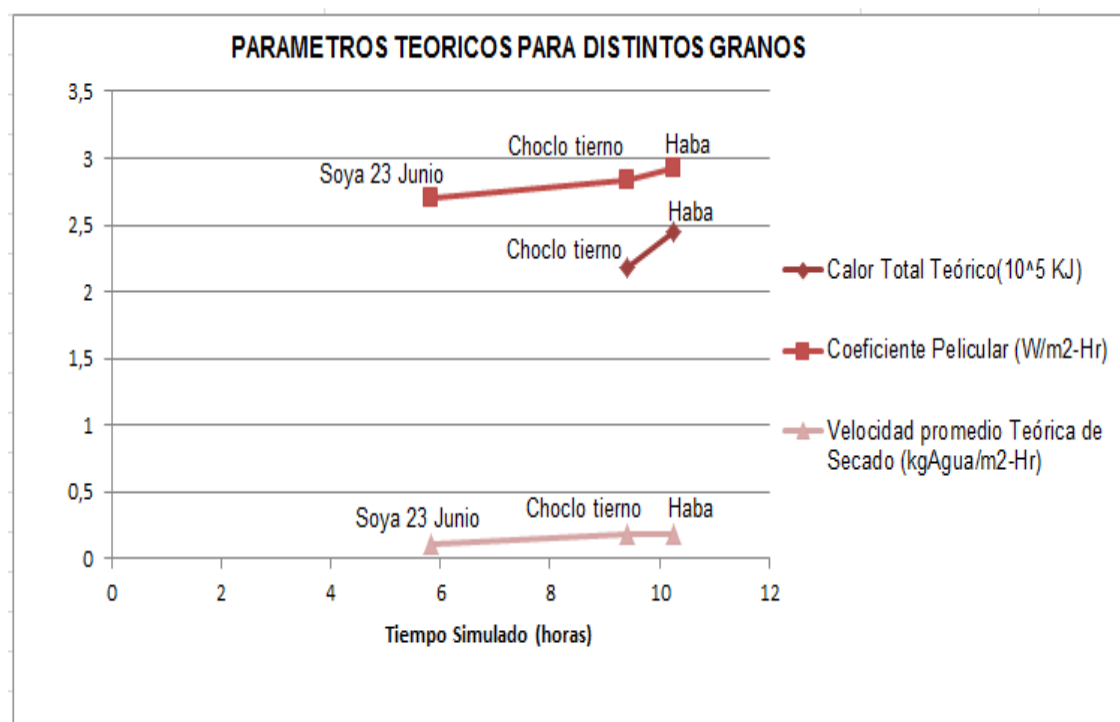


Figura 43. Parámetros Teóricos para diversos Productos Alimenticios

Lógicamente para apreciar los parámetros presentados tanto reales como teóricos juntos, se presenta a continuación la Figura 44:

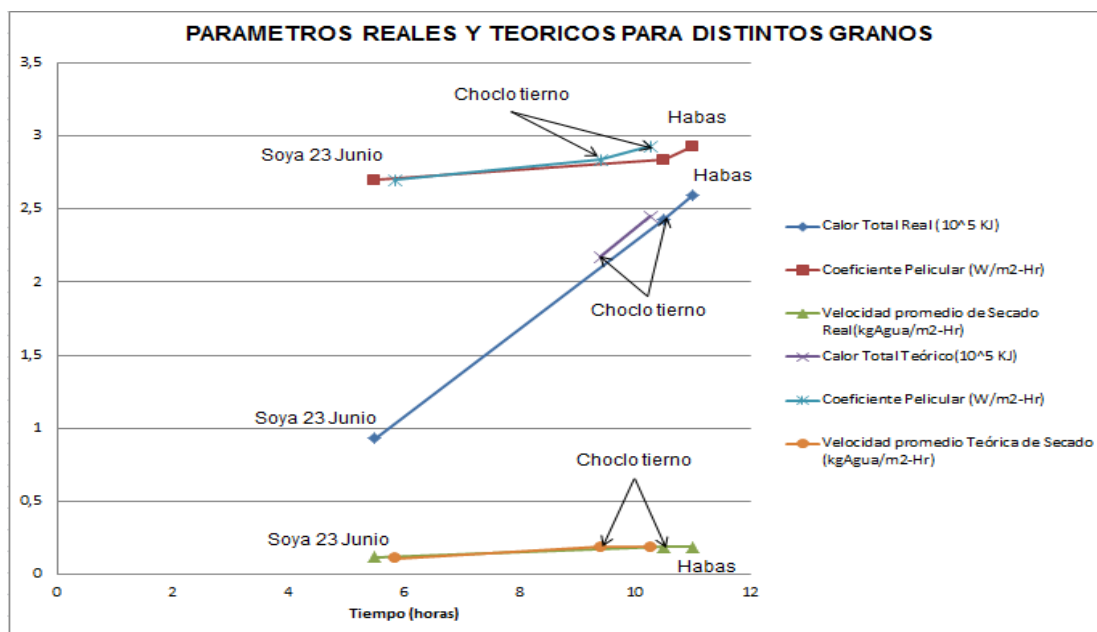


Figura 44. Parámetros Reales y Teóricos para diversos Productos Alimenticios

Tomando como base la Figura 44, se observa que los parámetros reales y estimados (teóricos) tienen valores muy similares para cada caso en particular: Soya 23 de Junio - Ensayo 4, Choclo tierno (señalado con flechas para facilitar comprensión) y Habas, este hecho se hace patente no sólo por la forma de las figuras sino también por la gran convergencia entre ellas, pues como en el caso de la Velocidad Promedio de Secado, los resultados teóricos casi 'eclipsan' a los reales en vista de la alta proximidad entre ellos, de esto se deriva el que el Tiempo de Secado, teórico como el real también manifiestan un elevado acercamiento entre ellos y como consecuencia se tenga en la Cantidad de Calor Total real como teórico resultados muy similares calculados y estimados de acuerdo con el Método 3 (a excepción del Ensayo 4). Finalmente se tienen los coeficientes peliculares promedios utilizados para realizar las estimaciones de los parámetros mencionados anteriormente (los cuales en esencia son los mismos pues sólo se cuenta con las correlaciones de transferencia de calor ampliamente difundidas en la bibliografía).

De ahí que los 3 puntos mencionados anteriormente explican concisa y ampliamente la razón por la que los resultados teóricos son muy similares a los prácticos: el promedio de los porcentajes de error del Tiempo Total teórico vs

práctico muestra un valor absoluto de 10.99%, mientras que el Calor Total teórico vs práctico, según el Método 3, (para los 2 últimos ensayos) indican un error medio absoluto de 8.15%.

Por lo tanto, en resumen, el criterio a utilizarse por el simulador basado en los 3 puntos anteriores permitirá obtener resultados teóricos *Totales* muy parecidos a los reales: o sea el simulador sí permite predecir en forma aproximada el comportamiento general o promedio en cuanto al cálculo de tiempo total de secado y cantidad de calor total se refiere.

4.5. Análisis económico

A continuación se presentan los costos que conllevaron el desarrollo de la investigación:

ítem	descripción	Cantidad	Unidad	Costo/U	Total
1	Balanza	1	U	140	140
2	Platinas Acero inoxidable 1"x1/4"	1	Varilla 6 metros	40	40
3	Pernos y tuercas de acero inoxidable	12	U	0.15	1.80
4	Pernos y tuercas de hierro negro	12	U	0.12	1.44
5	Cepillo de copa para taladro	1	U	3	3
6	Brocas de Cobalto	4	U	7	28
7	Mano de Obra	15	Horas/hombre	15	225
8	Medidor electrónico de temperatura	1	U	60	60
9	Higrómetro	1	U	45	45
10	Tapones de corcho	3	U	1	3
11	Sierra de copa para taladro	1	U	20	20
12	Anemómetro	1	U	300	300
13	Discos de corte para acero inoxidable	2	U	4	8
14	Cajón de madera 100x40x25	1	U	80	80
15	Gabinete 30x30x20	1	U	30	30
16	Instalación de instrumentos de medición-Mano de obra	35	Horas/hombre	20	600

Continúa en la siguiente página...

...continuación de la página anterior

17	Soya	1	qq	60	60
18	Choclo	0.5	qq	100	50
19	Haba	0.5	qq	100	50
20	Conexión de vapor saturado-Gestión			50	50
21	Arreglo de caldero-Gestión			50	50
22	Arreglo arranque secador y Gestión			70	70
23	Spray de Alta temperatura	1	U	7	7
24	Soldadura epóxica	1	U	4	4
25	Sujetadores de ángulo	3	juego	4	12
26	Combustible-diesel	50	galones	1.03	51.5
27	Tubos PVC 1"	18	Tubo 6 metros	13	39
28	Neplos 1"	2	U	0.75	1.5
29	Unión 1"	5	U	1.5	7.5
30	Codos 1"	2	U	1.5	3
31	Permatex	1	U	3	3
				Costo Total	2043.7

Costos de Transporte = costos de mano de obra*0.11 = (225+600)*0.11=90.75

Costos Totales = Costos de transporte + (Costos de M/O +Costos de recursos)+Gastos varios

Costos Totales = (90.75+2043.7+250)= \$2384.45 dólares

CAPÍTULO V

MANUAL DE OPERACIÓN

5.1. Datos de campo

Antes de hacer pasar vapor para efectuar el calentamiento del secador de bandejas didáctico:

1. Estantería

Remueva las ruedas

2. Balanza

Colocar la estructura de platina sobre la balanza y fijarla a la misma con los pernos y tuercas.

Ponga la balanza dentro del secador.

Coloque la estantería de las bandejas, sin las ruedas y sin bandejas, sobre la estructura de la balanza.

Conectar la alimentación de la pantalla de visualización de la balanza a la toma de 110V.

Conectar el macho de 4 terminales de la balanza con la hembra de 4 terminales de la pantalla de visualización de la balanza (y coloque la pantalla en la base del gabinete de metal).

Encienda la pantalla de visualización de la balanza, presione ON.

3. Medidor de temperatura.

Conectar los 2 terminales (azul y rojo) de la sonda de medición con los cables terminales de la pantalla de visualización (uno de los cables del par de cables que está pintado de azul).

Conectar la alimentación de la pantalla de visualización del medidor de temperatura a la toma de corriente eléctrica 110V (y coloque el visualizador de temperatura en el “2do piso” del gabinete de metal junto al secador).

Una vez caliente el equipo, abra la puerta del secador, y coloque las bandejas con producto y proceda a tomar los datos; asegurarse de poder recolectar los condensados (conecte los tubos de PVC 1” de forma que conduzcan los condensados del intercambiador hacia el recolector de los mismos), y proceda a colocar los instrumentos de medición como sigue:

4. Fijación de Instrumentos de medición:

4.1. Higrómetro:

Coloque la sonda en la abertura circular, cuyo cuello del cable es un tapón de corcho, de tal forma que quede la sonda en el interior del difusor y ajuste el tapón con la fuerza moderada.

