

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ciencias

Escuela Académico Profesional de Física Aplicada

**“OPTIMIZACIÓN DEL USO DE UN SECADOR SOLAR TIPO CABINA
MEDIANTE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CALOR
UTILIZANDO EL SOFTWARE SIMUSOL”**

TESIS

Presentada por:

Bach. Fanny Esmeralda Mori Escobar

Para optar el título profesional de:

LICENCIADA EN FÍSICA APLICADA

TACNA - PERÚ

2010

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ciencias

TESIS N°.....147.....

TITULO PROFESIONAL DE:
“Licenciada en Física Aplicada”

La secretaria Académica Administrativa de la Facultad de Ciencias, certifica que el Consejo de Facultad ha designado como jurados para la sustentación de la Tesis **“OPTIMIZACIÓN DEL USO DE UN SECADOR SOLAR TIPO CABINA MEDIANTE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CALOR UTILIZANDO EL SOFTWARE SIMUSOL”**.

El mismo que está conformado por:


Presidente : Mgr. ROBERTO SUPO HALLASI
Secretario : Lic. CARLOS POLO BRAVO
Vocal : Lic. HUGO TORRES MURO

Para examinar y calificar la tesis sustentada en acto público el día 04 de ...Junio..... del año ...2010....

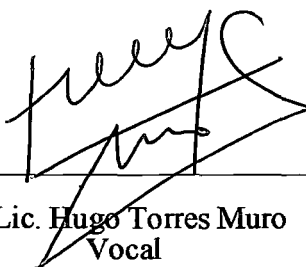
Presentado por la Señorita Bachiller: **FANNY ESMERALDA MORI ESCOBAR** de la Escuela Académico Profesional de **FISICA APLICADA**.

El jurado calificador de forma secreta e individual emitió su calificativo sobre el trabajo expuesto y se procedió a obtener el promedio que arrojó el calificativo de ...Aprobado..... porunanimidad..... con ...tres... votos a favor con la nota de y promedio deBueno.....


Para ratificar lo detallado firman:



Mgr. Roberto Supo Hallasi
Presidente



Lic. Hugo Torres Muro
Vocal



Lic. Carlos Polo Bravo
Secretario

Tacna ..04... de ...Junio... del2010.....

DEDICATORIA:

A mi familia, por el apoyo incondicional que me brinda, por el esfuerzo con que encaran los retos día a día, el cual me alienta y me hace sentir muy dichosa.

A mi hijito Cesar por que siempre me acompaña con su ternura.

AGRADECIMIENTOS:

A mis asesores Dr. Luis Saravia y Msc. César Rivasplata, por la motivación en realizar esta Tesis y a los profesores de Física Aplicada, por su apoyo incondicional y amistad.

A mis amigos, por encontrar en ellos siempre un motivo de inspiración.

INDICE

	Pagina
CAPITULO I: FORMULACIÓN DEL PROYECTO	1
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	5
2.1. Justificación Teórica	
2.2. Justificación Metodológica y Educativa	
2.3. Justificación Económica y Social	
2.4. Justificación Ambiental	
3. OBJETIVO	7
3.1. Objetivo General	
3.2. Objetivos Específicos	
4. HIPOTESIS	8
5. OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES DEL ESTUDIO	8
5.1. Variable independiente	
5.2. Variable dependiente	
5.3. Variables Intervinientes	
6. ANTECEDENTES	9
7. MATERIALES Y METODOS	10
7.1. Diseño de la investigación	
7.2. Muestreo del estudio	
7.3. Técnicas y Métodos de trabajo	
7.4. Recolección de datos	
7.5. Procesamiento y Análisis de datos	

CAPITULO II: FUNDAMENTO TEORICO	12
1. COLECTOR SOLAR	12
1.1. Efecto invernadero	
1.2. Propiedades de emisión y absorción del absorbente	
1.3. Equilibrio térmico a diferentes temperaturas	
1.4. Eficiencia de un colector de placa plana	
2. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS	17
2.1. Conducción	
2.2. Convección	
2.3. Radiación	
3. EL SECADO SOLAR	19
3.1. Psicometría aplicado al secado	
3.1.1. Gases Reales	
3.1.2. Diagrama de Fase	
3.1.2.1. Proyecciones de la superficie (p,v,T)	
3.1.2.1.1. Diagrama de fase (p,T)	
3.1.2.1.2. El diagrama (p,V)	
3.1.3. Humedad	
3.1.3.1. Humedad absoluta	
3.1.3.2. Humedad relativa	
3.1.4. Punto de rocío	
3.1.5. Entalpía de aire húmedo	
3.1.6. Calor específico de aire húmedo por kilogramo de aire seco	
3.1.7. Volumen Húmedo	
3.1.8. Densidad de aire Húmedo	
3.1.9. Proceso de saturación adiabática	

3.1.10.	Mezcla adiabática de dos flujos	
3.1.11.	Transferencia de masa y evaporación del agua dentro del aire húmedo	
3.1.12.	Evoluciones usuales en un proceso de secado	
3.1.12.1.	Evolución adiabática	
3.1.12.2.	Evolución de aire en un proceso de secado sin aporte energético exterior	
3.1.12.3.	Proceso de secado con aporte energético exterior	
4.	EL PROCESO DE SECADO SOLAR TÉCNICO	40
4.1.	Contenido de Humedad en un producto	
4.1.1.	Contenido de Humedad en Base Húmeda (M)	
4.1.2.	Contenido de Humedad en Base Seca (X)	
4.2.	Actividad del agua	
4.3.	Factores de deterioro de los alimentos	
4.4.	Curvas de secado de un producto	
4.5.	Requerimiento térmico del proceso de secado	
4.6.	Influencia del secado en la calidad de los alimentos	
4.7.	Tratamientos previos y posteriores al Secado de Alimentos	
5.	EL SECADOR SOLAR	48
5.1.	Clasificación de los secadores	
5.1.1.	Secadores no convencionales	
5.1.2.	Secadores convencionales	
5.2.	Secador solar tipo cabina	
5.2.1.	Balance Térmico del Secador Tipo Cabina	
5.2.2.	Balance Térmico del Producto	

5.2.3.	Eficiencia del Secador Tipo Cabina	
6.	SOFTWARE SIMUSOL	48
6.1.	Presentación de SIMUSOL	
6.1.1.	Circuito térmico	

CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL Y

	PROCESO DE SIMULACIÓN	57
1.	MATERIALES Y METODOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN	57
1.1.	Material de laboratorio	
1.1.1.	Presentación técnica del secador solar tipo cabina	
1.1.2.	Equipo para la determinación de humedad del producto	
1.1.3.	Equipo de medición para las pruebas experimentales	
1.1.4.	Material agrícola	
1.1.5.	Material de simulación	
1.2.	Lugar de experimentación	
1.3.	Metodología	
1.3.1.	Diseño del experimento	
1.4.	Fase de laboratorio	
1.4.1.	Instalación del ensayo experimental	
1.4.2.	Pre - tratamiento del proceso de secado	
1.4.3.	Pruebas experimentales	
1.5.	Fase de simulación	
1.5.1.	Análisis de flujo de calor por transporte de masa de aire	
1.5.2.	Análisis de flujo de calor en materiales del secador solar tipo cabina	
1.5.2.1.	Análisis del flujo de calor para el colector	

- 1.5.2.2. Análisis del flujo de calor para la cámara
- 1.5.3. Análisis de la pérdida de humedad de la manzana
 - 1.5.4. Diseño del circuito de simulación
 - 1.5.4.1. Diseño del circuito de simulación del flujo de calor
 - 1.5.4.2. Diseño del circuito de simulación para la pérdida de humedad de la manzana

CAPITULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS É INTERPRETACIÓN

DE RESULTADOS	111
1. RESULTADOS DE LA FASE DE SIMULACIÓN	111
1.1. Resultados del circuito de simulación del flujo de calor	
1.1.1. Resultados de la simulación del flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector del secador	
1.1.2. Resultados de la simulación del flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador	
1.1.3. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales del colector del secador	
1.1.3.1. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales sobre la placa negra	
1.1.3.2. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales bajo la placa negra	
1.1.4. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales de la cámara del secador	
1.1.4.1. Resultados del flujo de calor en materiales del piso	
1.1.4.2. Resultados del flujo de calor en materiales de los laterales	

1.1.4.3.	Resultados del flujo de calor en materiales de la puerta	
1.1.4.4.	Resultados del flujo de calor en materiales del techo	
1.1.4.5.	Resultados del flujo de calor en materiales de la parte frontal	
1.1.5.	Resultados del flujo de calor en materiales de la chimenea del secador	
1.1.6.	Resultados del flujo de calor que llega a la manzana	
1.2.	Resultados del circuito de simulación de la pérdida de humedad de la manzana	
1.2.1.	Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado	
1.2.2.	Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado	
1.2.3.	Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado	
1.2.4.	Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el cuarto día de secado	
1.2.5.	Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el quinto día de secado	
2.	RESULTADOS DE LA FASE DE LABORATORIO	129
2.1.	Determinación de la cantidad de humedad de la manzana	
2.2.	Resultados experimentales del flujo de calor	
2.2.1.	Resultado experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector del secador	
2.2.2.	Resultado experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador	

- 2.2.3. Resultado experimental del flujo de calor en materiales del colector del secador
 - 2.2.3.1. Resultado experimental del flujo de calor en materiales sobre la placa negra
 - 2.2.3.2. Resultado experimental del flujo de calor en materiales bajo la placa negra
- 2.2.4. Resultado experimental del flujo de calor en materiales de la cámara del secador
 - 2.2.4.1. Resultados del flujo de calor en materiales del piso
 - 2.2.4.2. Resultados del flujo de calor en materiales de los laterales
 - 2.2.4.3. Resultados del flujo de calor en materiales de la puerta
 - 2.2.4.4. Resultados del flujo de calor en materiales del techo
 - 2.2.4.5. Resultados del flujo de calor en materiales de la parte frontal
- 2.2.5. Resultados del flujo de calor en materiales de la chimenea del secador
- 2.2.6. Resultados del flujo de calor que llega a la manzana
- 2.3. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana
 - 2.3.1. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado
 - 2.3.2. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado
 - 2.3.3. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado

2.3.4. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el cuarto día de secado	
2.3.5. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el quinto día de secado	
3. PORCENTAJE DE ERROR EN LA COMPARACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON LA SIMULADA	144
3.1. Flujo de calor por transporte de masa de aire del secador	
3.2. Flujo de calor en materiales del colector del secador	
3.3. Flujo de calor en materiales de la cámara del secador	
3.4. Flujo de calor en materiales de la chimenea del secador	
CAPITULO V: MEJORAMIENTO DEL FLUJO DE CALOR EN EL SECADOR SOLAR TIPO CABINA	148
1. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SECADOR TIPO CABINA	148
2. DATOS INCORPORADOS AL PROGRAMA SIMUSOL PARA EL MEJORAMIENTO DEL FLUJO DE CALOR DEL SECADOR	149
3. DATOS INCORPORADOS AL PROGRAMA SIMUSOL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PERDIDA DE HUMEDAD DE LA MANZANA	153
4. RESULTADOS DEL CIRCUITO DE SIMULACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL FLUJO DE CALOR DEL SECADOR	154
4.1. RESULTADOS DE LA FASE DE SIMULACIÓN	154
4.1.1. Resultados del circuito de simulación mejorado del flujo de calor	
4.1.1.1. Resultados de la simulación mejorado del flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector del secador	
4.1.1.2. Resultados de la simulación mejorado del flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador	

- 4.1.1.3. Resultados de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales del colector del secador
 - 4.1.1.3.1. Resultados de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales sobre la placa negra
 - 4.1.1.3.2. Resultados de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales bajo la placa negra
- 4.1.1.4. Resultados de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales de la cámara del secador
 - 4.1.1.4.1. Resultados del flujo de calor en materiales del piso
 - 4.1.1.4.2. Resultados del flujo de calor en materiales de los laterales
 - 4.1.1.4.3. Resultados del flujo de calor en materiales de la puerta
 - 4.1.1.4.4. Resultados del flujo de calor en materiales del techo
 - 4.1.1.4.5. Resultados del flujo de calor en materiales de la parte frontal
- 4.1.1.5. Resultados del flujo de calor en materiales de la chimenea del secador
- 4.1.1.6. Resultados del flujo de calor que llega a la manzana
- 4.1.2. Resultados del circuito de simulación mejorado de la pérdida de humedad de la manzana
 - 4.1.2.1. Resultados de simulación mejorado de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado
 - 4.1.2.2. Resultados de simulación mejorado de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado

4.1.2.3.	Resultados de simulación mejorado de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado	
4.2.	RESULTADOS DE LA FASE DE LABORATORIO	164
4.2.1.	Resultados experimentales del flujo de calor mejorado	
4.2.1.1.	Resultado experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector del secador mejorado	
4.2.1.2.	Resultado experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador mejorado	
4.2.1.3.	Resultado experimental del flujo de calor en materiales del colector del secador mejorado	
4.2.1.3.1.	Resultado experimental del flujo de calor en materiales sobre la placa negra mejorado	
4.2.1.3.2.	Resultado experimental del flujo de calor en materiales bajo la placa negra mejorado	
4.2.1.4.	Resultado experimental del flujo de calor en materiales de la cámara del secador mejorado	
4.2.1.4.1.	Resultados del flujo de calor en materiales del piso	
4.2.1.4.2.	Resultados del flujo de calor en materiales de los laterales	
4.2.1.4.3.	Resultados del flujo de calor en materiales de la puerta	
4.2.1.4.4.	Resultados del flujo de calor en materiales del techo	
4.2.1.4.5.	Resultados del flujo de calor en materiales de la parte frontal	