4.2. Anemómetro:

Remueva las 3 tuercas que sujetan la tapa cuadrada del difusor luego saque la tapa con la estructura adjunta.

Coloque la hélice del anemómetro en dicho anillo de la estructura adjunta de la tapa cuadrada del difusor de tal forma que la flecha de la superficie superior interna de la hélice tenga el mismo sentido del flujo de aire.

Ajuste la hélice del anemómetro hacia la estructura adjunta de la tapa cuadrada del difusor mediante colocar delante del cuerpo de la hélice una prensa de corcho (una mitad de corcho con material de caucho, con el caucho 'mirando' hacia la pared del cuerpo de la hélice); de la misma manera con la otra prensa de corcho: asegurarse que el cable de la hélice coincida precisamente con el vástago vertical de hierro que sostiene el anillo de apoyo para la hélice y que descienda hacia afuera del difusor.

Cerrar el hueco cuadrado del difusor con la tapa cuadrada, es decir introducir con mucho cuidado la hélice junto con la tapa y cerciorarse de que la hélice quede con la flecha de la superficie superior interna en la misma dirección del flujo de aire.

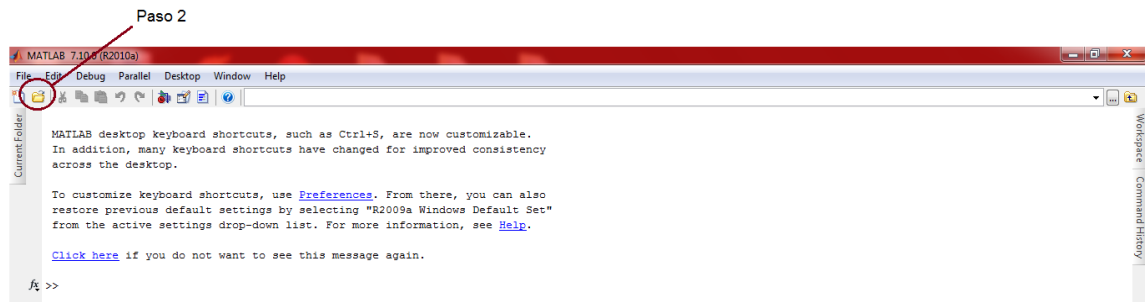
Ajustar la tapa al ajustar las 3 agarraderas de la tapa cuadrada en los pernos y coloque los pernos: ajustarlos con fuerza moderada.

Al finalizar se sugiere remover primero las bandejas de producto, apagar todos los instrumentos de medición, luego esperar 30 minutos hasta que el equipo se enfríe lo suficiente: sacar los instrumentos de medición con cuidado.

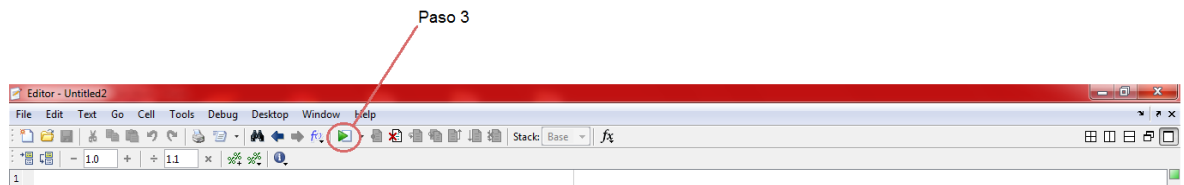
5.2. El Simulador

Una vez analizado los datos:

1. Ingrese a MatLab, y se despliega el área de trabajo:
2. Dirigirse a la barra de iconos, y clic en *open File* (el botón en forma de carpeta)



3. Abrir el archivo del simulador y hacer correr el programa: presionar *Run File* (el botón en forma de ►)



A continuación, llene los datos que se le pidan.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se concluye:

- Que la realización de pruebas previas con un equipo son muy importantes para reconocer las necesidades en cuanto a obtención de datos de proceso se refiere.
- Que la instalación de los instrumentos de medición forman parte de un trabajo investigativo que se basa en las variables medibles cuantificadas por dichos instrumentos de medición.
- Que las marchas realizadas con el secador proporcionan datos e información de vital importancia para la correcta aplicación de principios físicos y matemáticos de acuerdo con la realidad presente.
- Que la simulación es una forma de llevar a cabo experimentos en forma 'teórica', cuyo uso facilita y agiliza la aplicación de las leyes físicas de modo que se puede tener mejor comprensión de un comportamiento o fenómeno físico presente en la realidad, y mediante la cual se obtienen resultados que pueden/podrían orientar al experimentador en la toma de decisiones concernientes a futuras mejoras o no.
- Que los resultados teóricos obtenidos por la simulación tienen un porcentaje de error promedio de $\pm 15\%$, lo cual es manejable y señalan que el criterio técnico-científico utilizado por el simulador es certero y representativo de la realidad del Secador de Bandejas Didáctico.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda:

- Que se ejerza cuidado en el manejo de los instrumentos de medición debido a su fragilidad.

- Que para obtener datos de campo, efectuar los ensayos basándose en las condiciones preestablecidas (véase Capítulo 3).

- Antes de operar el caldero, revisar el manual de operación (véase trabajo de tesis “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALDERO PIROTUBULAR DE 5BHP CONTROLADO MEDIANTE SISTEMA SCADA. UTE SANTO DOMINGO 2010”).

- Antes de operar el secador de bandejas, revisar el manual de operación (véase trabajo de tesis “CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SECADOR DE BANDEJAS DIDÁCTICO PARA EL GALPÓN DE AGROINDUSTRIAS DE UTE 2011”).

- Proporcionar el mantenimiento periódico a los equipos de trabajo, en especial caldero y secador de bandejas.

- Instalar un sistema de persianas o reguladores de flujo que permitan controlar la dirección del aire en dirección paralela a la superficie de las bandejas.

- Instalar un Blower (Soplador de aire) de tal capacidad de modo que se pueda tener velocidad uniforme en la superficie de cada una y todas las bandejas de la estantería.

BIBLIOGRAFÍA

- Ángeles, M., L., "Dimensionamiento y simulación de un secador de aspersion", México D.F, Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- Arballo, J., R., "Modelado y simulación de la deshidratación combinada osmótica-microondas de frutihortícolas", La Plata, Tesis Doctoral, Universidad Nacional, 2013.
- Attaway, S. (2012). MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. New York: Elsevier.
- Bansal, R., Goel, A., & Kumar, S. M. (2009). MATLAB and Its Applications in Engineering. India: Pearson Education India.
- Batty, C. ,, & Folkman, S. L. (1983). Fundamentos de la Ingeniería de Alimentos. México: COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V.
- Bejan, A. (2013). Convection Heat Transfer. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Bober, W., Tsai C, T., & O., M. (2009). Numerical and Analytical Methods with MATLAB. Boca Ratón: CRC Press.
- Brennan, J. G. (2012). Food Processing Handbook. Federal Republic of Germany (Weinheim): WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Canale, R. (2011). Métodos numéricos para ingenieros. España: McGraw-Hill Interamericana de España.
- Cengel., Y. A. (2003). Heat transfer: a practical approach. U.S.A: McGraw-Hill.
- Colina I., M. L. (2010). Deshidratación de alimentos. México: Trillas.
- Couillet, R., & Debbah, M. (2011). Random Matrix Methods for Wireless Communications. Cambridge University Press.
- Discroll, T. (2009). Learning MATLAB. U.S.A: Siam.
- Domínguez B., V., & Rapún B., M. (2006). MatLab en cinco lecciones de Numérico. Pamplona.
- Dorfman, A. S. (2009). Conjugate Problems in Convective Heat Transfer. Boca Ratón: CRC Press.
- Favre-Marinet, M., & Tardu, S. (2013). Convective Heat Transfer. Jhon Wiley & Sons.
- Fellows, P. (2000). Food Processing Technology. Principles and Practice. England: Woodhead Publishing Limited cambridge England.

- Fernández P., C., Velasco, M. S., & al., e. (2009). Introducción a la termodinámica. Editorial Síntesis, S.A.
- Finlayson, B. (2012). Introduction to Chemical Engineering Computing. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Geankoplis, J. C. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. México: Compañía Editorial Continental S. A.
- Ghiaasiaan, S. M. (2011). Convective Heat and Mass Transfer. New York: Cambridge University Press.
- Holpman, J. P. (1998). Transferencia de calor. España: McGraw-Hill.
- Incropera. (2009). Fundamentals Of Heat And Mass Transfer, 5Th Ed. New Delhi: Wiley India Pvt. Limited.
- Ipsen, I. C. (2009). Numerical Matrix Analisis: Linear Systems and Least Squares. SIAM.
- Jiji, L. M. (2009). Heat Convection. New York: Springer Science & Business Media.
- Kiusalaas, J. (2005). Numerical Methods in Engineering with MatLab. United States of America: Cambridge University Press.
- Kreith, F., Manglik, R., & Bhon, M. (2012). Principios de Transferencia de Calor. Santa Fe: CENCAGE Learning.
- Streeter, L., V. (1970). Mecánica de los fluidos. Mexico: McGraw-Hill.
- Levenspiel, O. (1993). Flujo de fluidos e intercambio de calor. Reverté.
- Llorens, M., & Miranda, A. L. (2009). Ingeniería Térmica. Barcelona: MARCOMBO, S.A.
- Lomas, E. (2002). Introducción al cálculo de los procesos tecnológicos de los alimentos. Zaragoza : Acribia S. A.
- Lopez-Baez, D. (2009). MATLAB with Applications to Engineering, Physics and Finance. Boca Ratón: CRC Press.
- Mataix, C. (1986). Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo S.A.
- Mathews, J., & Fink, K. (2000). Métodos Numéricos con MatLab. Madrid: Pearson Education.
- Mathlouthi, S. (2007). Analyse Numerique. Tunis: Université Virtuelle de Tunis.

- McCabe L., W., Smith C., J., & Peter, H. (1991). Operaciones unitarias en ingeniería química. España: McGraw-Hill.
- Nakamura, S. (1992). Métodos Numéricos Aplicados con Software. Mexico: Pearson Education.
- Nellis, G., & Klein, S. (2009). Heat Transfer. New York: Cambridge University Press.
- Oosthuizen, P. H., & Kalendar, A. (2012). Natural Convective transfer form Narrow Plates. Springer Science & Bussines Media.
- Orrego, C. (2003). Procesamiento de Alimentos. Colombia: Universidad de Colombia Sede Manizales.
- Ortega, D., "Diseño y construcción de un caldero pirotubular de 5BHP controlado mediante sistema SCADA. UTE santo domingo 2010", Santo Domingo, Tesis de Grado, Universidad Tecnológica Equinoccial, 2010.
- Otto, S., & Denier, J. (2005). An Introduction to Programming and Numerical Methods in MatLab. Estados Unidos de América: Springer.
- Pereira, L. E. (2010). Matlab - Modelling, Programming and Simulations. Croatia: A B M Nasiruzzaman.
- Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (1992). Perry - Manual del Ingeniero Químico tomo V.
- Quarteroni, A., Saleri, F., & Gervasio, P. (2010). Scientific Computing with MATLAB and Octave. New York: Springer.
- Rudramoorthy, R. (2010). Heat and Mass Transfer. New Delhi: Pearson education India.
- Sawhney, G. S., & Sawhney, G. S. (2010). Heat And Mass Transfer , Second Edition. New Delhi: I.K. International Pvt. Ltd.
- Shannon, R. E. (1988). Simulación de sistemas. México: Trillas.
- Sharma, Mulvaney, & Rizvi. (2003). Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. México: LIMUSA S. A.
- Shevchuk, I. (2009). Convective Heat and Mass Transfer in Rotating Disk Systems. Germany: Springer Science & Business Media.
- Singh, P., & Heldman, D. (2009). Introduction to Food Engineering. China: Academic Press.

- Smith, J., Van Ness, H., & Abbott. (2007). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. México: McGraw-Hill.
- Treybal, R. E. (1980). *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill.
- Vera, L. A. (2013). *Cálculo Matemático con MatLab*. Lima: Empresa Editora Macro E.I.R.L.
- Villa, A., "Construcción y puesta en marcha de un secador de bandejas didáctico para el galpón de agroindustrias de UTE 2011", Santo Domingo, Tesis de Grado, 2011.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Rorrer, G., & Wilson, R. E. (2009). *Fundamentals Of Momentum, Heat And Mass Transfer*, 4Th Ed. New Delhi: Wiley India Pvt. Limited.
- Wit Press. (2011). *Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer: Emerging Topics*. U.K.: WIT Press.
- Yang, W. Y. Cao, W., Chung, T.-S., & Morris, J. (2005). *Applied Numerical Methods using MatLab*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.

ANEXOS

ANEXO N°1

PROPIEDADES DEL AIRE

(B) ALGUNAS PROPIEDADES DEL AIRE A LA PRESION ATMOSFERICA

Temperatura °C	Densidad ρ UTM/m ³	Peso específico w kg/m ³	Viscosidad cinemática ν m ² /seg	Viscosidad dinámica μ kg seg/m ²
-20	0,1424	1,3955	$1,188 \times 10^{-5}$	$16,917 \times 10^{-7}$
-10	0,1370	1,3426	1,233	16,892
0	0,1319	1,2926	1,320	17,411
10	0,1273	1,2475	1,415	18,013
20	0,1229	1,2047	1,488	18,288
30	0,1188	1,1642	1,600	19,008
40	0,1150	1,1270	1,688	19,412
50	0,1115	1,0927	$1,769 \times 10^{-5}$	$19,724 \times 10^{-7}$

Propiedades del aire a la presión atmosférica*.

Los valores de μ , k , c_p y Pr dependen poco de la presión y se pueden utilizar en un intervalo bastante amplio de presiones

T, K	ρ , kg/m ³	c_p , kJ/kg · °C	$\mu \times 10^5$, kg/m · s	$\nu \times 10^6$, m ² /s	k, W/m · °C	$\alpha \times 10^4$, m ² /s	Pr
100	3,6010	1,0266	0,6924	1,923	0,009246	0,02501	0,770
150	2,3675	1,0099	1,0283	4,343	0,013735	0,05745	0,753
200	1,7684	1,0061	1,3289	7,490	0,01809	0,10165	0,739
250	1,4128	1,0053	1,5990	11,31	0,02227	0,15675	0,722
300	1,1774	1,0057	1,8462	15,69	0,02624	0,22160	0,708
350	<u>0,9980</u>	<u>1,0090</u>	<u>2,075</u>	<u>20,76</u>	<u>0,03003</u>	<u>0,2981</u>	<u>0,697</u>
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,4222	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,34	0,04360	0,6532	0,680
600	0,5879	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,7512	0,680
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,8578	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05230	0,9672	0,684
750	0,4709	1,0856	3,481	73,91	0,05509	1,0774	0,686
800	0,4405	1,0978	3,625	82,29	0,05779	1,1951	0,689
850	0,4149	1,1095	3,765	90,75	0,06028	1,3097	0,692
900	0,3925	1,1212	3,899	99,3	0,06279	1,4271	0,696
950	0,3716	1,1321	4,023	108,2	0,06525	1,5510	0,699
1.000	0,3524	1,1417	4,152	117,8	0,06752	1,6779	0,702
1.100	0,3204	1,160	4,44	138,6	0,0732	1,969	0,704
1.200	0,2947	1,179	4,69	159,1	0,0782	2,251	0,707
1.300	0,2707	1,197	4,93	182,1	0,0837	2,583	0,705
1.400	0,2515	1,214	5,17	205,5	0,0891	2,920	0,705
1.500	0,2355	1,230	5,40	229,1	0,0946	3,262	0,705
1.600	0,2211	1,248	5,63	254,5	0,100	3,609	0,705
1.700	0,2082	1,267	5,85	280,5	0,105	3,977	0,705
1.800	0,1970	1,287	6,07	308,1	0,111	4,379	0,704
1.900	0,1858	1,309	6,29	338,5	0,117	4,811	0,704
2.000	0,1762	1,338	6,50	369,0	0,124	5,260	0,702
2.100	0,1682	1,372	6,72	399,6	0,131	5,715	0,700
2.200	0,1602	1,419	6,93	432,6	0,139	6,120	0,707
2.300	0,1538	1,482	7,14	464,0	0,149	6,540	0,710
2.400	0,1458	1,574	7,35	504,0	0,161	7,020	0,718
2.500	0,1394	1,688	7,57	543,5	0,175	7,441	0,730

ANEXO N°2

VISCOSIDAD DINAMICA Y CINEMATICA DE ALGUNOS GASES A 1,01325 BAR Y 0° C.

Gas	Constante del gas R_i (J/kg · K)	Viscosidad	
		Dinámica $\eta \cdot 10^{-6}$ (Ns/m ²)	Cinemática $\nu \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Hidrógeno, H ₂	4.123,1	8,50	94,6
Helio, He.....	2.079,7	18,76	104,8
Amoniaco, NH ₃	488,3	9,05	11,8
Nitrógeno, N ₂	296,8	16,65	13,5
Aire seco.....	287,1	17,16	13,3
Oxígeno, O ₂	259,9	19,26	13,5
Anhidrido carbónico, CO ₂	188,9	13,66	6,9
Anhidrido sulfuroso, SO ₂	129,8	11,68	4,0

ANEXO N°3

PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA LIQUIDA

Tabla C.1 Propiedades físicas del agua

Temperatura, °C	Peso específico γ , kg/m ³	Densidad ρ , kg-seg ² /m ⁴	Viscosidad $\mu \times 10^4$, kg-seg/m ²	Viscosidad cinemática $\nu \times 10^6$, m ² /seg	Tensión superficial $\sigma \times 10^2$, kg/m	Presión del vapor P_v , kg/cm ²	Módulo de elasticidad volumétrico K, kg/cm ²
0,0	1.000	101,94	1,83	1,79	0,7709	0,0056	20.320
4,4	1.000	101,94	1,58	1,55	0,7649	0,0077	20.812
10,0	1.000	101,94	1,34	1,31	0,7560	0,0119	21.445
15,6	1.000	101,94	1,14	1,12	0,7486	0,0183	21.937
21,1	999	101,83	0,996	0,975	0,7396	0,0253	22.429
26,7	995	101,43	0,879	0,864	0,7322	0,0358	22.851
32,2	994	101,33	0,776	0,765	0,7233	0,0492	23.132
37,8	993	101,22	0,693	0,684	0,7128	0,0675	23.273
49,0	987	100,61	0,571	0,567	0,6935	0,1195	23.413
66,0	980	99,90	0,442	0,442	0,6637	0,2601	23.062
82,0	970	98,88	0,354	0,358	0,6340	0,5273	22.359
100,0	958	97,66	0,290	0,296	0,5997	1,0335	21.304

ANEXO N°4

DENSIDADES TIPICAS DE ALGUNOS ALIMENTOS Y OTRAS SUSTANCIAS

Table 1.1 Densities of foods and other materials

Material	Density (kg m ⁻³)	Bulk density (kg m ⁻³)	Temperature (°C)
<i>Solids</i>			
Aluminium	2640	-	0
Copper	8900	-	0
Stainless steel	7950	-	20
Concrete	2000	-	20
Grapes	1067	368	-
Tomatoes	-	672	-
Lemons/oranges	-	768	-
Fresh fruit	865-1067	-	-
Frozen fruit	625-801	-	-
Fresh fish	967	-	-
Frozen fish	1056	-	-
Water (0°C)	1000	-	0
Ice (0°C)	916	-	0
Ice (-10°C)	933	-	-10
Ice (-20°C)	948	-	-20
Fat	900-950	-	20
Salt	2160	960	-
Sugar (granulated)	1590	800	-
Sugar (powdered)	-	480	-
Starch	1500	-	-
Wheat	1409-1430	790-819	-
Wheat flour	-	480	-
Barley	1374-1415	564-650	-
Oats	1350-1378	358-511	-
Rice	1358-1386	561-591	-
<i>Gases</i>			
Air	1.29	-	0
Air	0.94	-	100
Carbon dioxide	1.98	-	0
Carbon dioxide	1.46	-	100
Nitrogen	1.30	-	0

Adapted from data of Earle (1983), Lewis (1990), Milson and Kirk (1980), Peleg (1983) and Mohsenin (1970).

ANEXO N°5

TABLAS DE VAPOR SATURADO

A.2-9 Propiedades del vapor saturado y del agua (tablas de vapor)
Unidades SI

Tempe- ratura (°C)	p_{sat} Presión de vapor (kPa)	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg · K)	
		Líquido	Vapor saturado	Líquido	Vapor saturado	Líquido	Vapor saturado
0.01	0.6113	0.0010002	206.136	0.00	2501.4	0.0000	9.1562
3	0.7577	0.0010001	168.132	12.57	2506.9	0.0457	9.0773
6	0.9349	0.0010001	137.734	25.20	2512.4	0.0912	9.0003
9	1.1477	0.0010003	113.386	37.80	2517.9	0.1362	8.9253
12	1.4022	0.0010005	93.784	50.41	2523.4	0.1806	8.8524
15	1.7051	0.0010009	77.926	62.99	2528.9	0.2245	8.7814
18	2.0640	0.0010014	65.038	75.58	2534.4	0.2679	8.7123
21	2.487	0.0010020	54.514	88.14	2539.9	0.3109	8.6450
24	2.985	0.0010027	45.883	100.70	2545.4	0.3534	8.5794
25	3.169	0.0010029	43.360	140.89	2547.2	0.3674	8.5580
→27	3.567	0.0010035	38.774	113.25	2550.8	0.3954	8.5156
30	4.246	0.0010043	32.894	125.79	2556.3	0.4369	8.4533
33	5.034	0.0010053	28.011	138.33	2561.7	0.4781	8.3927
36	5.947	0.0010063	23.940	150.86	2567.1	0.5188	8.3336
40	7.384	0.0010078	19.523	167.57	2574.3	0.5725	8.2570
45	9.593	0.0010099	15.258	188.45	2583.2	0.6387	8.1648
50	12.349	0.0010121	12.032	209.33	2592.1	0.7038	8.0763
55	15.758	0.0010146	9.568	230.23	2600.9	0.7679	7.9913
60	19.940	0.0010172	7.671	251.13	2609.6	0.8312	7.9096
65	25.03	0.0010199	6.197	272.06	2618.3	0.8935	7.8310
70	31.19	0.0010228	5.042	292.98	2626.8	0.9549	7.7553
75	38.58	0.0010259	4.131	313.93	2635.3	1.0155	7.6824
80	47.39	0.0010291	3.407	334.91	2643.7	1.0753	7.6122
85	57.83	0.0010325	2.828	355.90	2651.9	1.1343	7.5445
90	70.14	0.0010360	2.361	376.92	2660.1	1.1925	7.4791
95	84.55	0.0010397	1.9819	397.96	2668.1	1.2500	7.4159
100	101.35	0.0010435	1.6729	419.04	2676.1	1.3069	7.3549