4.2.1.5.	Resultados del flujo de calor en materiales de la chimenea del secador mejorado	
4.2.1.6.	Resultados del flujo de calor que llega a la manzana mejorado	
4.2.2.	Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana mejorado	
4.2.2.1.	Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado	
4.2.2.2.	Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado	
4.2.2.3.	Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado	
5.	PORCENTAJE DE ERROR EN LA COMPARACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON LA SIMULADA	173
5.1.	Flujo de calor por transporte de masa de aire del secador	
5.2.	Flujo de calor en materiales del colector del secador	
5.3.	Flujo de calor en materiales de la cámara del secador	
5.4.	Flujo de calor en materiales de la chimenea del secador	
6.	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CALOR ANTES Y DESPUES DEL MEJORAMIENTO (F. calor mejorado – F. calor inicial)	177
6.1.	Flujo de calor por transporte de masa de aire del secador	
6.2.	Flujo de calor en materiales del colector del secador	
6.3.	Flujo de calor en materiales de la cámara del secador	
6.4.	Flujo de calor en materiales de la chimenea del secador	
7.	EFICIENCIA DEL SECADOR TIPO CABINA ANTES DEL MEJORAMIENTO	181

8. EFICIENCIA DEL SECADOR TIPO CABINA DESPUES DEL MEJORAMIENTO	183
CAPITULO VI: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y BIBLIOGRAFIA ...	186
APENDICE	190

CAPITULO I : FORMULACION DEL PROYECTO

INTRODUCCION

El secado solar es un proceso termodinámico mediante el cual es posible extraer la humedad de un producto. En este proceso ocurren una serie de interacciones energéticas, de transporte de masa y de calor, cuyo objetivo es el de disminuir el grado de humedad de un producto. En el caso de los productos agrícolas el secado solar al aire libre, permite mantener condiciones de conservación y disminución de su masa, posibilitando su traslado a los centros de consumo, con un ahorro de tiempo y costos en el transporte, sin embargo este tipo de secado, simple en su proceso, pues solo se requiere extender el producto sobre una superficie expuesta al sol, tiene una serie de limitaciones, que tienen que ver con una falta de control en el proceso de secado, y a consecuencia de ello una disminución en la calidad del mismo, contaminación, deterioro de las propiedades organolépticas del producto, pérdidas innecesarias del producto debido a una serie de factores: tales como la depredación por aves o roedores, rehumedificación durante la noche y un mayor tiempo de secado.

Una alternativa a la solución de estos problemas es la implementación de un proceso de **secado solar técnico controlado**, debiéndose en la etapa de la planificación de todo proyecto, incluir al empleo de programas de simulación que permitan diseñar y dimensionar óptimamente un tipo de secador solar adecuado a las condiciones del recurso energético disponible y al producto que se quiere secar.

La ventaja relativa de usar programas de simulación en el diseño de un sistema se justifica ampliamente por el ahorro de tiempo, optimización de recursos humanos y materiales, costos y manejo de equipos, optimización de las variables que

intervienen en el diseño en función a las propiedades del producto así como de las condiciones locales de operación.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo central el desarrollo de una metodología de cálculo del flujo de calor que como variable independiente interviene en todo proceso de secado.

El flujo de calor en un proceso de secado, es un elemento difícil de controlar y en el que intervienen diversas variables, tales como el volumen de aire que ingresa al secador, la humedad relativa, de este, la cantidad de energía de interacción entre el colector solar, el aire, y el producto, la configuración geométrica del secador, etc.

Experimentalmente llevar a cabo todas estas mediciones requiere muchos procesos de prueba y error, un gran consumo de tiempo y una optimización empírica que tiene costos muy elevados y que al final solo sirve para una dar solución a un solo caso.

El diseño de un secador solar técnico, dentro de sus muchas variables de diseño requiere el desarrollo de información que permita optimizar el proceso de secado, bajo diversas condiciones de operación.

El flujo de calor constituye la variable de mayor importancia en términos de la optimización que pueda lograrse en el diseño de un secador solar. El software utilizado denominado Simusol* constituye una herramienta poderosa que valida la propuesta de un modelo de secador en función a la optimización del flujo de calor a emplear en determinada circunstancia.

En el **primer capítulo** de la presente tesis se definen: la justificación, objetivos, hipótesis y operacionalización de variables de estudio.

En el **segundo capítulo** se detallan los fundamentos teóricos y científicos sobre el secado solar, los colectores solares, las características de los distintos tipos de secadores solares y los fundamentos operativos del software Simusol.

El **tercer capítulo** describe el desarrollo experimental de la investigación y su conexión con el proceso de simulación.

En el **capítulo cuarto** se analizan e interpretan los resultados obtenidos, tanto en la parte experimental y su validación con la metodología usada en la simulación, utilizando el software Simusol.

El **capítulo quinto** se describe los mecanismos de operación y optimización del flujo de calor, que debe emplearse en el secado solar, permitiendo ello una mejora en la eficiencia operativa del secador.

El trabajo de tesis finaliza con las **conclusiones y recomendaciones** para futuros trabajos de investigación.

1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El secado al aire libre es una práctica tradicional muy antigua en el Perú, la que se realiza mayormente exponiendo los productos directamente al sol sobre el suelo. Este secado genera, sin embargo, mermas y disminución de la calidad del producto seco. Por otro lado, hay productos que no pueden secarse directamente “al sol”, por lo cual este secado tradicional no es posible, o solamente en forma limitada si no existen las condiciones meteorológicas apropiadas.

Frente a esta problemática, se vienen utilizando los secadores de diferentes tipos utilizando diversas fuentes energéticas, dentro de estos están los secadores solares, para superar dichas deficiencias.

En la actualidad, la utilización de los secadores vienen incrementándose, por la importancia que tiene su uso en la conservación de las propiedades de los

productos agrícolas, protección contra la contaminación ambiental y el ataque de insectos y animales durante el proceso de secado.

A la fecha, a través de programas institucionales tales como el Proyecto de Secado Solar – Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica (PSS-GTZ), y el grupo de Energías Renovables de la Universidad “Jorge Basadre Grohmann” de Tacna, se han logrado diseñar sistemas de secadores solares técnicamente eficaces, económicamente rentables y socialmente aceptados para una serie de productos. Entre ellos se encuentra el “secador solar tipo cabina”. Este secador realiza un secado solar indirecto donde el producto está expuesto solamente a una corriente de aire caliente y no a la radiación solar directa. En el Instituto Nacional de Energías No Convencionales (INENCO) Argentina se hizo una modificación para mejorar su eficiencia colocando reflectores al colector quedando apropiado su funcionamiento de secado para productos que se degradan fácilmente o pierden su humedad y propiedades organolépticas por la incidencia de la radiación solar directa como las frutas y hierbas aromáticas. Uno de los criterios básicos para mejorar la eficiencia de este secador es aprovechar al máximo la energía solar obteniendo mejores resultados en el manejo del aspecto térmico como es el flujo de calor en el sistema. Sin embargo, es difícil la evaluación experimental ya que los laboratorios no cuentan con equipos especializados y presupuesto para poder adquirirlos; por ello se puede optimizar o mejorar su utilización mediante el empleo de un software de programación que simule el comportamiento de un sistema o dispositivo que utilice la energía solar.

Existe un programa de simulación, creado por los investigadores de la Universidad de Salta – Argentina, denominado SIMUSOL.

Sin embargo surge la interrogante:

¿ES POSIBLE OPTIMIZAR EL USO DE UN SECADOR SOLAR TIPO CABINA MEDIANTE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CALOR UTILIZANDO EL SOFTWARE SIMUSOL?

2. JUSTIFICACION

2.1. Justificación Teórica

Varios productos agrícolas requieren necesariamente ser secados después de su cosecha. También en el caso de productos que pueden comercializarse en forma fresca, el secado puede presentar un beneficio adicional para el agricultor, específicamente si hay una infraestructura deficiente de transporte o cuando existe sobreproducción y los precios del producto fresco son menores a los costos de producción.

La técnica del secado posibilita mantener las propiedades de los productos agrícolas, necesitando para ello de secadores con una eficiencia adecuada. Una forma de conocer el desempeño óptimo de un secador es la ejecución de la práctica experimental mediante la técnica de error y prueba y otra es la utilización de un Software de .computación

La técnica de simulación por computadora es un campo de investigación relativamente nuevo, cuyo desarrollo en los últimos años ha experimentado un avance significativo. Evidentemente la validez de una simulación esta directamente relacionado con la capacidad del modelo para reproducir las características de la realidad.

El software SIMUSOL es un programa que facilita la descripción de circuitos y su simulación numérica. Es producido para el estudio de sistemas de conversión solar y orientado a determinar parámetros relacionados con el punto de vista de conversión solar – térmica.

2.2. Justificación Metodológica y Educativa

En la especialidad de Física Aplicada con mención a Energías Renovables, específicamente en el tópico de secadores solares, también pueden utilizarse este tipo de software SIMUSOL para realizar simulaciones de secado y optimizar los parámetros de uso más eficientes en relación con las condiciones meteorológicas del lugar, área del colector y el producto a secar, pues facilitará la descripción de circuitos y su simulación numérica, contribuyendo a la formación profesional del estudiante de Energías Renovables.

2.3. Justificación Económica y Social

El empleo del software va a permitir mejorar los parámetros óptimos en el diseño del secador solar tipo cabina, ahorrando costos y tiempo en comparación del método de prueba y error.

Disminución de Costos, por cuanto es mucho más económico el empleo de programas de computación que la práctica experimental.

Tiempo, por cuanto la utilización de software posibilita obtener resultados inmediatos y valederos mientras que en la práctica experimental tenemos que esperar el transcurso de un prolongado período de tiempo.

Socialmente podrá la universidad a través del Centro de Energías Renovables (CERT), difundir y proponer tecnología apropiada para el desarrollo del sector agrícola y exportador de la región.

2.4. Justificación Ambiental

Los secadores solares utilizan la energía solar para su funcionamiento la cual que es una energía limpia y menos dañina para el medio ambiente que los combustibles fósiles.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Optimizar el uso de un secador solar tipo cabina mediante la simulación del flujo de calor utilizando el software SIMUSOL.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar un circuito térmico para la simulación del flujo de calor de un secador tipo cabina.
- Simular con el circuito térmico de programación las diferentes variables y constantes que intervienen en el proceso de secado de un producto.
- Evaluar los resultados obtenidos.

- Comparar los datos experimentales con los resultados obtenidos por el proceso de simulación.
- Proponer un diseño de secador solar mejorado que permita elevar el rendimiento del equipo.

4. HIPOTESIS

Mediante la simulación del flujo de calor utilizando el Software SIMUSOL se puede optimizar o mejorar el uso de un secador solar tipo cabina.

5. OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES DEL ESTUDIO

Para el análisis del estudio preliminar, se consideran las siguientes variables:

5.1. Variable independiente

Flujo de Calor

5.2. Variable dependiente

Eficiencia del secador solar tipo cabina.

5.3. Variables Intervinientes

Radiación solar, temperatura ambiente, temperatura de placa, temperatura de salida, tiempo, humedad relativa del aire, área del colector, velocidad del viento, etc.

6. ANTECEDENTES

Siendo un método novedoso para nuestra realidad, en nuestro país existen pocos antecedentes, sin embargo a nivel internacional encontramos algunos trabajos de investigación como los siguientes:

- ❖ *D. Alía de Saravia, Luis Saravia y Diego Saravia Avances Introductorios en la Capacidad del simulador de Sistemas Solares Térmicos SIMUTERM (SIMUSOL); INENCO Universidad Nacional de Salta Argentina. Explica la utilización del simulador de sistemas solares térmicos SIMUTERM y propone un cambio de nombre SIMUSOL como un simulador general de sistemas solares.*

- ❖ *Proyecto de Secado Solar (PSS); Teoría del Secado Solar; Informe Técnico PSS-04 Febrero 1984 .En este volumen se presentan aspectos del secado solar que sintetizan la experiencia desarrollada por el proyecto de secado solar (PSS).*

- ❖ *L. R. Savaria y D. Savaria; Simulación de distintos Sistemas Físicos con SIMUSOL; INENCO : Universidad Nacional de Salta – CONICET Buenos Aires 177, 4400 Salta, Argentina. En este trabajo se usa como ejemplo ilustrativo un sistema que involucra elementos térmicos y eléctricos, a un caso muy sencillo, el de un termómetro que usa un termistor.*

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Diseño de la investigación

La investigación es teórica y correlacionada con datos experimentales utilizando para ello, información meteorológica como la temperatura, velocidad del viento, radiación solar, etc. los cuales son necesarios para calcular el flujo de calor a través del secador y seguidamente se procederá a elaborar la simulación de este parámetro físico para validar los resultados de la parte experimental.

7.2. Muestreo del estudio

Para el proceso de simulación se tomarán como muestra la variación de la temperatura, humedad y velocidad del aire a lo largo del colector y la cabina, masa del producto, radiación solar y temperatura ambiente.

7.3. Técnicas y Métodos de trabajo

Análisis Bibliográfico.

Fichas de registro.

Diseño del programa de simulación de un sistema virtual.

Pruebas preliminares del software ingreso de datos.

Evaluación de Resultados.