ANEXO N°6

PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN DE PESOS DE BALANZA

Los pesos leídos por la balanza se pueden someter a una corrección tomando en cuenta un parámetro constante y medible de ella que es la T_s , que cuantifica la temperatura de superficie de la balanza

La fórmula para estimar el error inducido por el efecto de la temperatura en la balanza, obedece la siguiente forma:

$$y = bx - a$$

Que es la ecuación de la recta, que describe la relación entre el error y la lectura efectuada, o sea:

$$e = bT_s - a$$

Los coeficientes b y a , se determinan a partir de

$$e(i) = \frac{P_{real} - P_{leído}}{P_{real}}, \text{ para } T_s(i), \quad i = \text{inicio}$$

$$e(f) = \frac{P_{real} - P_{leído}}{P_{real}}, \text{ para } T_s(f), \quad f = \text{final}$$

Entonces mediante los pares de datos:

$$[e(i), T_s(i)],$$

$$[e(f), T_s(f)]$$

Se aplica regresión lineal simple para determinar a , y b de la ecuación de la recta y así aproximarse mayormente a los pesos reales.

Generalmente existe un error promedio de 5% al 7%

Este procedimiento *debe efectuarse cada vez* que se realice un ensayo y aplicarse para dicho caso en particular.

ANEXO N°7

DATOS DE PROCESO DE ENSAYO 1 (PRELIMINAR)

ENTRADA AIRE		CALENTAMIENTO		SALIDA AIRE		SECADOR	
HR(%)	T.ing (°C)	T(°C)	P(psi)	TBS(°C)	TBH(°C)	T. int(°C)	Tsalida(°C)
61	31,6	68	0	39	29	52	52
59	29	68	5	44	30	55	64
60	30,3	68	2,5	41,5	29,5	53,5	58

ANEXO N°8

DATOS DE PROCESO ENSAYO 2 (Soya 13 de Junio 2014)

Tabla de datos de proceso N°2							
ENTRADA AIRE		CALENTAMIENTO		SALIDA AIRE		SECADOR	
HR	Ting	T	P	Tbs	Tbh	Tint.*	Tsalida
72	28,9	87	40	38	26		
64	30	86	40	42	26	54	66
64	31,1	86	40	42	26,5	55	68
65	31,5	82	15	46	27	56	69
63	31,8	86	40	46	27	54	68
58	33	86	40	51	30	51	64
55	33,5	68	0	48	28	56	69
55	33	47	0	48	27	55	58
62	31,6	78,5	26,875	45,125	27,1875	54,428571	66

*Es la temperatura del producto
 Peso de condensados: 55 kg.

ANEXO N°9

CÁLCULOS DE DETERMINACIÓN DE DENSIDAD DE SOYA

1. Densidad de soya seca al 3% de humedad

Masa=875gr

Volumen ocupado=1000 cc

$$\rho_{soya} = 875 \frac{kg}{m^3}$$

CÁLCULOS DE DETERMINACIÓN COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U_k EN EL SISTEMA AIRE-BANDEJA-PRODUCTO; EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN h_c EN EL SISTEMA AIRE-PRODUCTO; LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL PRODUCTO: Soya 13 de Junio 2014

Para el cálculo del U_k , se procede a determinar primero la Conductividad térmica del producto:

1. Conductividad térmica de la Soya K_f . Con la ecuación 16 (véase pág.18)

$$\left(\frac{V_{agua}}{V}\right) = 0.08129$$

$$\left(\frac{V_{sólidos}}{V}\right) = 0.51201$$

$$\left(\frac{V_{aire}}{V}\right) = 1 - \left(\frac{V_{agua}}{V}\right) - \left(\frac{V_{sólidos}}{V}\right) = 0.4066$$

$$k_{ef} = 0.1479 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

2. El segundo paso es determinar el h_c para cada bandeja:

- Para las primeras 4 bandejas de arriba hacia abajo, velocidad del aire es nula; mecanismo dominante es la convección natural.

$$A = 0.9 * 0.6 = 0.54m^2; P = (0.9 + 0.6) * 2 = 3m$$

$$Dimensión_{característica} = \frac{A}{P} = \frac{0.54}{3} = 0.18m$$

Las propiedades del aire evaluadas a Tf, entre 78.5 y 54.42°C (véase el Anexo N°1)

$$\mu_f = 2.0517 * 10^{-5} \frac{kg}{m - seg}; k_f = 0.0281 \frac{W}{m^{\circ}C}; \rho_f = 1.0403 \frac{kg}{m^3}; c_{pf} = 1.03 \frac{KJ}{kg^{\circ}C}$$

$$Pr_f = 0.7527$$

El número de Grashoft (véase pág.16, Ec.9), es:

$$Gr_{horizontal} = \frac{9.8}{273 + 78.5} * (78.5 - 54.42) * (1.0403^2) * (0.18^3)}{(2.0517 * 10^{-5})^2} = 1 * 10^7$$

El número de Rayleigh (véase pág.17 Ec.13)

$$Ra = 1 * 10^7 * 0.7527 = 7.576 * 10^6$$

La correlación para placa con cara superior calentada (véase pág.16 Ec.6), es de:

$$Nu_{horizontal superior} = 0.27 * (3.4842 * 10^6)^{0.25} = 14.1$$

Despeje del h de la Ec.12 (véase pág. 17)

$$h_{horizontal superior} = Nu_{horizontal superior} = 14.1 * \frac{0.0281}{0.18}$$

$$h_{horizontal superior} = \frac{2.21W}{m^2^{\circ}C}$$

Para placas planas horizontales con cara inferior calentada (véase pág.16, Ec.4)

$$Nu_{horizontal inferior} = 0.54 * Ra^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_{horizontal inferior} = 0.54 * (7.576 * 10^6)^{0.25} = 28.31$$

Despeje del h de la Ec.12 (véase pág.17)

$$h_{horizontal inferior} = Nu_{horizontal inferior} = 28.31 * \frac{0.0281}{0.18}$$

$$h_{horizontal inferior} = \frac{4.42W}{m^2 \cdot C}$$

$$h_{promedio 4 bandejas superiores} = \frac{h_{horizontal superior} + h_{horizontal inferior}}{2}$$

$$h_{promedio 4 bandejas superiores} = \frac{2.21 + 4.42}{2} = \frac{3.31W}{m^2 \cdot C}$$

- Para la 5ta. Bandeja de arriba hacia abajo; cuya velocidad media del aire es de 0.295m/seg.

$$Dimensión_{caracteristica} = 0.6m$$

El número de Reynolds es (véase pág.16, Ec.10)

$$Re_L = \frac{0.295 * 1.0403 * 0.6}{2.0517 * 10^{-5}} = 8974.5$$

Criterio, Ec.7 (véase pág.16):

$$\frac{1 * 10^7}{8974.5^2} = 0.124 < 10, convección forzada importante$$

La correlación empírica para el número de Nusselt en placas planas horizontales (véase pág.16, Ec.8), es:

$$Nu_5 = 0.664 * (8974.5)^{0.5} * \left(0.7527^{\frac{1}{3}}\right) = 57.21$$

Despeje del h de la Ec.12 (véase pág. 17)

$$h_5 = Nu_5 * \frac{k_f}{L} = 57.21 * \frac{0.0281}{0.6}$$

$$h_5 = \frac{2.6774W}{m^2 \cdot C}$$

- Para la 6ta. Bandeja de arriba hacia abajo; cuya velocidad media del aire es de 0.2171m/seg.

$$Dimensión_{característica} = 0.6m$$

El número de Reynolds es (véase pág.16 Ec.10)

$$Re_L = \frac{0.2171 * 1.0403 * 0.6}{2.0517 * 10^{-5}} = 6604.6$$

Criterio, Ec.7 (véase pág.16):

$$\frac{1 * 10^7}{6604.6^2} = 0.23 < 10, convección forzada importante$$

La correlación empírica para el número de Nusselt en placas planas horizontales (véase pág.16, Ec.8), es:

$$Nu_6 = 0.664 * (6604.6)^{0.5} * \left(0.7527^{\frac{1}{3}}\right) = 49.086$$

Despeje del h de la Ec.12 (véase pág.17)

$$h_6 = Nu_6 * \frac{k_f}{L} = 49.086 * \frac{0.0281}{0.6}$$

$$h_6 = \frac{2.2969W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- Para la 7ma. Bandeja de arriba hacia abajo; cuya velocidad media del aire es de 0.58m/seg.

$$Dimensión_{característica} = 0.6m$$

El número de Reynolds es (véase pág.16 Ec.10)

$$Re_L = \frac{0.58 * 1.0403 * 0.6}{2.0517 * 10^{-5}} = 17645$$

Criterio, Ec.7 (véase pág.16):

$$\frac{1 * 10^7}{17645^2} = 0.0323 \ll 10, \text{convección forzada importante}$$

La correlación empírica para el número de Nusselt en placas planas horizontales (véase pág.16 Ec.8), es:

$$Nu_7 = 0.664 * (17645)^{0.5} * \left(0.7527^{\frac{1}{3}}\right) = 80.23$$

Despeje del h de la Ec.12 (véase pág.17)

$$h_7 = Nu_7 * \frac{k_f}{L} = 80.23 * \frac{0.0281}{0.6}$$

$$h_7 = \frac{3.7545W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Coeficiente medio de transferencia de calor por convección:

$$hc_{medio} = \frac{h_{1-4} + h_5 + h_6 + h_7}{7}$$

$$hc_{medio} = \frac{(3.31 * 4) + 2.6774 + 2.2969 + 3.7545}{7}$$

$$hc_{medio} = \frac{3.1408W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

El tercer paso es, a partir del K_f y el hc , determinar el U_k , (véase pág.17, Ec.15)

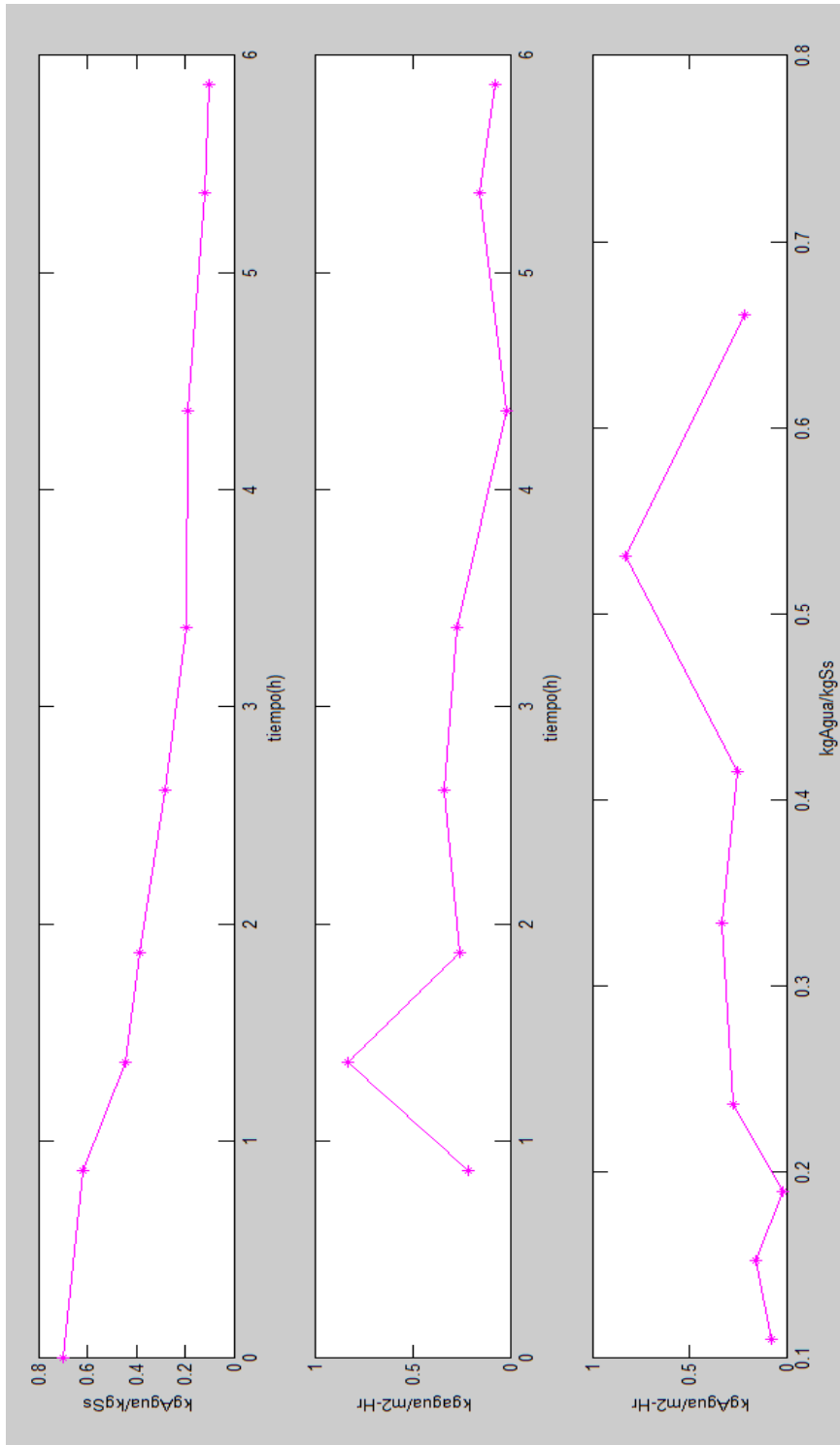
$$hc = \frac{3.1408W}{m^2 \text{ } ^\circ C}; z_{metal} = \frac{0.7}{1000} m; k_{metal} = \frac{54W}{m \text{ } ^\circ C}; z_{sólido} = \frac{12.5}{1000} m; k_{sólido}$$

$$= \frac{0.1479W}{m \text{ } ^\circ C}$$

$$U_k = \frac{2.4817W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

ANEXO N°10

GRÁFICAS DE SECADO REALES OBTENIDAS POR SIMULADOR PARA SOYA 13 JUNIO 2014



ANEXO N°11

CAPTURAS DE SIMULADOR PARA CALCULOS DE TIEMPO DE SECADO Y CANTIDAD DE CALOR TOTAL PARA SOYA 13 DE JUNIO 2014.

```
introduzca los datos de pesos de la muestra (Kg):[30 28.58 25.44 24.48 22.58 21.045 20.92 19.74 19.44]
introduzca los tiempos (min):[0 52 82 112 157 202 262 322 352]
ingrese la humedad inicial (%)41.2
introduzca el numero de pares de datos:9
ingrese si es el secado por una o ambas caras 2
¿Desplegar las graficas de secado (S=1/N=0)? 1
Ponga la masa inicial del producto 30
Ponga el % de sólidos inicial 0.588
Ponga el % de sólidos de la humedad critica 0.9070
Ponga el % de solidos de la humedad final 0.9070
Ponga la temperatura promedio de calentamiento del aire °C 78.5
Ponga la temperatura promedio del producto °C 54.42
ponga la temperatura promedio de salida del aire del secador °C 66
Ponga la densidad1 del producto seco Kg/m3 875
Ponga el espesor del producto m 0.0125
TC, es el tiempo de secado teórico en la el período constante

TIEMPO_TOTAL_TEORICO_SECADO =

    6.2767

Ponga la masa práctica de condensados kg 55

Calor_Total_Practico_1 =

    1.3473e+005

Calor_Total_Practico_1 está en KJ, según el Método 1
```

ANEXO N°12

DATOS DE PROCESO ENSAYO 3 (SOYA 19 JUNIO 2014)

Tabla de datos de proceso N°3							
ENTRADA AIRE		CALENTAMIENTO		SALIDA DEL AIRE		SECADOR	
HR	Ting.	T	P	Tbs	Tbh	T.int.	T.sal.
69	29,8	86	44	43	28	53	61
58	32,5	76	2	47	29	57	65
53	33,1	54	0	43	28	55	57
57	30,8	46	0	40	30	55	54
52	32,1	82	22	43	29	52	59
47	34,4	64	0	45	29,5	59	65
50	32,4	50	0	41	29	58	58
50	33,9	48	0	45	29	50	53
50	34	82	40	46	29,5	55	63
51	32,2	52	0	46	29,5	60	61
53,7	32,52	64	10.8	43,9	29,05	55,4	59,6
Peso de condensados: 43.7kg.							

ANEXO N°13

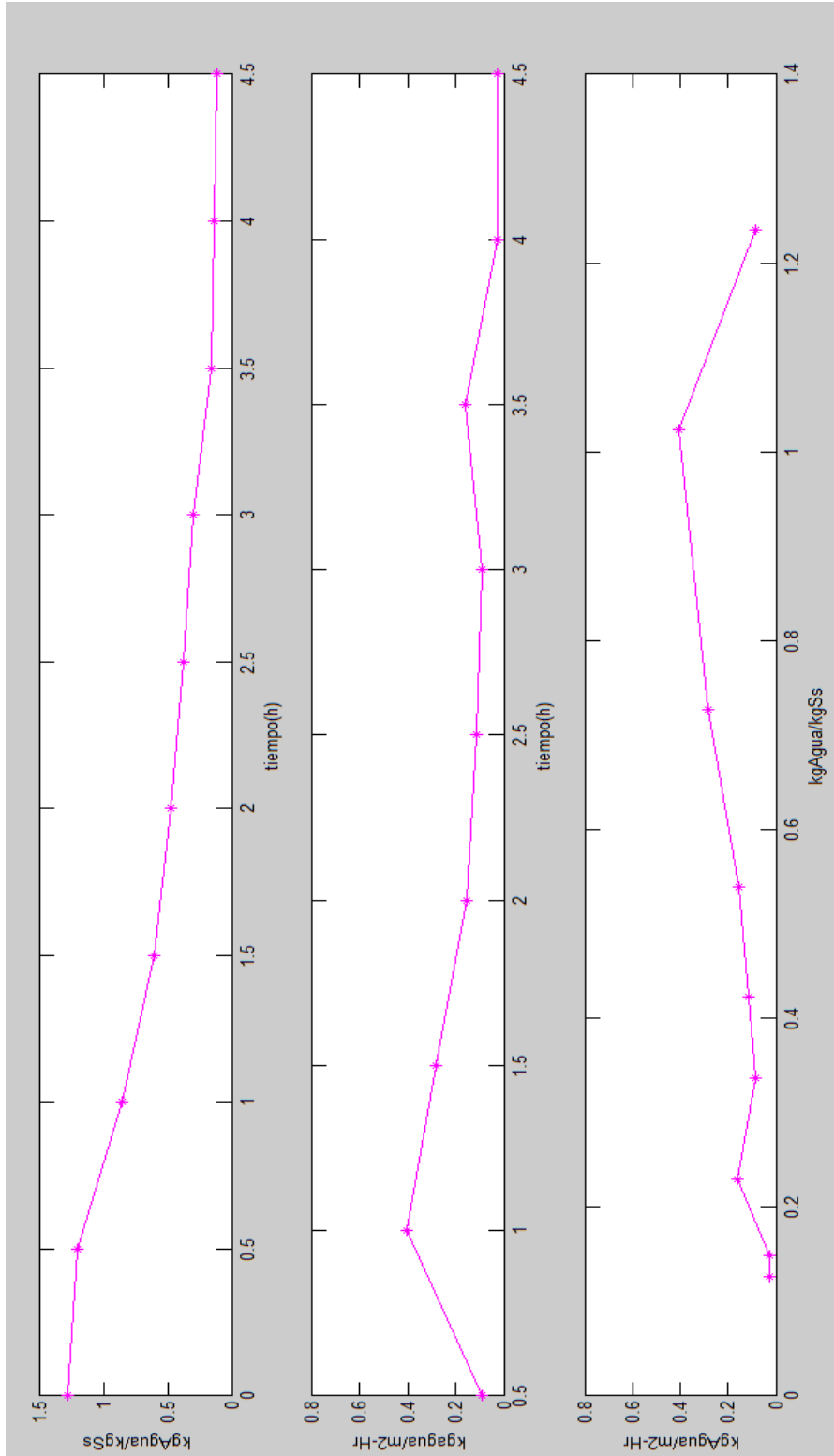
CALCULOS DE DETERMINACIÓN COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U_k EN EL SISTEMA AIRE-BANDEJA-PRODUCTO; EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN h_c EN EL SISTEMA AIRE-PRODUCTO; LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL PRODUCTO: SOYA DE 19 JUNIO 2014

Los cálculos efectuados siguen el mismo procedimiento descrito anteriormente (véase Anexo N°9), por lo cual se resumen los resultados de operaciones matemáticas en la siguiente tabla:

CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL ALIMENTO	
Fracción volumen de agua $\left(\frac{V_{agua}}{V}\right)$	0.092
Fracción volumen de sólidos $\left(\frac{V_{sólidos}}{V}\right)$	0.5050
Fracción volumen de aire $\left(\frac{V_{aire}}{V}\right)$	0.40298
Coeficiente de Conductividad (W/m°C)	0.1531
COEFICIENTE PROMEDIO DE CONVECCION PARA BANDEJAS Y GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	
h_1 (W/m ² °C)	2.58
h_2 (W/m ² °C)	2.58
h_3 (W/m ² °C)	2.58
h_4 (W/m ² °C)	2.58
h_5 (W/m ² °C)	2.67
h_6 (W/m ² °C)	2.29
h_7 (W/m ² °C)	3.75
h_c promedio (W/m ² °C)	2.72
Coeficiente Global de Transferencia de calor (W/m ² °C)	2.502

ANEXO N°14

GRAFICAS DE SECADO REALES PARA SOYA 19 JUNIO 2014



ANEXO N°15

CAPTURAS DE SIMULADOR PARA CALCULOS DE TIEMPO DE SECADO Y CANTIDAD DE CALOR TOTAL ENSAYO 3 (SOYA 19 JUNIO 2014)

```
introduzca los datos de pesos de la muestra (Kg):[9.99 9.66 8.13 7.06 6.47 6.04 5.71 5.1 5 4.91]
introduzca los tiempos (min):[0 30 60 90 120 150 180 210 240 270]
ingrese la humedad inicial (%)55.99
introduzca el numero de pares de datos:10
ingrese si es el secado por una o ambas caras 2
¿Desplegar las graficas de secado (S=1/N=0)? 1
Ponga la masa inicial del producto 9.99
Ponga el % de sólidos inicial 0.44
Ponga el % de sólidos de la humedad critica 0.8946
Ponga el % de solidos de la humedad final 0.8946
Ponga la temperatura promedio de calentamiento del aire °C 64
Ponga la temperatura promedio del producto °C 55.4
ponga la temperatura promedio de salida del aire del secador °C 59.6
Ponga la densidad1 del producto seco Kg/m3 875
Ponga el espesor del producto m 0.005
TC, es el tiempo de secado teórico en la el período constante

TIEMPO_TOTAL_TEORICO_SECADO =

5.8235

Ponga la masa práctica de condensados kg 43.7

Calor_Total_Practico_1 =

1.0705e+005

Calor_Total_Practico_1 está en KJ, según el Método 1
```

ANEXO N°16

DATOS DE PROCESO ENSAYO 4 (SOYA 23 JUNIO 2014)

Tabla de datos de proceso N°4									
INGRESO AIRE		CALENTAMIENTO		SALIDA AIRE		CÁMARA DE SECADO		CALDERO	
HR	Ting.	T	P	Tbs	Tbh	Tint.	Tsalida	Tgases	P
69	28,3	84	40	39	26	46	59	160	94
70	26,9	65	0	45	26	57	63	140	100
64	29,9	78	10	44	27	56	65	140	100
65	28,8	50	0	40	27	56	56	275	107
64	28,8	80	40	45	27	52	59	188	104
56	30,8	54	0	43	27	59	61	125	92
68	27,4	38	0	43	26,5	52	50	285	102
65	28,2	64	0	43	26	59	64	130	99
68	27,5	40	0	41	26	54	51	280	98
65	29,2	64	0	43	26	59	64	135	100
68	28	70	20	41	25	50	52	150	92
65	28,5	64	0	42	26	56	60	182	98
65,5	28,5	62,5	9,1	42,4	26,2	54,6	58,6	182,5	98,8
Peso de condensados: 38 kg.									

ANEXO N°17

CÁLCULOS DE DETERMINACIÓN COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U_k EN EL SISTEMA AIRE-BANDEJA-PRODUCTO; EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN h_c EN EL SISTEMA AIRE-PRODUCTO; LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL PRODUCTO: SOYA 23 JUNIO 2014

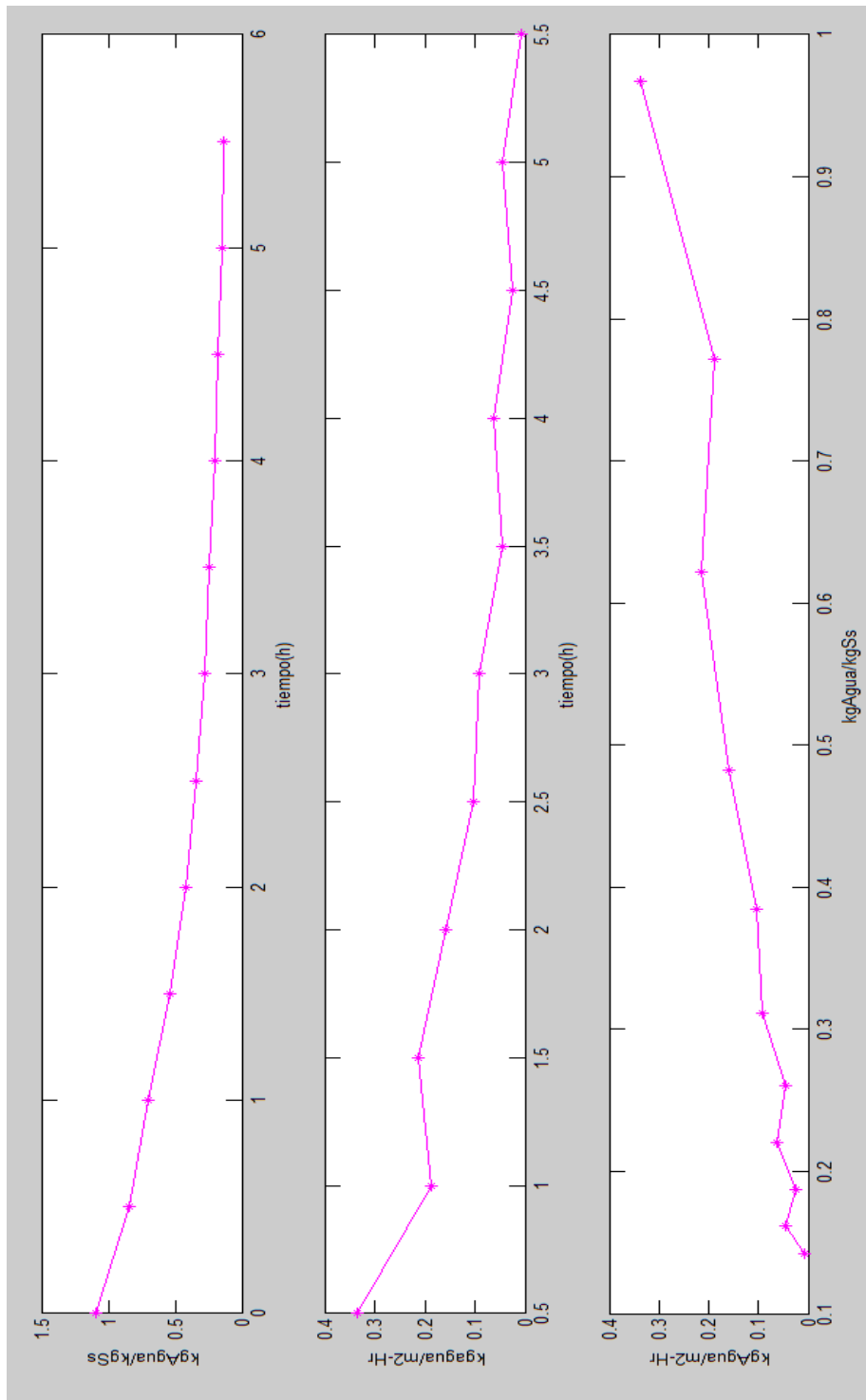
Los resultados se resumen a continuación

CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL ALIMENTO	
Fracción volumen de agua $\left(\frac{V_{agua}}{V}\right)$	0.1066
Fracción volumen de sólidos $\left(\frac{V_{sólidos}}{V}\right)$	0.4956
Fracción volumen de aire $\left(\frac{V_{aire}}{V}\right)$	0.3977
Coeficiente de Conductividad (W/m°C)	0.1609
COEFICIENTE PROMEDIO DE CONVECCION PARA BANDEJAS Y GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	
h_1 (W/m ² °C)	2.53
h_2 (W/m ² °C)	2.53
h_3 (W/m ² °C)	2.53
h_4 (W/m ² °C)	2.53
h_5 (W/m ² °C)	2.67
h_6 (W/m ² °C)	2.29
h_7 (W/m ² °C)	3.75
<i>hc promedio</i> (W/m ² °C)	2.70
Coeficiente Global de Transferencia de calor (W/m ² °C)	2.491

ANEXO N°18

GRÁFICAS DE SECADO REALES OBTENIDAS POR SIMULACION SOYA 23

JUNIO 2014



ANEXO N°19

CAPTURAS DE SIMULACION CALCULOS DE TIEMPO DE SECADO Y CANTIDAD DE CALOR TOTAL SOYA 23 JUNIO 2014

introduzca los datos de pesos de la muestra (Kg):[10.60 9.33 8.62 7.81 7.21 6.82 6.47 6.30 6.06 5.97 5.8 5.77]
introduzca los tiempos (min):[0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330]
ingrese la humedad inicial (%)52.21
introduzca el numero de pares de datos:12
ingrese si es el secado por una o ambas caras 2
¿Desplegar las graficas de secado (S=1/N=0)? 1
Ponga la masa inicial del producto 10.6
Ponga el % de sólidos inicial 0.47789
Ponga el % de sólidos de la humedad critica 0.878
Ponga el % de solidos de la humedad final 0.878
Ponga la temperatura promedio de calentamiento del aire °C 62.58
Ponga la temperatura promedio del producto °C 54.67
ponga la temperatura promedio de salida del aire del secador °C 58.67
Ponga la densidadl del producto seco Kg/m3 875
Ponga el espesor del producto m 0.005
TC, es el tiempo de secado teórico en la el periodo constante

TIEMPO_TOTAL_TEORICO_SECADO =

5.8421

Ponga la masa práctica de condensados kg 38

Calor_Total_Practico_1 =

9.3085e+004

Calor_Total_Practico_1 está en KJ, según el Método 1

ANEXO N°20

MODIFICACIÓN DE ESTANTERÍA. REMOCIÓN DE RUEDAS



ANEXO N°21

ESTRUCTURA DE PLATINA DE ACERO INOXIDABLE 1"x1/4"