7.4. Recolección de datos

Se recogerán datos a través del análisis bibliográfico del análisis de la data experimental.

Se analizarán y cotejarán los resultados de la simulación.

7.5. Procesamiento y Análisis de datos

Luego de analizada la información experimental obtenida se hará una correlación de los resultados obtenidos de la simulación con la experiencia existente, para la optimización del secador solar tipo cabina.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

1. COLECTOR SOLAR

Un colector solar es un dispositivo que sirve para captar la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, para luego ser aprovechada como energía térmica. Durante el funcionamiento de un colector solar hay todo un proceso de transferencia de calor en el cual no toda la radiación solar que incide se convierte en energía útil; hay pérdidas hacia el medio ambiente lo cual determina la eficiencia del colector.

En la figura 2.1 se muestra un esquema de un colector solar plano calentador de aire cuyo funcionamiento consiste en captar la radiación solar mediante una superficie absorbente, comúnmente pintada de negro que permite asimilar mejor la energía incidente la cual está expuesta a una corriente de aire que circula sobre la superficie y retira la energía en forma de calor, elevando su temperatura en ese proceso. Para evitar las pérdidas de calor por efecto del viento se utiliza una superficie transparente de vidrio o plástico para proteger la superficie absorbente que a su vez permite el paso de la radiación solar.

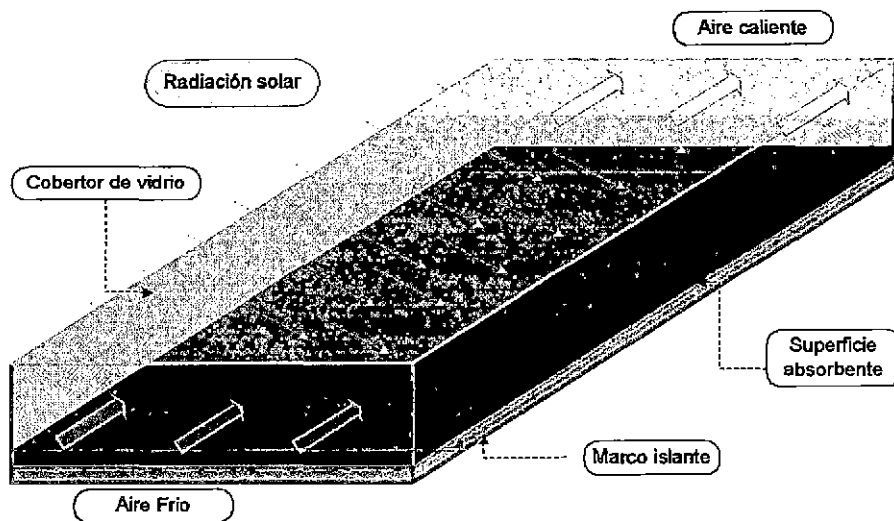


Figura 2.1: Colector Solar

1.1. Efecto invernadero

Efecto físico conocido también como “trampa de calor” que se produce después de un flujo radiante de onda corta (la radiación solar) atraviesa una placa transparente (vidrio, plástico) para incidir sobre otra superficie que lo absorbe y transforma en energía térmica, producto de lo cual se genera otro flujo radiante emitido por este segundo cuerpo, en dirección contraria al primero. Esta emisión es del tipo de “radiación infrarroja invisible”, por tanto es de onda larga y por esa razón no podrá atravesar totalmente la placa transparente (característica del material) siendo reflejada hacia el cuerpo absorbente que la reabsorberá adicionalmente y transformará en energía térmica aprovechándose así una fracción de energía que, de otra forma, se perdería al espacio.

1.2. **Propiedades de emisión y absorción del absorbente**

Durante la ocurrencia del fenómeno anterior, el cuerpo absorbente pone a prueba sus propiedades de absorción y emisividad las que determinarán su selectividad superficial. Esto sólo puede ser logrado a través del uso de superficies selectivas que son películas que producen un efecto de interferencia a la radiación solar, tales superficies tienen un elevado coeficiente de absorción en el espectro invisible e infrarrojo cercano y bajo coeficiente de emisión más allá de una longitud de onda de $2\mu\text{m}$. La alternativa es el uso de cuerpos negros que tienen sus coeficientes de absorción y emisión iguales se recurre a cuerpos reales (considerados como cuerpos grises) con valores para sus coeficientes de absorción y emisión muy próximos a la unidad.

1.3. **Equilibrio térmico a diferentes temperaturas**

Todos los cuerpos se comportan como emisores de radiación térmica de acuerdo a su temperatura. Dentro de este comportamiento el cuerpo posee su “espectro de emisión” para que pueda identificarse la longitud de onda, para la cual la emisión es máxima, efecto que está sujeto estrictamente a la Ley de Wien que se expresa así.

$$(\text{Long. de Onda}_{\text{max}}) \times T = \text{constante} = 2898 \mu\text{m}^{\circ}\text{K}.$$

donde T es la temperatura del cuerpo negro en Kelvin (K) y λ_{\max} es la longitud de onda del pico de emisión en metros.

Las consecuencias de la ley de Wien es que cuanto mayor sea la temperatura de un cuerpo negro menor es la longitud de onda en la cual emite. Por ejemplo, la temperatura de la fotosfera solar es de 5780 K y el pico de emisión se produce a $4,75 \times 10^{-7}$ m. Como 1 angstrom $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m = 10^{-4} micras resulta que el máximo ocurre a 4750 \AA . Como el rango visible se extiende desde 4000 \AA hasta 7400 \AA , esta longitud de onda cae dentro del espectro visible siendo un tono de verde. Sin embargo, debido a la difusión de Rayleigh de la luz azul por la atmósfera la componente azul se separa distribuyéndose por la bóveda celeste y el Sol aparece amarillento.

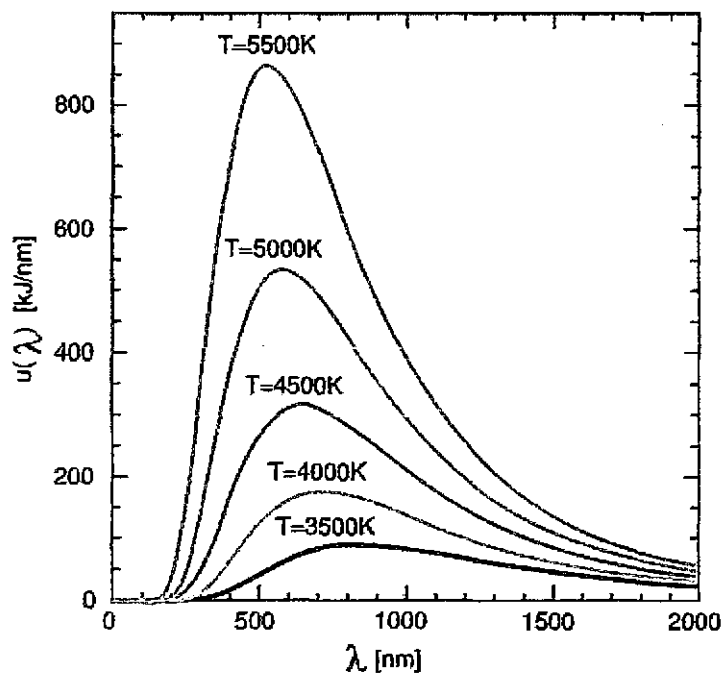


Figura 2.2: Distribución espectral de radiación de cuerpo negro.
Alter Duffie y Beckman (1980)

1.4. Eficiencia de un colector de placa plana

La eficiencia de un colector es determinada por el cociente del calor útil entregada por unidad de tiempo “Q”, en forma de aire caliente y la radiación solar incidente “I” que llega a un área bruta del colector “A_c”, esto se puede escribir como:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot I} \quad 1.1$$

También la eficiencia se puede expresar como:

$$\eta = F_R \left[(\alpha \tau)_e - U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I} \right] \quad 1.2$$

Donde:

T_e = temperatura de entrada al colector.

T_a = temperatura ambiente.

F_R(ατ)_e = factor de extracción de radiación incidente.

F_R·U_L = factor de pérdidas de calor.

I = radiación incidente.

La eficiencia en un cierto instante es función de parámetros operativos como la radiación solar incidente “I”, la temperatura ambiente, “T_a” y la temperatura a la entrada “T_e” y salida “T_s” del colector. Se puede considerar que la dependencia de estos parámetros está dada por la siguiente relación:

$$\eta_{ic} = \frac{Q_u}{A_c \cdot I} = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{A_c \cdot I} \quad 1.3$$

Donde:

m = flujo másico del aire del colector, (Kg./s)

C_p = calor específico del fluido, (KJ/Kg⁰C)

T_s = temperatura de entrada del fluido, (°C)

T_e = temperatura de salida del fluido, (°C)

2. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS

Entre los múltiples requerimientos energéticos de la actividad del secado, en esta parte se trata de fundamentar la **transferencia de calor**, hallados en las diferentes partes del secador solar.

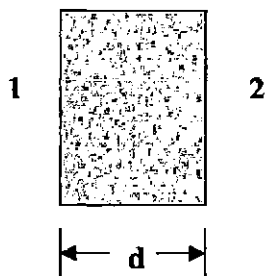
En el secado, muchas veces es necesario calentar previamente el aire, para bajar su humedad relativa, y así facilitar la evaporación del agua contenida en un producto. Otras veces, se requiere evitar la pérdida de calor hacia el exterior del secador. Conviene por ello revisar los procesos de transferencia de calor.

El flujo de calor “q” es la cantidad de calor expresada en Joule o calorías, que atraviesa cada unidad de área de una superficie (metro cuadrado o centímetro cuadrado) en cada unidad de tiempo (segundo u hora) (Joule/segundo=watt).

Existen fundamentalmente tres procesos de transferencia de calor:

2.1. Conducción

En la conducción el calor se propaga a través de un medio material sin transporte de materia. El flujo de calor por unidad de área que se conduce entre las superficies 1 y 2 cumple la siguiente ecuación:



$$q = \frac{k}{d}(T_2 - T_1) \quad 1.4$$

donde:

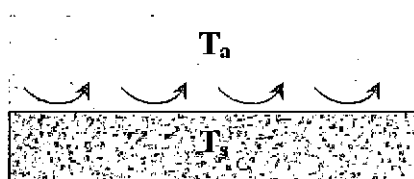
k = coeficiente de conductividad térmica, en W/m^0C ,

d = distancia entre las superficies, en m ,

(T_2-T_1) = diferencia de temperatura entre las superficies de una pared, en 0C .

2.2. Convección

El fenómeno de transferencia de calor por convección es propio de medios fluidos en contacto entre sí o con cuerpos sólidos en que el calor se transfiere a través de choques moleculares y movimiento de la masa del o los en movimiento en contacto con cuerpo sólido a temperatura diferente. El flujo convectivo de calor por unidad de área, “ q ”, entre una superficie con temperatura “ T_s ” y el medio circundante con temperatura “ T_a ”, donde T_s es mayor, responde a la fórmula de Newton:



$$q = h(T_s - T_a) \quad 1.5$$

donde:

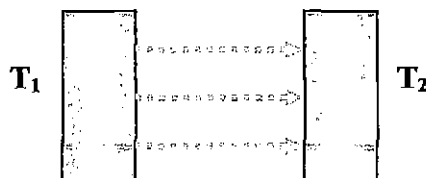
h = coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2 \cdot ^0C$.

2.3. Radiación

La radiación térmica es otra forma a través de las cuales materializa el fenómeno de transferencia de calor entre dos cuerpos que se encuentran a temperaturas diferentes entre los que media un espacio libre de obstáculos

que inclusive puede ser el vacío absoluto en cuyo caso la transferencia será máxima.

El calor que se propaga por radiación y se intercambia entre dos cuerpos que se encuentran a temperaturas T_1 y T_2 deviene en una transferencia de calor del cuerpo más caliente al cuerpo más frío y puede calcularse en base a la siguiente expresión:



$$q = hr(T_2 - T_1) \quad 1.6$$

donde:

$hr = 4 \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma T^3$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, en $W/m^2 \cdot ^\circ K$.

3. EL SECADO SOLAR

Muchos productos agrícolas requieren un secado después de la cosecha para su adecuada conservación hasta que llegan a los centros de consumo. Aún en el caso de los productos que se comercialicen en forma fresca, el secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción.

En el proceso de secado al aire libre, donde los productos se exponen directamente al sol colocándolos sobre el suelo, es uno de los usos más antiguos de la energía solar y actualmente es el proceso agrícola más común usado en los países iberoamericanos. Este procedimiento es de bajo costo pero ofrece dificultades ocasionados por los cambios climatológicos, el ataque de insectos y animales. Por otro lado, la calidad del producto se ve disminuida, especialmente en lo que tiene que ver con los aspectos bromatológicos, produciéndose la infección con restos de elementos contaminantes de animales, polvo y hongos.

3.1. Psicometría aplicado al secado

Un sistema de secado consiste en eliminar agua de un producto en forma de vapor, donde interviene fenómenos de psicometría por presencia de aire húmedo. La capacidad de absorber agua por parte del aire depende esencialmente de dos cosas: de la cantidad de vapor de agua antes de iniciarse el proceso y la máxima cantidad de vapor que puede ser aceptado, el cual es función de la temperatura.

Para una comprensión adecuada de transferencia de masa durante el proceso de secado, se debe de tener en cuenta algunos conceptos que a continuación se detallan.

3.1.1. Gases Reales

Las condiciones o postulados en que se basa la teoría cinética de los gases no se pueden cumplir y la situación en que más se aproximan a ellas es cuando la presión y la temperatura son bajas; cuando éstas son altas el comportamiento del gas se aleja de tales postulados, especialmente en lo relacionado a que no hay interacción entre las moléculas de tipo gravitacional, eléctrica o electromagnética y a que el volumen ocupado por las moléculas es despreciable comparado con el volumen total ocupado por el gas; en este caso no se habla de gases ideales sino de gases reales.

Las condiciones o postulados en que se basa la teoría cinética de los gases no se pueden cumplir y la situación en que más se aproximan a ellas es cuando la presión y la temperatura son bajas; cuando éstas son altas el comportamiento del gas se aleja de tales postulados, especialmente en lo relacionado a que no hay interacción entre las moléculas de tipo gravitacional, eléctrica o electromagnética y a que el volumen ocupado por las moléculas es despreciable comparado con el volumen total ocupado por el gas; en este caso no se habla de gases ideales sino de gases reales.

Como el gas real no se ajusta a la teoría cinética de los gases tampoco se ajusta a la ecuación de estado y se hace necesario establecer una ecuación de estado para gases reales.

La ecuación más sencilla y la más conocida para analizar el comportamiento de los gases reales presenta la siguiente forma:

$$P.V = Z.R.T \quad 1.7$$

Donde

P: presión absoluta.

V: volumen.

R: constante universal de los gases.

T: temperatura absoluta.

“Z” se puede considerar como un factor de corrección para que la ecuación de estado se pueda seguir aplicando a los gases reales. En realidad Z corrige los valores de presión y volumen leídos para llevarlos a los verdaderos valores de presión y volumen que se tendrían si el mol de gas se comportara a la temperatura T como ideal. Z se conoce como *factor de supercompresibilidad*, y depende del tipo de gas y las condiciones de presión y temperatura a que se encuentra; cuando éstas son bajas, próximas a las condiciones normales, Z se considera igual a uno.

3.1.2. Diagrama de Fase

Una sustancia pura como el agua los diagramas de fase más sencillos son los de presión versus temperatura. Generalmente, para una presión y temperatura dadas, pueden presentar un estado monofásico como sólido, líquido y gaseoso (vapor), excepto en los puntos de las curvas de equilibrio donde el sistema es bifásico.

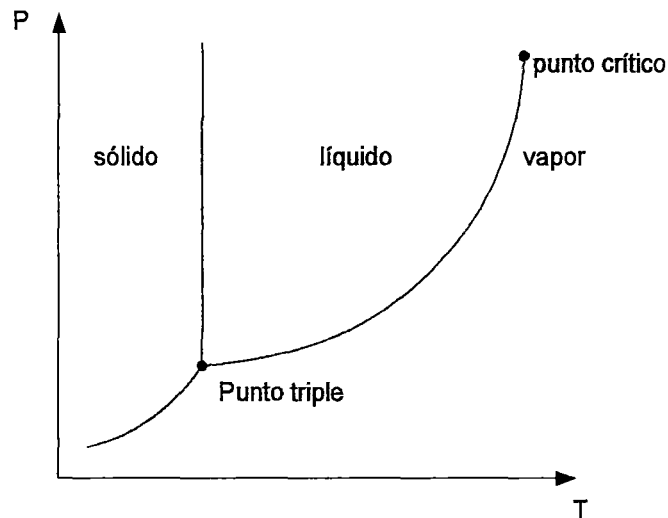


Figura 2.3:Diagrama de Fase

En las regiones bifásicas se presentan dos fases en equilibrio, líquido vapor, sólido-líquido y sólido-vapor; las dos fases pueden coexistir durante los cambios de estado tales como la vaporización, fusión y sublimación. Dentro de las regiones bifásicas, la presión y la temperatura no son independientes, por lo que una no puede cambiar sin cambiar la otra también, es decir, a una presión se corresponde una y solo una temperatura, y viceversa.

En estas regiones el estado no se puede fijar por la temperatura y la presión, sino que queda fijado con el volumen específico y la presión o la temperatura. En la *línea triple* pueden coexistir en equilibrio las tres fases.

Un estado en el que empieza o termina un cambio de fase se denomina estado de saturación. La región con forma de campana compuesta de estados bifásicos líquido-vapor recibe el nombre de campana de Andrews. Las líneas que conforman la campana de vapor se llaman líneas de líquido saturado y de vapor saturado. En

el máximo de la campana, donde se unen las líneas de líquido saturado y de vapor saturado, está el punto crítico.

La temperatura crítica T_c de una sustancia pura es la temperatura máxima en la que pueden coexistir las fases de líquido y vapor en equilibrio. La presión del punto crítico se llama presión crítica p_c , y el volumen específico en este estado es el volumen específico crítico v_c .

La superficie tridimensional (p,v,T) es útil para destacar las relaciones generales entre las tres fases de la sustancia pura en estudio. Sin embargo, es conveniente trabajar con proyecciones bidimensionales de la superficie, que se estudian a continuación.

3.1.2.1. Proyecciones de la superficie (p,v,T)

3.1.2.1.1. Diagrama de fase (p,T)

Si la superficie (p,v,T) se proyecta sobre el plano (presión - temperatura), resulta un diagrama de fases, en el que las regiones bifásicas se reducen a líneas. Un punto de cualquiera de estas líneas representa todas las mezclas bifásicas a la temperatura y presión correspondientes a ese punto.

El término *temperatura de saturación* designa la temperatura a la que el cambio de fase tiene lugar para una presión determinada, llamada presión de saturación a dicha temperatura. Como resulta evidente en el diagrama de fases, para cada presión de saturación hay una única temperatura de saturación, y viceversa.

La *línea triple* de la superficie tridimensional (p,v,T) se proyecta en un punto sobre el diagrama de fases. Este punto se llama *punto triple*. El punto triple del agua se ha utilizado como estado de referencia a la hora de definir las escalas de temperaturas; por convenio, la temperatura asignada al punto triple del agua es 273,16 °K; la presión medida en el punto triple del agua es 0,6113 KPa (0,00602 atm).

La línea que representa la región bifásica (sólido-líquido) sobre el diagrama de fases se inclina a la izquierda para sustancias que se expanden al congelarse, Fig 4.2, y a la derecha para aquellas que se contraen, Fig 4.3. Aunque en los diagramas de fases se muestra una sola región para la fase sólida, los sólidos pueden existir en diferentes fases sólidas. Por ejemplo, para el agua en estado sólido (hielo) se han identificado siete formas cristalinas diferentes.

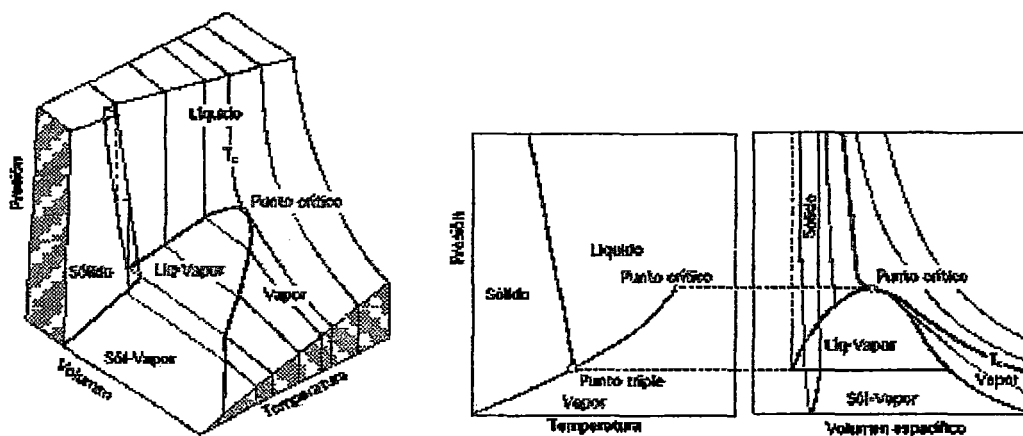


Figura 2.4: Superficie (p,v,T) para una sustancia que se expande al congelarse. Diagrama de fases y diagrama

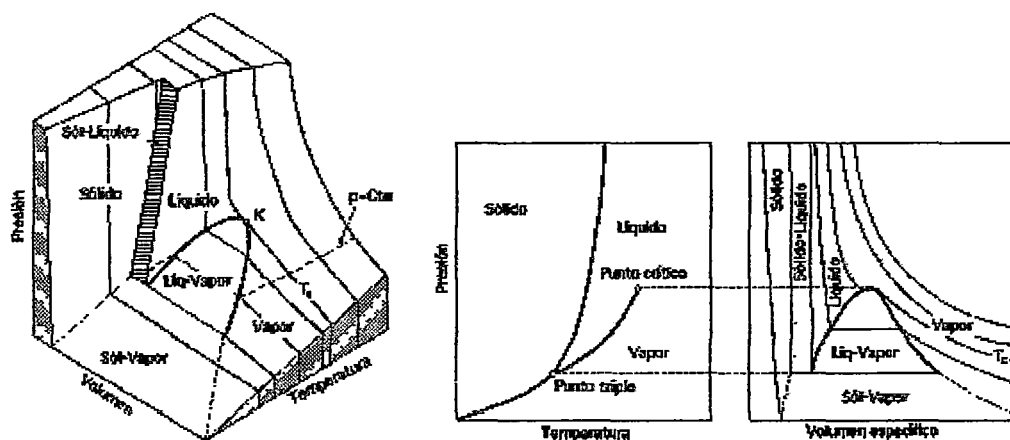


Figura 2.5: Superficie (p,v,T) para una sustancia que se comprime al congelarse. Diagrama de fases y diagrama (p,v)

3.1.2.1.2. El diagrama (p,V)

Proyectando la superficie (p,v,T) sobre el plano (presión-volumen específico) se obtiene el diagrama (p,v) . Se puede observar que para cualquier temperatura menor que la temperatura crítica la presión permanece constante mientras se atraviesa la región bifásica líquido-vapor, (vapor húmedo), pero en las regiones de fase líquida o fase vapor la presión disminuye para una temperatura dada cuando el volumen específico aumenta.

Para temperaturas mayores o iguales a la temperatura crítica, la presión disminuye continuamente para una temperatura dada cuando aumenta el volumen específico; en este caso no se atraviesa la región bifásica (líquido-vapor)¹.

¹ <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/Termodinamica/PDFs/Capitulo2.pdf>

La presión de saturación del vapor de agua sobre superficie horizontal del agua, a la presión atmosférica normal $P = 101325 Pa$, puede calcularse a partir de la expresión:

$$\ln(P_s) = C_1.T^{-1} + C_2. + C_3.T + C_4.T^2 + C_5.T^3 + C_6.\ln(T) \quad 1.8$$

Siendo:

$$C_1 = -5800.2206$$

$$C_2 = +1.3914993$$

$$C_3 = +0.04860239$$

$$C_4 = +0.41764768 \times 10^{-4}$$

$$C_5 = -0.14452093 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = +6.5459673$$

P_s : presión de saturación en Pa.

T : temperatura absoluta. (grados kelvin).

Esta expresión se puede reducir en la siguiente relación:

$$P_s = 610,7 * 10^{\left(\frac{7,5 * T}{273 + T}\right)} \quad 1.9$$

Donde P_s esta dado en pascal y T en grados centígrados.

3.1.3. Humedad

Cuando una proporción de vapor de agua en el aire atmosférico varía considerablemente, suele expresarse en los siguientes términos:

3.1.3.1. Humedad absoluta

La humedad absoluta es la relación entre la masa del vapor de agua y la masa de aire seco contenidos en el mismo volumen (usualmente se expresa Kg. de H₂O/Kg. de aire seco). A las temperaturas ordinarias, la presión parcial del vapor de agua en el aire es tan pequeña, que en todas las aplicaciones prácticas puede aceptarse como un gas perfecto. Por esta razón, la presión parcial del vapor de agua será proporcional a la masa de vapor contenida en la unidad de volumen¹⁴.

$$\begin{aligned} W_a &= M_{\text{agua}} / M_{\text{aire seco}} \\ &= 0,622 P_{p.\text{agua}} / (P_{\text{atm}} - P_{p.\text{agua}}) \end{aligned} \quad 1.10$$

La presión parcial del vapor de agua depende esencialmente de la temperatura y su variación es descrita formalmente por la ecuación de Clausius-Claperyon:

$$P_{p.\text{agua}} = \exp(51,691 - 6436/T - 3,868 \ln T) \quad 1.11$$

Con T en °K y P en Pascal (1bar=101 325Pa)

Para cada temperatura se va a tener un valor de la presión parcial máxima, la que corresponde a un valor de saturación del 100% en donde se iguala con la presión del agua superficial a esa temperatura.

Por lo general el valor usual de la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera es menor que el valor de saturación. Entonces según Goff² la definición de la humedad de saturación “Ws” en relación con la presión de saturación estará dado por:

$$W_s = 0,622 \cdot \frac{f_s P_s}{P - f_s P_s} \quad 1.12$$

Donde f_s es un coeficiente que es función de la temperatura y la presión. La tabla 1 da valores de f_s para presión a nivel del mar y de 0 a 125^oF.