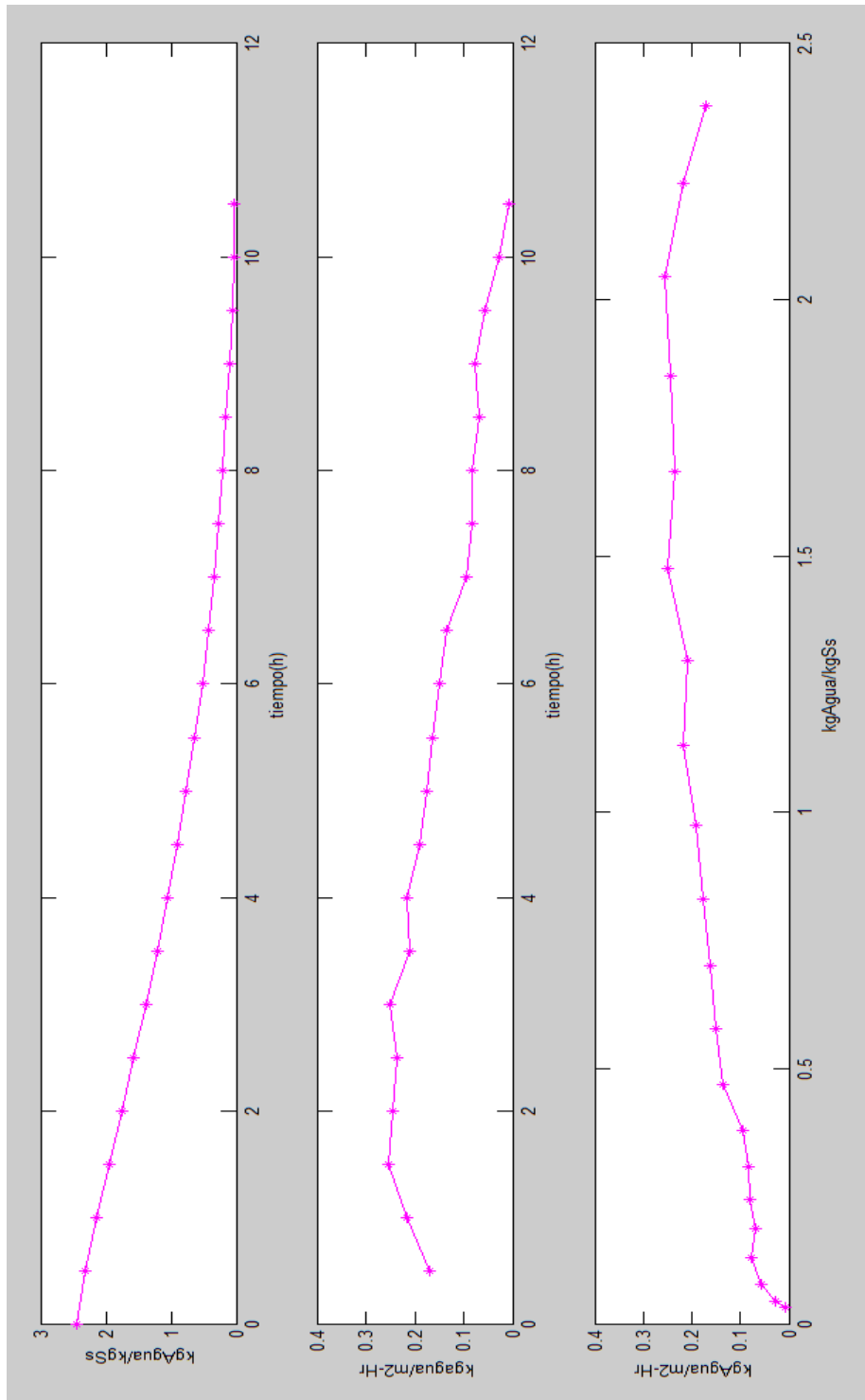
ANEXO N°22

DESMONTAJE DE DIFUSOR E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN



ANEXO N°23

GRÁFICAS DE SECADO REALES OBTENIDAS POR EL SIMULADOR CHOCLO TIERNO 28-29 AGOSTO 2014



ANEXO N°24

CAPTURAS DE SIMULADOR PARA CÁLCULOS DE TIEMPO DE SECADO Y CANTIDAD DE CALOR TOTAL CHOCLO TIERNO 28-29 AGOSTO 2014

```
introduzca los datos de pesos de la muestra (Kg):[16.77 16.12567 15.307035 14.343255 13.422645 12.529355 11.581425 10.789065 9.970105 9.25177 8.585325 7.970145
introduzca los tiempos (min):[0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360 390 420 450 480 510 540 570 600 630]
ingrese la humedad inicial (%):70.9637
introduzca el numero de pares de datos:22
ingrese si es el secado por una o ambas caras 2
¿Desplegar las graficas de secado (S=1/N=0)? 1
Ponga la masa inicial del producto 16.77
Ponga el % de sólidos inicial 0.290363
Ponga el % de sólidos de la humedad crítica 0.7874
Ponga el % de sólidos de la humedad final 0.97
Ponga la temperatura promedio de calentamiento del aire °C 82.78
Ponga la temperatura promedio del producto °C 70.35
Ponga la temperatura promedio de salida del aire del secador °C 77.33
Ponga la densidad del producto seco Kg/m3 482
Ponga el espesor del producto m 0.004
TC =
7.4572
TC, es el tiempo de secado teórico en la el periodo constante
TDC =
2.0068
```

TIEMPO_TOTAL_TEORICO_SECADO =

9.4640

Ponga la masa práctica de condensados kg 95.65

calor_practico_1 =

2.3431e+005

El calor_practico_1 está en KJ, según el Método 1

Ponga la temperatura de entrada del aire al equipo °C 34.83

Ponga el calor perdido hacia el ambiente W/m2 62

calor_practico_2 =

2.4390e+005

Qttotal_teorico =

2.2258e+005

El calor_practico_2 está en KJ, según el Método 3

El Qttotal teorico está en KJ, según el Método 3

¿Desea las gráficas de secado teóricas y reales (S=1/N=0)? 1

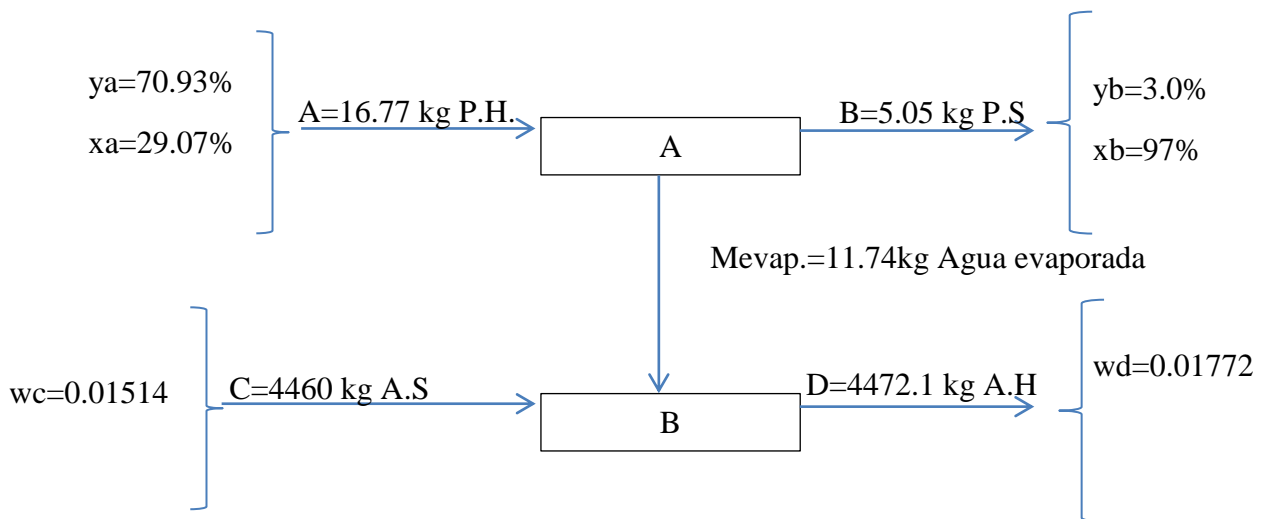
..

ANEXO N°25

BALANCE DE MASA DE OPERACIÓN UNITARIA DE DESHIDRATACIÓN CHOCLO TIERNO 28-29 AGOSTO 2014

De acuerdo con los datos de entrada del aire (Tabla 9, pág.82), a HR=43.17%, y Tbs=34.83: la presión de saturación del vapor de agua es de 5.581 KPa (véase Anexo N°5), que con la HR=43.17%, la presión de vapor real en el aire es de $5.581 \cdot 0.4317 = 2.4093$ KPa; la humedad absoluta se tiene así:

$$w_i = 0.622 \cdot \frac{p_w}{P_{atm} - p_w} = 0.622 \cdot \left(\frac{2.4093}{101.350 - 2.4093} \right) = \frac{0.0151462 \text{ kg Agua}}{\text{kg Aire Seco}}$$



Base de Cálculo: todo el proceso de secado

Balance total de A

$$A = B + \text{Mevap}$$

$$\text{Mevap} = A - B$$

$$\text{Mevap} = 16.77 - B$$

Balance parcial de sólidos en A:

$$A(x_a) = B(x_b)$$

$$B = A(x_a) / x_b$$

$$B = 16.77(0.2907) / 0.97 = 5.025 \text{ kg de producto seco.}$$

Entonces:

$$\text{Mevap}=16.77-B$$

$$\text{Mevap}=16.77-5.025=11.745 \text{ kg de agua evaporada}$$

Balance total en B:

$$C+\text{Mevap}=D$$

$$4460.4+11.745=4472.145 \text{ kg de Aire húmedo}$$

Balance parcial de humedad en B:

$$C(wc)+\text{Mevap}(1)=D(wd)$$

$$[C(wc)+\text{Mevap}]/wd=D$$

$$[4460.4(0.01514)+11.745(1)]/0.01772=4473.5 \text{ kg de Aire húmedo}$$

ANEXO N°26

DATOS DE PROCESO DE ENSAYO 6 (HABAS 1-2/SEPT/2014)

SALIDA DE AIRE		INGRESO AIRE		CALENTAMIENTO		CÁMARA DE SECADO		ANEMÓMETRO	CALDERO		
Tbh	Tbs	HR	Ting	T	P	Tinterna	Tsalida	Velocidad	P	Tgases	Thogar
27	43	42	35,7	87	42	62	61	2,5	98	270	921
29	41	42	36,4	87,5	41,5	57	65	2,59	100	275	941
30	49	39	36,3	87	40	58	68	2,49	100	270	950
29	44	38	37,1	88	40	59	71	2,65	96	260	895
29	42	36	37,8	88	40	60	73	2,7	100	175	906
29	46	35	38	88	40	62	74	2,62	100	280	938
29	50	32	38,2	88,5	40	65	76	2,6	98	270	908
30	49,5	33	38	88	40	66	77	2,65	99	180	918
29	50	35	36,9	88	40	68	79	2,59	102	190	941
30	51	35	37	87	40	69,5	80	2,67	92	280	855