Tabla 1

Temperatura (^o F)	f_s	Temperatura (^o F)	f_s
0	1,0048	70	1,0045
10	1,0046	80	1,0047
20	1,0046	90	1,0048
30	1,0045	100	1,0050
40	1,0044	110	1,0053
50	1,0044	120	1,0055
60	1,0044	125	1,0057

Para esta ecuación en el caso de la Regla de Dalton, f_s es la unidad. O sea,

$$W_s = 0,622 \cdot \frac{P_s}{P - P_s} \quad 1.13$$

La humedad absoluta en función de la humedad relativa w_r se puede expresar como

² ASHVE, “Transferencia de calor”, Vol. 55, pag. 474

$$W_a = 0,622 \cdot \frac{W_r}{\frac{P}{P_s} - W_r}$$

Donde W_s está dado en Kg. de agua/Kg. de aire seco.

3.1.3.2. Humedad relativa

La humedad relativa es la relación entre la humedad absoluta del aire, M_{vapor} y la que tendría si estuviera saturado M_{saturado} .

$$Wr = M_{\text{vapor}} / M_{\text{saturado}} \quad 1.14$$

La humedad relativa también se puede expresar como la presión de vapor de aire, P_{vapor} , sobre la presión de vapor saturada P_{saturado} :

$$Wr = P_{\text{vapor}} / P_{\text{saturado}}$$

3.1.4. Punto de rocío

Cuando se enfría el aire a presión constante y suponiendo que el vapor de agua se encuentra inicialmente sobrecalentado, el enfriamiento de la mezcla durante todo el proceso, no experimenta modificación alguna; Pero si el enfriamiento continúa, entonces llegará un momento en que el vapor alcanzará el estado de temperatura en el que provocará su condensación, liberando una cierta cantidad de energía y modificando la composición de la fase gaseosa. La temperatura a la cual se inicia la condensación se

denomina *punto de rocío*. Si el enfriamiento del aire prosigue, la condensación continúa.

3.1.5. Entalpía de aire húmedo

En virtud de las leyes de Joule y Dalton, la entalpía del aire húmedo será expresado como la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua, tomando ambos a la temperatura de la mezcla y cada uno con su presión parcial. Esto es:

$$H = M_{\text{aire seco}} \cdot h_{\text{aire seco}} + M_{\text{vapor de agua}} \cdot h_{\text{vapor de agua}} \quad 1.15$$

Podemos expresar la entalpía de aire húmedo en función de la masa de aire seco como lo que sigue:

$$h = \frac{H}{M_{\text{aire seco}}} \quad 1.16$$

El aire seco puede ser considerado como un gas perfecto y, en un estado definido por $t_o = 0^\circ\text{C}$ y por una presión cualquiera será el origen de entalpías, sabemos que para un gas ideal la entalpía es función única de la temperatura, resultando:

$$h_{\text{aire seco}} = C_p \cdot t_o = 1,005 \cdot t_o \text{ [KJ / Kg]} \quad 1.17$$

Mientras que la presión sea suficientemente pequeña, la entalpía específica del vapor de agua solo depende de la temperatura y, por ello, es la misma que si se tratara de vapor saturado a la temperatura

t_o . Si para $t_o = 0$, se atribuye al agua una entalpía nula a cualquier otra vendrá dado por³:

$$h_{\text{vaporagua}} = C_p \cdot t_o + q_e \quad 1.18$$

Donde $q_e = 2437 - 2,290 \cdot t_o$ [KJ/Kg]

Entonces la entalpía específica del aire húmedo será dado por:

$$h = 1,000 + r \cdot q_e \text{ [KJ / Kg]} \quad 1.19$$

3.1.6. Calor específico de aire húmedo por kilogramo de aire seco

En intervalos pequeños de temperatura se pueden tomar como constantes el calor específico del aire seco

$C_{p,\text{aireseco}} = 1,005 \text{ KJ / Kg} \cdot ^\circ\text{K}$, y del vapor de agua

$C_{p,\text{vapordeagua}} = 1,82 \text{ KJ / Kg} \cdot ^\circ\text{K}$ (gases perfectos); así se tiene que el

calor específico de aire húmedo será:

$$C_{\text{humedo}} = C_{p,\text{aireseco}} + C_{p,\text{vapordeagua}} = 1,005 + 1,82 \cdot w \text{ [KJ/Kg. a.s. } ^\circ\text{K]} \quad 1.20$$

3.1.7. Volumen Húmedo

El volumen húmedo v_H de una mezcla vapor-gas es el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes. Para una mezcla de humedad absoluta W_s en temperatura T y presión total P_t , la ley de los gases ideales da el volumen húmedo como⁴

$$v_H = (0.00283 + 0.00456 \cdot W_s) \cdot (T + 273) \quad 1.21$$

En donde $v_H = \text{m}^3/\text{Kg}$; $T = ^\circ\text{C}$; $P_t = \text{N}/\text{m}^2$.

³ CYTED-D, "Ingeniería del Secado Solar", pag 4-3.

⁴ TREYBAL, "Transferencia de Masa", 2 ed., pag. 257.

3.1.8. Densidad de aire húmedo

La densidad de aire húmedo en una mezcla de vapor-gas se puede obtener como la relación de la humedad absoluta y del volumen húmedo

$$\rho = \frac{1}{v_H} \cdot (1 + W_a) \quad 1.22$$

En donde $\rho = \text{Kg/m}^3$.

3.1.9. Proceso de saturación adiabática

Supongamos un proceso adiabático en el cual el aire fluye a través de un conducto perfectamente aislado donde existe un depósito de agua abierto al flujo de aire. A medida que circula el aire, aumenta su humedad específica como consecuencia de la evaporación del agua hasta alcanzar el equilibrio térmico en un sistema en régimen permanente.

Por consecuencia la entalpía del aire húmedo se mantiene constante y la temperatura disminuye a la salida.

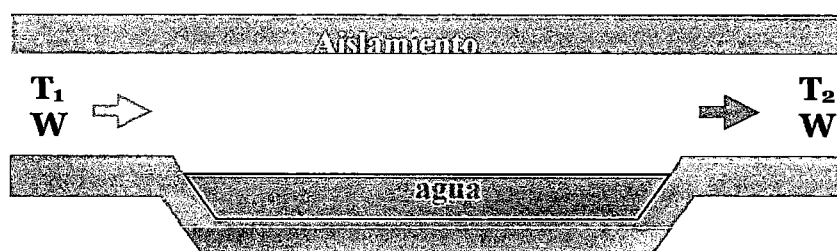


Figura 2.6: Proceso de saturación adiabática

3.1.10. Mezcla adiabática de dos flujos

Cuando dos corrientes de aire, de propiedades psicrométricas diferentes se mezclan, como se muestra en el esquema de la *figura 1.8.*, se obtiene un flujo de aire nuevo cuyas características pueden obtenerse a partir de balances de masa y energía efectuados en un cierto volumen de control donde tales procesos ocurren usualmente en condiciones adiabáticas.

Balance de Masa de Aire Seco

$$m'_{a1} + m'_{a2} = m'_{a3} \quad 1.23$$

a. Balance de Masa de Vapor de agua

$$m'_{a1r1} + m'_{a2r2} = m'_{a3r3} \quad 1.24$$

b. Balance de energía

$$m'_{a1}(h_{a1} + r_1 h_{v1}) + m'_{a2}(h_{a2} + r_2 h_{v2}) = m'_{a3}(h_{a3} + r_3 h_{v3}) \quad 1.25$$

En estas expresiones las notaciones con apostrofe (') indican la derivada con respecto del tiempo.

Si se conocen las características de las corrientes de entrada, las tres ecuaciones anteriores son suficientes para determinar la humedad específica, la entalpía específica y el flujo a la salida.

El proceso de mezclado también tiene una interpretación interesante en la carta psicrométrica. Cuando se combinan las ecuaciones (1.23) y (1.24), eliminando entre ellas m'_{a3} , se obtiene:

$$\frac{m'_{a1}}{m'_{a2}} = \frac{(r_2 - r_3)}{(r_3 - r_1)} \quad 1.26$$

Y se sustituye la ecuación (1.25) en la ecuación (1.26) el resultado es:

$$\frac{m'_{a1}}{m'_{a2}} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_3 - h_1)} \quad 1.27$$

Las dos ecuaciones (1.26) y (1.27) tienen una interpretación geométrica que está relacionado con la carta psicométrica.

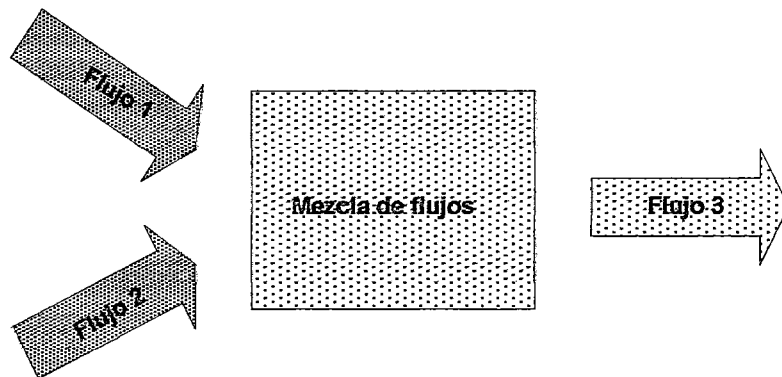


Figura 2.7: Mezcla de Flujos

3.1.11. Transferencia de masa y evaporación del agua dentro del aire húmedo

La teoría de saturación adiabática involucra el mecanismo de evaporación de agua en contacto con el aire húmedo.

En la *figura 1.7* se detalla la evaporación de una superficie libre de agua que está expuesta a una corriente de aire húmedo. Adyacente a la superficie del agua hay una

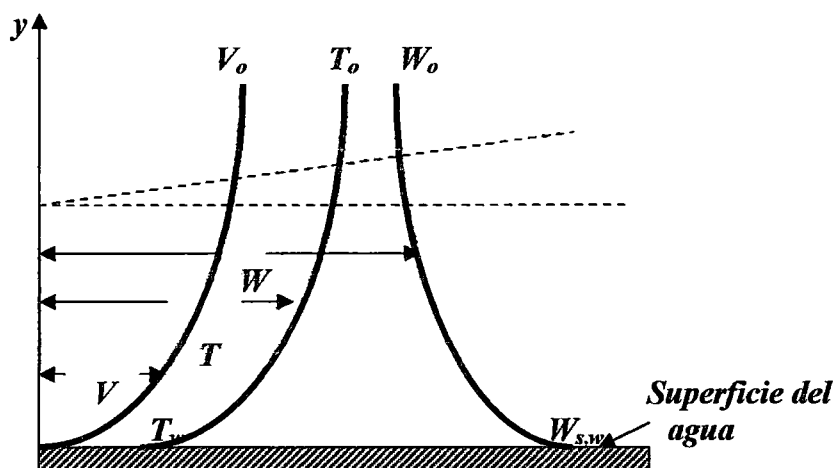


Figura 2.8: Ilustración esquemática del problema de capa límite para la evaporación del agua dentro del aire húmedo.

capa límite cuya velocidad de aire varía desde cero en la superficie del agua hasta una velocidad máxima V_o en el lado exterior. La temperatura aumenta desde T_w en la superficie del agua hasta T_o en

el grueso de la corriente del aire. La relación de humedad disminuye en la dirección desde $W_{s,w}$, en la superficie del agua hasta el W_o del grueso de la corriente de aire. El espesor de la capa límite se supone idéntico para los tres gradientes de velocidad, temperatura y relación de humedad.

Los procesos son de transferencia de calor del aire a la superficie del agua y transferencia de vapor de agua de la superficie del agua al aire. Existe un proceso combinado de transferencia de calor a través de la capa límite por convección y conducción, mientras que en la transferencia de vapor se realiza por combinación de convección y difusión.

Para la transferencia de calor por convección a través del grosor de la corriente de aire podemos escribir como¹¹

$$h_c(T_o - T_w) = k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad 1.28$$

Definiendo la temperatura adimensional $T' = (T - T_w)/(T_o - T_w)$, y una longitud adimensional $y' = y/L$, donde L es una longitud de referencia, obtenemos:

$$\frac{h_c L}{k} = \left(\frac{\partial T'}{\partial y'} \right)_{y=0} \quad 1.29$$

Esta es la ecuación que define el número de *Nusselt* que es el gradiente de temperatura adimensional en la superficie en cuyos valores medios esta dado por

$$\frac{h_c \cdot L}{k} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad 1.30$$

Donde adimensionalmente, $\text{Re} = L \cdot V \cdot \rho / \mu$ es el número de *Reynolds*, adimensional, y $\text{Pr} = C_p \cdot \mu / k$ es en número de *Prandtl*, adimensional.

El concepto básico de difusión viene dado por la ley de Fick que puede expresarse como

$$m_w = -D \cdot \rho_a \cdot dW / dy \quad 1.31$$

Donde m_w es la velocidad másica por unidad de sección de área del vapor, Kg. por (hr) (m^2); D es la difusividad del vapor o coeficiente de difusión, m^2 por hr; ρ_a es la densidad del aire, masa de aire seco por unidad de volumen, lb_a ; e y es la longitud de difusión, pies.

Se puede definir un coeficiente de transferencia de masa h_D para la transferencia de vapor de agua a través de la capa límite de la *figura 1.4*, mediante la ecuación⁵;

$$m_w = h_D \cdot (W_{s,w} - W_o) \quad 1.32$$

⁵ THRELKELD, "Ingeniería del Ambito Térmico", U.S.A. 1970, pags. 197 y 198.

3.1.12. Evoluciones usuales en un proceso de secado

El objetivo principal del proceso de secado es la extracción de humedad de un producto por diversas técnicas, entre las cuales la más utilizada consiste en el flujo natural o forzado del aire en contacto con dicho producto. Este proceso tiene resultados siempre y cuando sea posible la difusión del agua en forma de vapor a través de la interfase que limita dicho producto. Este es el caso de la mayor parte de los productos agrícolas y forestales, aunque para algunos casos es necesario algún tratamiento previo.