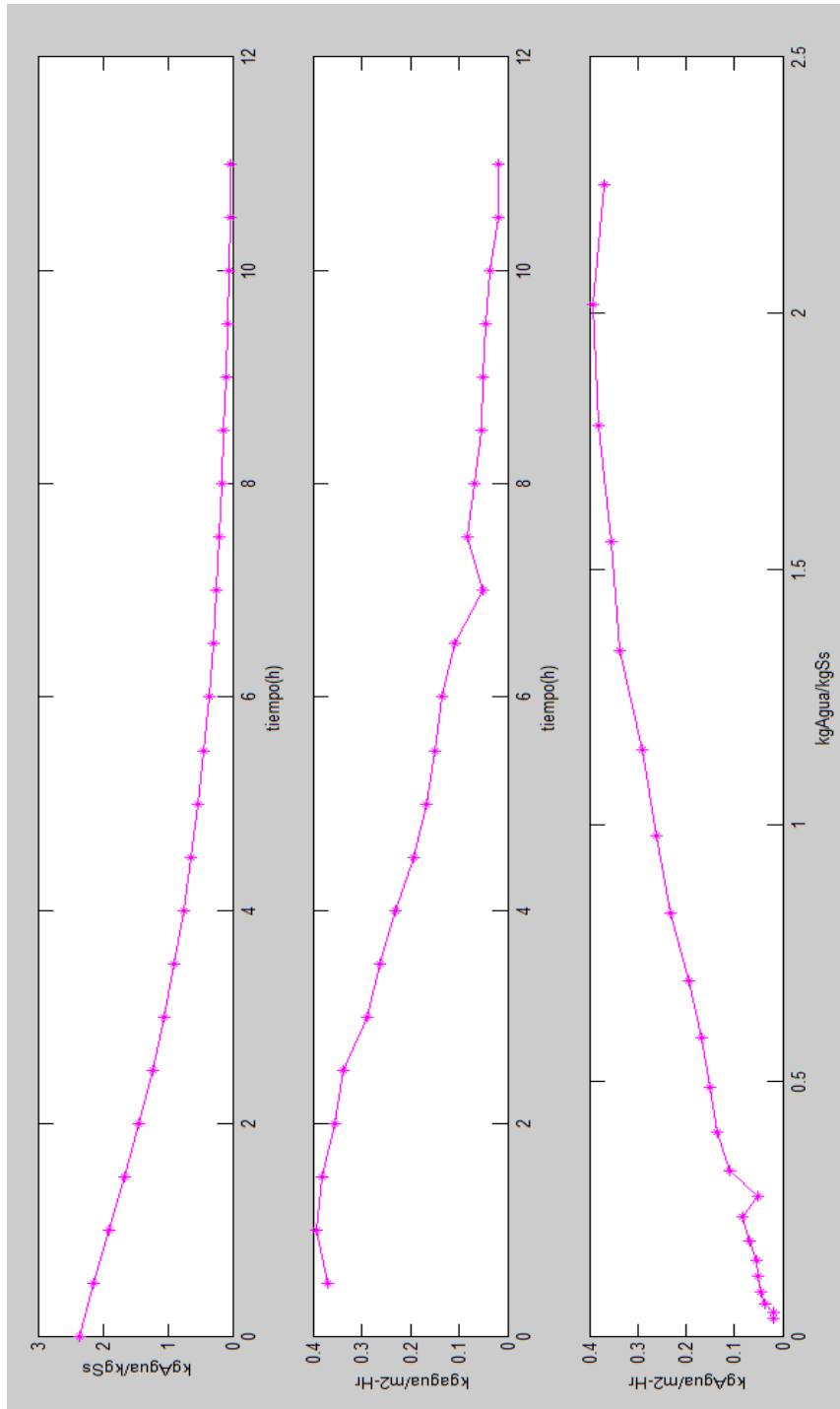
Continúa en la siguiente página

Continuación

29,5	51	35	36,4	87	40	72	81	2,57	102	275	969
30	55	36	36,7	87,5	40	74	82	2,62	100	280	945
28	50	37	35,8	87	40	75	83	2,67	92	220	867
28	51	38	34,8	86	40	75	83	2,57	100	180	901
28	52	40	34,8	86	40	76	84	2,5	96	265	900
27	49	40	34,6	86	40	78	84	2,72	100	275	946
28	51	40	34,1	86	40	79	84	2,6	98	170	903
23	39	53	29,8	82	42	57	61	2,71	102	225	961
26	49	50	31,4	84	40	73	80	2,85	104	280	998
26	49	46	32,8	85	41	81	83	2,9	98	185	886
26	51	45	32,1	85	41	83	84	2,88	98	190	929
26	52	43	33,5	85,7	41	84	85	2,85	96	155	881
26	50	42	33,4	85,7	42	83	85	2,32	96	285	870
26	46	41	34,5	86	41	85	86	2,47	98	169	889
27,85	48,35	39,70	35,25	86,49	40,47	70,89	77,87	2,63	98,54	233,5	917,416
Masa de Condensados = 101.15kg											

ANEXO N°27

GRÁFICAS DE SECADO REALES OBTENIDAS POR SIMULADOR HABAS 1-2 SEPTIEMBRE 2014



ANEXO N°28

CAPTURAS DE SIMULADOR CÁLCULOS PARA TIEMPO DE SECADO Y CANTIDAD DE CALOR TOTAL HABAS 1-2 SEPTIEMBRE 2014

```

introduzca los datos de pesos de la muestra (Kg):{20.69924878 19.30433 17.8205 16.3832 15.04108 13.76133 12.66604 11.67968 10.80639 10.07376
introduzca los tiempos (min):{0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360 390 420 450 480 510 540 570 600 630 660}
ingrese la humedad inicial (%){70.23
introduzca el numero de pares de datos:23
ingrese si es el secado por una o ambas caras 2
¿Desplegar las graficas de secado (S=1/N=0)? 1
Ponga la masa inicial del producto 20.69
Ponga el % de sólidos inicial 0.2976
Ponga el % de sólidos de la humedad critica 0.9496
Ponga el % de sólidos de la humedad final 0.962
Ponga la temperatura promedio de calentamiento del aire °C 86.49
Ponga la temperatura promedio del producto °C 70.89
Ponga la densidad del producto seco Kg/m3 396
Ponga el espesor del producto M 0.01

```

TC =

10.1784

TC, es el tiempo de secado teórico en la el período constante

TDC =

0.0692

TIEMPO_TOTAL_TEORICO_SECADO =

10.2476

Ponga la masa práctica de condensados kg 101.15

calor_practico_1 =

2.4778e+005

El calor_practico_1 está en KJ, según el Método 1

Ponga la temperatura de entrada del aire al equipo °C 35.25

Ponga el calor perdido hacia el ambiente W/m2 62

calor_practico_2 =

2.6079e+005

Qttotal_teorico =

2.4527e+005

El calor_practico_2 está en KJ, según el Método 3

El Qttotal teorico está en KJ, según el Método 3

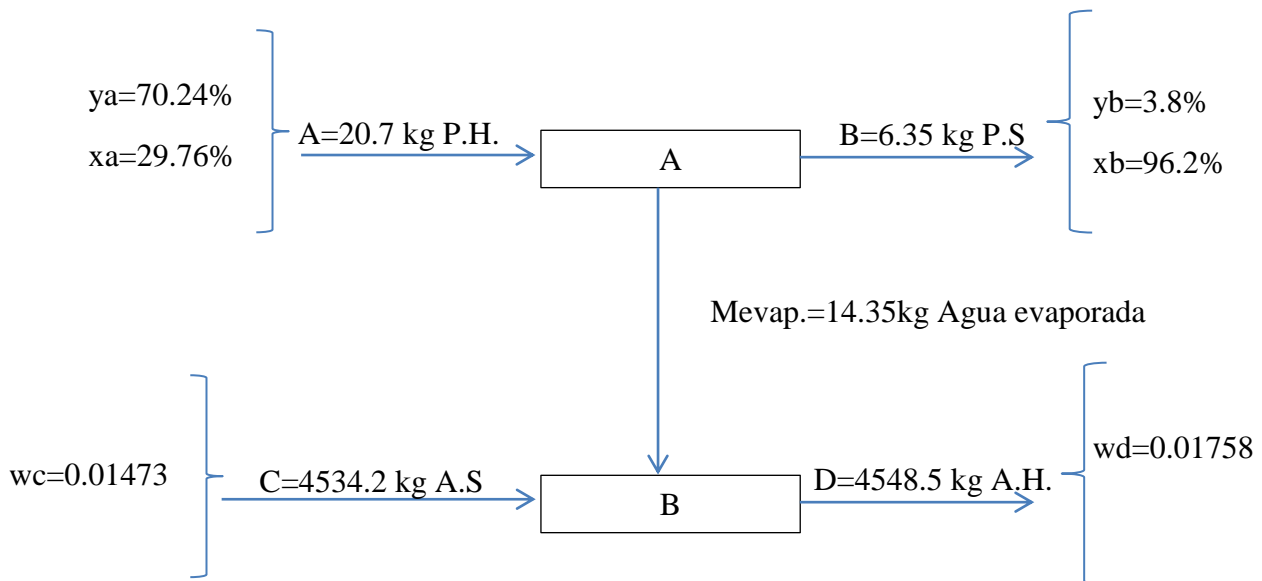
¿Desea las gráficas de secado teóricas y reales (S=1/N=0)? 1

ANEXO N°29

BALANCE DA MASA DE OPERACIÓN UNITARIA DE DESHIDRATACIÓN HABAS 1-2 SEPTIEMBRE 2014

De acuerdo con los datos de entrada del aire (véase Anexo N°26), a HR=39.70%, y Tbs=35.25: la presión de saturación del vapor de agua es de 5.7158 KPa (véase Anexo N°5), que con la HR=39.70%, la presión de vapor real en el aire es de $5.7158 \times 0.3970 = 2.26917 \text{ KPa}$; la humedad absoluta se tiene así:

$$w_i = 0.622 * \frac{p_w}{P_{atm} - p_w} = 0.622 * \left(\frac{2.26717}{101.350 - 2.26917} \right) = \frac{0.01423 \text{ kg Agua}}{\text{kg Aire Seco}}$$



Base de cálculo: todo el tiempo real de proceso.

Balace total de A

$$A = B + \text{Mevap}$$

$$\text{Mevap} = A - B$$

$$\text{Mevap} = 20.7 - B$$

Balance parcial de sólidos en A:

$$A(x_a) = B(x_b)$$

$$B = A(x_a) / x_b$$

$$B = 20.7(0.2976) / 0.962 = 6.35 \text{ kg de producto seco.}$$

Entonces:

$$\text{Mevap} = 20.7 - B$$

$$\text{Mevap} = 20.7 - 6.35 = 14.35 \text{ kg de agua evaporada}$$

Balance total en B:

$$C + \text{Mevap} = D$$

$$4534.2 + 14.35 = 4548.55 \text{ kg de Aire húmedo}$$

Balance parcial de humedad en B:

$$C(w_c) + \text{Mevap}(1) = D(w_d)$$

$$[C(w_c) + \text{Mevap}] / w_d = D$$

$$[4534.2(0.01473) + 14.35(1)] / 0.01783 = 4548.55 \text{ kg de Aire húmedo}$$

ANEXO N°30

VISTA FRONTAL DEL SECADOR



VISTA NOROCCIDENTAL DEL SECADOR



VISTA FRONTAL DE LA CAJA DE MANDO AUTOMÁTICO DEL SECADOR



ANEXO N°31