Según la anterior exposición, un producto se deshidrata exitosamente cuando la capacidad del aire deshidratante es buena el cual depende fundamentalmente de su humedad relativa y esta a su vez de la temperatura.

Las evoluciones más usuales en un proceso de secado son las siguientes:

3.1.12.1. Evolución adiabática

En este caso, el sistema evoluciona sin intercambio de energía calorífica con el medio exterior.

3.1.12.2. Evolución de aire en un proceso de secado sin aporte energético exterior

Un proceso habitual de secado consiste en hacer pasar una corriente de aire, a temperatura ambiente y no saturado, a

través de un producto, sin recibir un aporte exterior de energía.

3.1.12.3. Proceso de secado con aporte energético exterior

Hemos visto que la capacidad desecante del aire aumenta con su temperatura. El proceso de secado puede acelerarse con su temperatura. El proceso de secado puede acelerarse si se constituye un túnel de secado transparente a la radiación solar.

4. EL PROCESO DE SECADO SOLAR TÉCNICO

El agua contenida en los alimentos permite el desarrollo de microorganismos creando reacciones químicas que deterioran a estos alimentos. Por ello, cuando se necesita conservar los alimentos por algún tiempo, una alternativa es secarlos o deshidratarlos; es decir, remover el agua contenida en ellos. Existen varios métodos para lograrlo, pero aquí se va a considerar la forma más simple y natural que consiste en exponer los alimentos a una corriente de aire, bajo determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad.

En esta parte se exponen los conceptos fundamentales correspondientes a todos los procesos de secado en general, los que son aplicables a los productos agrícolas.

4.1. Contenido de Humedad en un producto

El contenido de humedad existente en un producto, se expresa en relación a su masa total o a su masa seca (esto es la masa que se obtiene descontando la masa de agua evaporable que contiene el producto). Se expresa como:

4.1.1. Contenido de Humedad en Base Húmeda (M)

$$M = \frac{m - m_s}{m} \quad 1.33$$

4.1.2. Contenido de Humedad en Base Seca (X)

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad 1.34$$

Donde:

m : masa total del producto

m_s: masa seca del producto

La determinación directa del contenido de humedad consiste en medir la masa del producto antes del secado y después del secado. Para esto último se suele eliminar, el agua por evaporación aplicando calor al producto. En este proceso se pueden presentar tres dificultades:

- En el proceso de secado se evapora agua y también se puede evaporar, al mismo tiempo, otras sustancias que son característicos del producto;

- Las condiciones de humedad que presenta el aire circundante no permiten remover el agua más allá de cierto límite;
- La definición de agua propenso a evaporarse (esto es el agua que no es constituyente del producto) generalmente depende del método usado para extraerla.

4.2. Actividad del agua

El contenido de humedad que se ha expuesto en la sección anterior no está directamente relacionado con los factores que intervienen en el proceso de deterioro de un producto. Este deterioro se debe al agua que no se encuentra en la misma forma en cada alimento; en algunos casos se encuentra relativamente libre, en otros está muy ligada a la estructura del producto y no está disponible para los procesos de deterioro. El concepto de actividad de agua en un alimento permite expresar el grado de libertad que tiene el agua contenida en él.

4.3. Factores de deterioro de los alimentos

La velocidad con que algunos factores deterioran los alimentos está directamente relacionada con la actividad de agua que estos presentan.

Entre estos factores se encuentran:

- La acción de microorganismos, especialmente las bacterias, levaduras y mohos.

- El oscurecimiento no enzimático en los alimentos que originan sabores y olores desagradables se deben a la presencia de melanoidinas producidas en la reacción de azúcares reductores con aminoácidos, estas reacciones se aceleran al aumentar la temperatura, por ello deben ser tomadas en cuenta en el secado.
- Las enzimas naturales de los alimentos como la fenolasa que reacciona en presencia de oxígeno produciendo melaninas que generan colores pardos en los alimentos, la fenolasa se desactiva ante temperaturas elevadas y en medios ácidos.
- La rancidez de los alimentos producida por el auto oxidación de lípidos, la cual se inicia, si hay suficiente energía proveniente del calor, la luz o la radiación ultravioleta, en presencia de algunos catalizadores como la clorofila, la hemoglobina y los metales polivalentes.

4.4. Curvas de secado de un producto

Si graficamos el contenido de humedad en base seca X , de un producto en función del tiempo se obtendrá la llamada curva de secado. Las curvas de secado de un producto dependen de:

- El material del cual está constituido,
- El grado de madurez,
- El tratamiento previo que ha recibido,

- La forma y el tamaño de las porciones,
- La manera de disponerlo en el secador,
- La forma en la que el aire hace contacto con él, etc.

Mientras mayor sea el área del material a ser secado en relación a su volumen el secado es más rápido.

Es importante definir el tamaño de las piezas, porque de él depende las distancias sobre las que se debe difundir el calor y la humedad.

La disposición del producto en el secador es crítica pues debe permitir la máxima exposición de las superficies al aire y ofrecer la menor resistencia al paso de éste. Por otra parte, las curvas de secado dependen de las condiciones de humedad relativa, temperatura y velocidad del aire empleado.

Como se puede observar, en un cierto rango de temperatura, velocidad y humedad del aire, el tiempo de secado se reduce aumentando la temperatura o velocidad del aire o disminuyendo su humedad relativa.

4.5. Requerimiento térmico del proceso de secado

Se requiere calor para evaporar el agua que contiene durante el proceso de secado.

El calor latente de vaporización, L , que es la energía necesaria para evaporar 1Kg. de agua, depende de la temperatura y es del orden de 2450KJ/Kg. Es la misma cantidad de calor que se obtiene cuando se condensa 1 Kg. de vapor. Si el agua no está libre, como ocurre usualmente en los alimentos, el calor latente de vaporización es mayor y además de la temperatura depende del contenido de humedad. Por otra parte, como se ha indicado en la sección anterior, si el ambiente en el cual se encuentra el producto tiene una humedad relativa mayor que la actividad de agua que le corresponde a su contenido de humedad, el producto absorbe humedad. De modo que para secar no basta calentar; es necesario que la humedad relativa del ambiente donde se encuentra sea suficientemente baja.

4.6. Influencia del secado en la calidad de los alimentos

Durante el proceso de secado de un alimento se puede presentar algunas reacciones físico-químicas como son: la pérdida de sustancias nutritivas, de textura y forma, de sustancias volátiles, de capacidad de rehidratación, la decoloración, la caramelización, etc. Tales alteraciones dependen

básicamente de parámetros como la velocidad, temperatura y humedad relativa del aire, exposición directa a la radiación solar u otros factores, como las propiedades del alimento que está siendo secado.

Así podemos mencionar algunos ejemplos:

- En los alimentos se presentan algunas alteraciones como la destrucción parcial por oxidación las vitaminas A y C.
- La presencia de radiación solar en los alimentos, ocasiona pérdida de vitamina C en las frutas y hortalizas.
- Las altas temperaturas disminuyen el valor biológico de las proteínas; sin embargo, el secado a bajas temperaturas puede aumentar su digestibilidad. Las altas temperaturas también pueden descomponer la tiamina (vitamina B1) y aumentar la oxidación de grasas.

4.7. Tratamientos previos y posteriores al Secado de Alimentos

Los alimentos antes de ser secados deben ser tratados especialmente a fin de lograr un secado uniforme y evitar el efecto de factores nocivos. Con ese propósito los alimentos son en muchos casos lavados, pelados o cortados; otras veces también deben ser tratados para evitar el pardeamiento o la proliferación de microorganismos.

Así, algunas veces es necesario el escaldado o blanqueado de los alimentos, es decir someterlos a un baño de agua hirviendo o vapor por un

corto tiempo (3 a 6 minutos o en todo caso hasta que los tejidos del alimento empiezan a ablandarse) con el objeto de:

- Evitar el pardeamiento no enzimático;
- Fijar y conservar el color;
- Eliminar algunos microorganismos;
- Acelerar el secado por rotura de las células.

Otras veces se adiciona a los alimentos bisulfito de sodio, de potasio o de calcio; metasulfito de sodio o de potasio, dióxido de azufre o ácido sulfuroso para evitar la proliferación microbiana o el pardeamiento enzimático o no enzimático. Sin embargo debe tenerse en cuenta el efecto tóxico de los derivados del azufre.

En el caso del pardeamiento enzimático, una alternativa puede ser adicionar ácidos (como el ácido cítrico), blanquear, agregar pequeñas cantidades de sal común o agregar sustancias que captan el oxígeno (como el ácido ascórbico).

En el caso de agregar ácido cítrico o ascórbico debe tenerse en cuenta que ellos pueden producir pardeamiento no enzimático.

Para inhibir la auto oxidación puede ser necesario adicionar antioxidantes naturales como los que provienen del romero o de la salvia; alternativamente, algunos ácidos naturales como el ascórbico o el cítrico que forman complejos como los metales polivalentes de modo que reduce el efecto catalizador que estos tienen sobre la auto oxidación.

En muchos casos es necesario tomar precauciones especiales en el propio manejo de los productos. Si, por ejemplo, se tienen problemas de rancidez puede ser conveniente evitar la exposición de los productos a la luz, a altas temperaturas o a la radiación ultravioleta; también puede ser adecuado evitar ponerlo en contacto con piezas o instrumentos de metales polivalentes como son el cobre, el fierro, el zinc, el manganeso, el cobalto, el níquel, etc.

5. EL SECADOR SOLAR

Los secadores tienen como objetivo eliminar el agua contenida en alimentos, con el fin de evitar la proliferación de microorganismos o el desarrollo de reacciones químicas que deterioran la composición de los mismos.

La forma más simple de secar un producto es exponerlo el mismo a una corriente de aire cuyas condiciones de temperatura y humedad permitan que el agua contenida en el producto se evapore y pase al aire.

Para lograr tal efecto se aumenta la temperatura del aire mediante un aporte energético. En el caso del secador solar la fuente de energía es la radiación solar.

Al diseñar un secador solar se trata de conjugar cuatro criterios básicos:

- Lograr un producto seco de la mejor calidad.
- Procesar la cantidad del producto prevista en el tiempo exigido.
- Aprovechar al máximo la energía solar y el aire ambiente disponible.

- Lograr que el proceso de secado sea del menor costo posible.

La importancia de cada uno de estos criterios es diferente en cada situación concreta. De modo que, las características de un secador apropiado dependen de las propiedades del producto a secar, los recursos disponibles y la situación socio-económica específica donde será empleado. Las posibilidades son múltiples y no es posible establecer un procedimiento universal para el diseño de un secador.

5.1. Clasificación de los secadores

Los secadores pueden ser clasificados según el nivel tecnológico en su construcción y por el tipo de energía en su operación.

En el *nivel rústico*, los secadores se construyen con materiales y herramientas simples y son operados manualmente usando energías no convencionales, carecen de dispositivos para el control del proceso.

En el *nivel artesanal*, los secadores se construyen en pequeños talleres y pueden requerir para su funcionamiento energía eléctrica o de combustibles fósiles.

En el *nivel industrial*, la construcción se realiza en talleres industriales con maquinaria moderna, donde se requiere del suministro de energías convencionales y cuentan con dispositivos control para regular el proceso de secado.

Existen varias clasificaciones de los secadores. Aquí en la perspectiva del diseño se proponen las siguientes:

5.1.1. Secadores no convencionales

5.1.1.1. Secadores por Aireación

5.1.1.1.1. Con ventilación Natural.

5.1.1.1.2. Con ventilación Forzada.

5.1.1.2. Secadores Solares

5.1.1.2.1. Secadores Directos.

5.1.1.2.1.1. Con Ventilación Natural.

5.1.1.2.1.2. Con Ventilación Forzada.

5.1.1.2.1.3. Con Calentamiento Auxiliar no Solar.

5.1.1.2.2. Secadores Indirectos.

5.1.1.2.2.1. Con Ventilación Natural.

5.1.1.2.2.1.1. Con Ventilación Forzada.

5.1.1.2.2.1.2. Con Calentamiento Auxiliar no Solar.

5.1.1.2.2.2. Secadores Mixtos.

5.1.1.2.2.2.1. Con Ventilación Natural.

5.1.1.2.2.2.2. Con Ventilación Forzada.

5.1.1.2.2.2.3. Con Calentamiento Auxiliar no Solar.

5.1.2. Secadores convencionales

De modo general puede afirmarse que para determinado nivel tecnológico la enumeración anterior está en orden simplificada decreciente⁶

5.2. Secador solar tipo cabina

El secador solar tiene un modo de calentamiento indirecto del aire, que consiste en un sistema combinado constituido de un colector donde previamente es calentado el aire y una cámara donde se colocan los productos a secar. El colector es de tipo escalonada, donde ingresa el aire por uno de sus lados a temperatura ambiente y sale por el otro lado el aire caliente. Este colector esta completamente aislado para mantener el calor dentro de él y minimizar las pérdidas de calor. Utiliza dos espejos para reflejar la radiación hacia un cobertor de vidrio para capturar y retener el calor de la energía solar por efecto invernadero. La radiación solar atraviesa la cubierta de vidrio e impide que la radiación que se refleja escape fuera del colector,

calentando la placa negra y las paredes del colector. La cámara de secado esta previamente cubierta de un plástico especial (polietileno) que sirve para atrapar el calor dentro de él, esta cámara esta diseñado de tal manera que se genera un flujo de aire interrumpido dentro de éste teniendo una entrada en la parte inferior que esta conectada al colector y una salida en la parte superior a través de una chimenea; el aire caliente que ingresa se encuentra a su paso con el producto fresco y por efecto del intercambio de calor lo va deshumedeciéndolo cada vez más a medida que pasa el

⁶ Centro de Energías Renovables UNI-GTZ, "Teoría y Práctica del Secado solar", Lima 1991.

tiempo. En la *figura 1.10*, se muestra un esquema muy simplificado de un secador solar tipo cabina y la forma que se produce el proceso de secado.

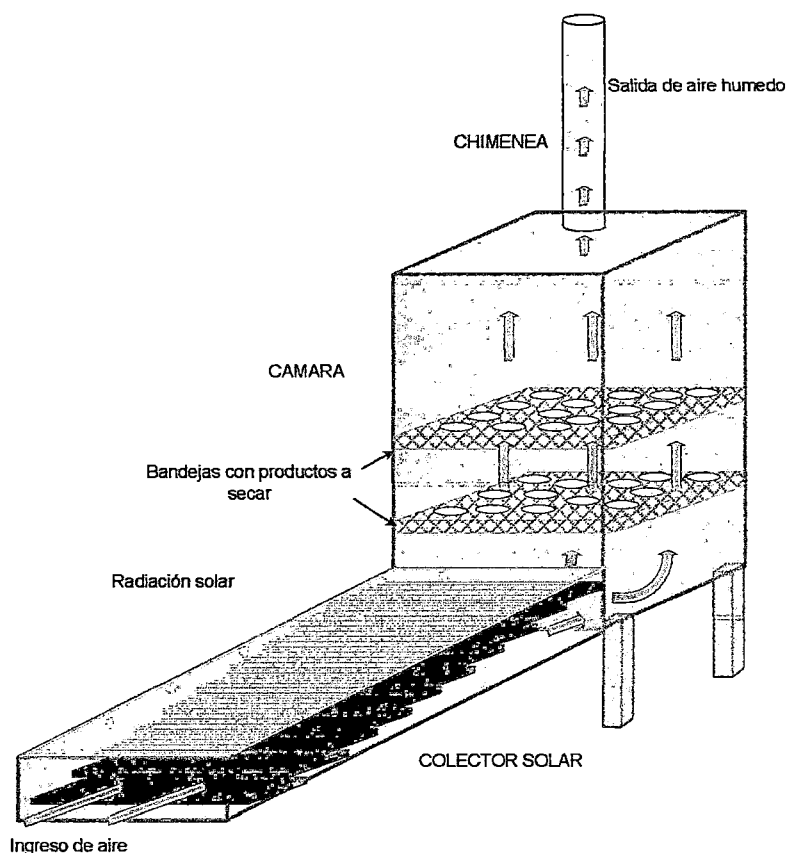


Figura 2.8 : Esquema simplificado que muestra como funciona un secador solar tipo cabina.

5.2.1. Balance Térmico del Secador Tipo Cabina

La ecuación para el balance térmico del secador, teniendo en cuenta la energía solar recibida, el agua evaporada y la variación de entalpía del aire húmedo que circula en la cámara, las pérdidas térmicas a través del ambiente, tiene la siguiente

expresión

$$(\tau\alpha)A_{co}I = C_{pcd}m_{co}(T_{co} - T_a) + C_{pca}m_{ca}(T_{ca} - T_a) + q_f m_w + h_{co}A_{co}(T_{co} - T_a) + h_{ca}A_{ca}(T_{ca} - T_a) \quad 1.35$$

Donde :

$(\tau\alpha)$ = Potencia de la radiación absorbida en el secador

I = Intensidad de la radiación solar

A_{co} = Área del colector

A_{ca} = Área de la cámara expuesta a la radiación solar

C_{pco} = Capacidad calorífica del aire en el colector

C_{pca} = Capacidad calorífica del aire en la cámara

m_{co} = Flujo de aire en el colector

m_{ca} = Flujo de aire en la cámara

m_w = Velocidad de evaporación

T_{co} = Temperatura en el colector

T_a = Temperatura ambiente

q_f = Calor latente de evaporación

h_{co} = Coeficiente de pérdidas térmicas del colector

h_{ca} = Coeficiente de pérdidas térmicas de la cámara

No se considera el calor almacenado en el suelo ni en el producto. Esta acumulación es importante para el caso de invernaderos, ya que ayuda a incrementar la temperatura durante el período más crítico. Pero en el caso de secadores el balance promedio sólo se altera ligeramente, ya que una buena parte del calor almacenado durante el día se devuelve a la cámara durante las últimas horas de la tarde y las primeras horas de la noche.

5.2.2. Balance Térmico del Producto

La ecuación para el producto se tiene en cuenta el calor entregado por el colector, el agua que se evapora del mismo y la pérdida térmica convectiva, es:

$$C_{pco} \dot{m}_{po} (T_{co} - T_a) = q_f \dot{m}_w + H_{pT} (T_p - T_{co}) \quad 1.36$$

Donde:

H_{pT} = Coeficiente global de transferencias térmicas del producto.

T_p = Temperatura del producto

5.2.3. Eficiencia del Secador Tipo Cabina

La evaluación de la eficiencia de un secador solar se puede lograr teniendo en consideración los kilogramos de agua evaporada durante el proceso de secado " Δm " el cual es la diferencia de la masa final y la masa inicial del producto en kilogramos, el tiempo transcurrido en el secado " t " en días y el área del colector " A_c " en metros cuadrados. Se muestra la siguiente ecuación para el cálculo respectivo:

$$\eta = \frac{\Delta m}{A_c t} \quad 1.26$$

6. SOFTWARE SIMUSOL

El Simusol es un programa que facilita la descripción de circuitos y su simulación numérica. Fue inicialmente producido para el estudio de sistemas solares a parámetros concentrados desde el punto de vista térmico. No

obstante, el simulador puede ser utilizado para el estudio de otros sistemas físicos como los eléctricos, aire húmedo, etc. Tampoco existe inconveniente en encarar la simulación de mezclas de sistemas diferentes.

Actualmente, se ha modificado a Simusol para que sea capaz de reconocer nuevas formas, en determinadas condiciones, sin necesidad de modificaciones adicionales del programa. Así será posible que el usuario pueda crear y definir nuevas formas para representar a elementos físicos de su interés. De esta forma, el usuario podrá simular elementos físicos con elementos no previstos en la versión original del Simusol, utilizando formas gráficas creadas por él o ella y que permitan entender los circuitos con mayor claridad.

6.1. Presentación de SIMUSOL

El objetivo principal de Simusol es facilitar las simulaciones numéricas de circuitos térmicos.

Simusol consiste en varios “scripts” escritos en lenguaje Perl.

Para ello utiliza varios programas de uso libre (licencia GPL):

- **Dia**, con una “plantilla” u “hoja” adecuada, por ejemplo la llamada Circuito Térmico (ver figura 2.9) para producir diagramas que describen al circuito.
- **Sceptre** con su compañero Ngp para realizar la simulación numérica.
- **Gauplot**, para producir gráficos de funciones.

Simusol se encarga, fundamentalmente, de dos tareas que se disparan con un solo comando.

- ❖ Traducir el circuito descrito en el ambiente de Dia al formato necesitado por Sceptre.

- ❖ Simulación del circuito con el Sceptre, manipulación de los resultados del Sceptre para almacenarlos en archivos fácilmente utilizables y producción de los gráficos deseados.

Simusol funciona bien en cualquier sistema Linux. Teniendo en cuenta las características de los lenguajes utilizados, es posible que, sin demasiado esfuerzo adicional, también pueda usarse bajo Windows⁷.

6.1.1. Circuito térmico

La descripción gráfica del circuito a simular tiene que estar preparada con Dia y la plantilla “*Circuito Térmico*” creada a esos efectos, y debe cumplir ciertos requisitos.

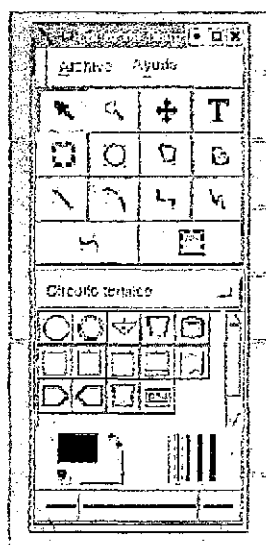


Figura 2.9: Plantilla circuito Térmico.

La descripción de la plantilla circuito térmico se especifica en el material de simulación.

⁷ Saravia Luis R. y Dolores alía de Saravia, “Manual Simusol”.

CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL Y PROCESO DE SIMULACIÓN

1. MATERIALES, METODOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACION

1.1. Material de laboratorio

1.1.1. Presentación técnica del secador solar tipo cabina

Fue construido y proporcionado para las pruebas experimentales por el Instituto Nacional de Energías No Convencionales (INENCO) de la Universidad de Salta Argentina.

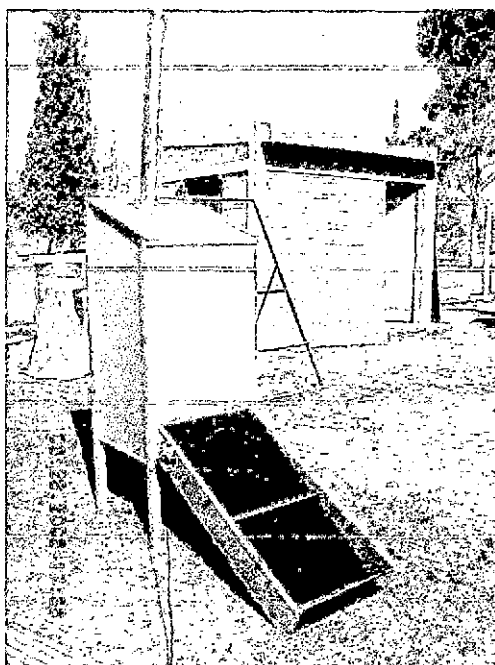


Foto 3.1 : Secador solar tipo cabina

La estructura de este secador fue construido de madera pino con aislamientos de tecnopor, las placas negras y la chimenea de latón, la cubierta del colector es de vidrio y los reflectores de alúmina. El tamaño de este secador fue diseñado para realizar ensayos a nivel de laboratorio teniendo las siguientes dimensiones en cada una de sus partes.

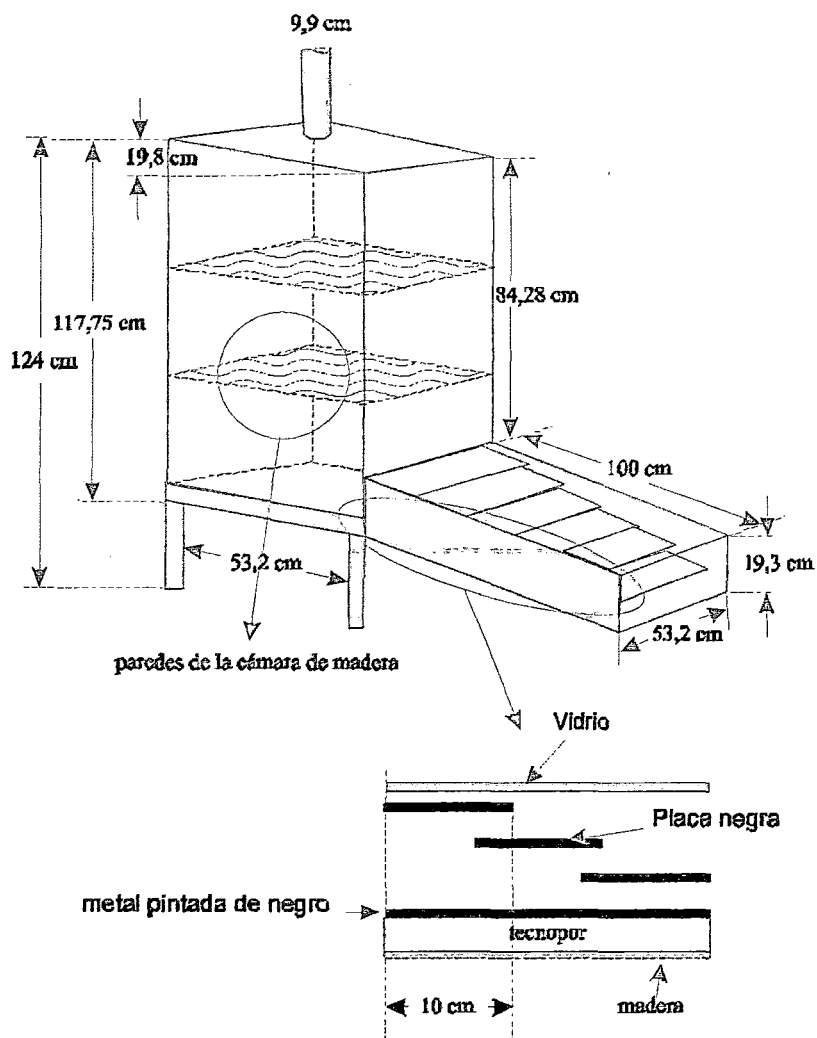


Figura 3.1: Medidas del secador solar tipo cabina

1.1.2. Equipo para la determinación de humedad del producto

Fue proporcionado por el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Salta Argentina.

1.1.2.1. Balanza analítica:

Marca: SATORIUS de sensibilidad $\pm 0,0001$ g.

1.1.2.2. Secador de 0 a 200⁰C y sensibilidad $\pm 1^0$ C.

1.1.3. Equipo de medición para las pruebas experimentales

Fueron proporcionados para la toma de datos experimentales por el Instituto Nacional de Energías No Convencionales (INENCO) de la Universidad de Salta Argentina.

1.1.3.1. Piranómetro

Marca : Kipp & Zonen B. V., Modelo: CM3, Origen: USA,

Número de Serie : 058136, Sensibilidad: $1458 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$

1.1.3.2. Medidor de velocidad de aire

Marca : TSI (Veloc. Calc.), Origen : USA, Rango de Velocidad : 0 a 6000 ft/min (0 a 30 m/s)

1.1.3.3. Balanza

Marca : OHAUS, Origen : USA, Capacidad : 310 gramos, Sensibilidad : 0.01 gramos.

1.1.3.4. Multímetro

Código: H-2775, Origen : USA, CD Voltaje : de 200mV a 1000V, AC Voltaje : de 200mV a 750V, Temperatura : -20^0C a 1000^0C .

1.1.3.5. Medidor de Temperatura y Humedad

Marca : VAISALA HM34, Origen : USA, Rango de medición de humedad : de 0 a 100 %RH, Sensibilidad : ± 2 %RH, Rango de Temperatura : de -20 a $+60$ °C (-4 a 140 °F).

1.1.3.6. termómetro de Superficie

Marca : PHYWE, Origen : USA, Rango de Temperatura: de -50 ° a $+1150$ °C, Sensibilidad : $1\% \pm 0,5$ °C (de -20 a $+199,9$ °C).

1.1.4. Material agrícola

02 kilogramos de Manzana verde: Esta fruta tiene un agradable sabor y es útil para el bienestar de la salud; esta compuesta de pectina, aminoácidos, ácidos, azúcares, catequizas, quercetina, sorbitol, fibras, calcio, hierro, magnesio, nitrógeno, fósforo y potasio, entre otras cosas.

1.1.5. Material de simulación

1.1.5.1. Presentación técnica del software SIMUSOL

Fue creado y proporcionado por el Dr. Luis Saravia, Dolores de Saravia y Diego Saravia para la simulación del flujo de calor del secador solar y para la pérdida de humedad del producto.

Para utilizar Simusol del modo habitual, es imprescindible preparar con el diagrama del circuito a simular, utilizando formas que puedan ser reconocidas por Simusol.

En lo que sigue nos concentraremos, en la descripción de la plantilla de circuito térmico.

1.1.5.1.1. Nodos de Conexión

La plantilla ofrece tres formas, de color amarillo, para cubrir todas las necesidades de representación de nodos de conexión.

Las mostramos a continuación:



Las dos primeras formas corresponden a un mismo nodo o punto de conexión entre elementos simples ya que, de acuerdo a sus identificadores, ambas representan al nodo “3”. Es útil tener varias representaciones de un mismo nodo para simplificar el aspecto de los diagramas: no habrá necesidad de utilizar líneas de conexión muy largas ni entrecruzadas. El segundo nodo “3”, con la circunferencia doble se usa cuando hay otra representación del mismo nodo.

La forma triangular representa el nodo que siempre tiene una temperatura de 0 grados centígrados.

1.1.5.1.2. Elementos Térmicos de distintas clases

Las clases de elementos reconocidas por Simusol están asociadas a los símbolos: R, C, E, J, T . Los elementos deben ser identificados

en el diagrama mediante formas, cada una de ellas asociadas a uno de esos símbolos.

1.1.5.1.2.1. Resistencias

Hay previstas cinco formas en la plantilla. Todas ellas tienen dos puntos de conexión.



R1 y R2 son resistencias convectivas; R3 y R4 son resistencias conductivas; y R5 es una resistencia radiativa.

1.1.5.1.2.2. Acumuladores y fuentes de temperatura

Hay prevista una forma para cada clase. Tienen sólo un punto de conexión; el “otro” punto de conexión ya está conectado al nodo “0”, lo cual se recuerda mediante el triangulito amarillo en la parte inferior de la forma.

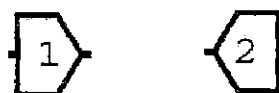


C1 es un acumulador de calor; E1 es una fuente de temperatura.

1.1.5.1.2.3. Fuentes de flujo de calor

Hay previstos dos formas que, con su identificación corresponden a J1 y J2. Cada forma tiene dos puntos de conexión.

En realidad alcanzaría con tener definida una sólo de esas formas y conseguir la otra a través de una simetría de eje vertical.

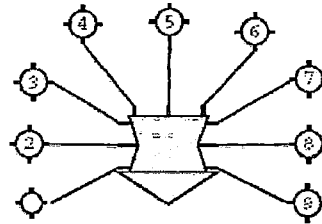


1.1.5.1.2.4. Modelos

Hay en la plantilla, una sola forma para modelos (es posible crear más); la forma ofrece muchas posibilidades. Cada modelo suele tener varios elementos simples y nodos, “internos” al modelo, interconectados; y suele tener varios puntos para una conexión con el circuito principal. Puede tener hasta nueve puntos de conexión a los nodos del circuito principal; además de que un posible nodo de tierra interno que será el mismo que cualquier otro nodo tierra del circuito principal.



Los puntos de conexión de un modelo se consideran en cierto orden como se sugiere a continuación.



Orden de los puntos de conexión de un modelo

1.1.5.1.2.5. Fórmulas para cada tipo de elemento

Para cada tipo de elemento térmico existen una o más fórmulas que Simusol utilizará para calcular su valor a partir de los valores de sus propiedades.

a. Acumuladores



USO	DEF
#	ACUMULADOR TERMICO DE CALOR SENSIBLE
#	PARAMETROS:
#	PCP: calor especifico del material (J/(kg.C))
#	PMASA: masa del acumulador (kg)
	CS=C1, PCP, PMASA
=>	{
	CS= QPRODUCTO (PCP, PMASA)
	}

b. Resistencias Conductivas

Hay dos fórmulas ya definidas



USO DEF
<pre># RESISTENCIA TERMICA CONDUCTIVA, # ELEMENTO UNIDIMENSIONAL PLANO # PARAMETROS: # PAREA: area plana (m2) # PESBESOR: espesor del elemento (m) # PCOND: conductividad termica (W/(m.C)) R2=D1, PAREA, PESB, PCOND => { R2=QPRODUCTO(PESB, 1/PAREA, 1/PCOND) } # Dos variantes del dibujo: contactos horizontales # o verticales</pre>



USO DEF
<pre># RESISTENCIA TERMICA CONDUCTIVA # ELEMENTO UNIDIMENSIONAL CILINDRICO # PARAMETROS: # PR_EXT: radio exterior del cilindro (m) # PR_INT: radio interior del cilindro (m) # PLONG: longitud del cilindro (m) # PCOND: conductividad termica (W/(m.C)) R3 = D2, PLONG, PR_INT, PR_EXT, PCOND => { PCOEF = LOG(PR_EXT/PR_INT) R3=QPRODUCTO(PCOEF, 1/PLONG, 1/PCOND) } # Dos variantes del dibujo: contactos horizontales # o verticales</pre>

c. Resistencias Convectivas



USO	DEF
#	RESISTENCIA TERMICA CONVECTIVA, # ELEMENTO UNIDIMENSIONAL PLANO O CILINDRICO
#	PARAMETROS:
#	PAREA: area plana o del cilindro (m2)
#	PH: coeficiente convectivo (W/(m2.C))
R1=V1, PAREA, PH	=> { R1=QPRODUCTO (1/PAREA, 1/PH) }
#	Dos variantes del dibujo: contactos horizontales # o verticales

d. Resistencias Radiactivas



USO	DEF
#	RESISTENCIA TERMICA RADIATIVA, ENTRE SUPERFICIES # A TEMPERATURA UNIFORME
#	PARAMETROS:
#	PAREA: area de una de las superficies (m2)
#	PEMIS: emisividad de las superficies (adimensionada)
#	PFFORMA: factor de forma entre las dos # superficies (adimensionada)
#	TEMP(a): temperatura, primer superficie (K)
#	TEMP(b): temperatura, segunda superficie (K)
R4=R1, PAREA, PEMIS, PFFORMA	=> { FUNCIONESDENODOS = TEMP PF=QPRODUCTO (5.67E-8, PAREA, PEMIS, PFFORMA) R4= QRAD(PF, TEMP(a), TEMP(b)) }

e. Flujos de Calor

Hay dos formulas ya definidas.



<u>USO DEF</u>
<pre># FLUJO DE CALOR POR TRANSPORTE DE MASA, # A TEMPERATURA DADA # PARAMETROS: # PCP: calor especifico de la masa circulante # (w/ (kg.C) # PFLUJOMASA: flujo de masa circulante (kg/s) # TEMP(a): temperatura del nodo origen del flujo # (C) # # J8=JM, PCP, PFLUJOMASA # => { # FUNCIONESDENODOS = TEMP # J8= QPRODUCTO(PCP, PFLUJOMASA, TEMP(a)) # } # Dos variantes del dibujo: hacia la derecha # o hacia la izquierda</pre>



<u>USO DEF</u>
<pre># FLUJO DE CALOR # PARAMETROS: # PFLUJO: flujo de calor (W/m2) # PAREA: superficie (m2) # J7=JQ, PAREA, PFLUJO # => { # J7 = QPRODUCTO(PAREA, PFLUJO) # } # Dos variantes del dibujo: hacia la derecha # o hacia la izquierda</pre>

f. Fuentes de Temperatura



<u>USO DEF</u>
<pre># FUENTE DE TEMPERATURA # PARAMETROS: # PTEMP: temperatura de la fuente (C) E6=E1, PTEMP => { E6 = PTEMP } # Puede omitirse E1, y escribir simplemente # E6 = PTEMP</pre>

Esta definición sólo sirve para indicarle a Simusol que esa forma representa una fuente; nos ahorra trabajo al dar los datos de un circuito.

1.1.5.1.2.6. Líneas de conexión

Hay varias líneas de conexión posibles. Al hacer el diagrama hay que preocuparse de que cada línea de conexión esté efectivamente conectada al nodo y al elemento que pretende unir.



1.1.5.1.2.6.1. Enganches efectivos

No es suficiente que una punta de línea termine cerca de un elemento térmico para que estén efectivamente enganchados. Un enganche involucra una punta de línea de conexión y un punto de conexión de un nodo o elemento térmico.

1.1.5.1.3. Información no gráfica al circuito

La parte gráfica del diagrama sólo describe que tipos de elementos integran el circuito, cada cual con su identificación, y en qué modo, es decir a cuales nodos, están conectados esos elementos.

Pero la información acerca de los valores de los elementos del circuito, y las identificaciones acerca de lo que se pretende de la simulación hay que darla utilizando cuadros.

Sceptre acepta que los valores de los elementos sean o no constantes. Se puede tener valores dependientes del tiempo o de alguna variable de la simulación.

Se puede usar expresiones algebraicas, funciones o tablas para dar o pedir información a Simusol sobre valores de los elementos, o de las variables de la simulación. La capacidad de interpretación de Simusol es limitada (y lo es más la de Sceptre). También se puede recurrir a utilizar parámetros auxiliares para simplificar las expresiones, o para simplificar el cambio.

1.1.5.1.3.1. **Definición de funciones o tablas**

Las funciones y las tablas se definen, para Simusol, en cuadros identificados mediante “TABLAS xx” “TABLAS_ARCHIVOS” o “FUNCIONES”.

Los valores que definen una tabla pueden provenir de un archivo o pueden volcarse directamente en el archivo-diagrama.

Las tablas, para Sceptre, son funciones que se dan en forma resumida. Sceptre limita el uso de tablas a las de dos columnas: la primera correspondiente a la variable independiente y la segunda a la dependiente, por lo que una tabla corresponde a una función de una sola variable.

Los valores de la variable independiente deben indicarse en forma creciente, con la excepción de que puede repetirse alguno si es que desea que haya un salto.

Los valores que definen la tabla deben ser expresados en unidades “compatibles” con las variables de la simulación en las que intervengan. Para las simulaciones habituales, el tiempo debe ser expresado en segundos.

1.1.5.1.3.2. Definición de funciones en FORTRAN

Simusol se ocupa de todos los subprogramas escritos en FORTRAN , que el usuario defina en un archivo funciones.for en el directorio de trabajo del susuario; todos ellos, serán compilados y puestos a disposición de Sceptre.

La información se escribe dentro de cuadros que forman parte del diagrama.

1.1.5.1.3.2.1. Cuadro de DATOS

Para simular un circuito térmico, los valores que hay que dar a los elementos que lo

integran se calculan a partir de propiedades de esos elementos.

1.1.5.1.3.2.2. **Cuadro de COMENTARIOS**

Un cuadro identificado como COMENTARIOS puede contener cualquier tipo de información ya que no afectará la simulación.

1.1.5.1.3.2.3. **Cuadro PARAMETROS**

El objetivo de esta definición puede ser, por ejemplo:

- Que al modificar el valor de un parámetro se modifiquen simultáneamente los datos de los elementos los que el parámetro interviene.
- Simplificar la descripción de una expresión algebraica o de una función.
- Ver como evoluciona en el tiempo una variable que no coincide exactamente con una variable de simulación. Por ejemplo como evoluciona la energía entregada por una fuente de temperatura.

1.1.5.1.3.2.4. Cuadro TABLA xx

Sirve para ingresar tablas directamente al diagrama. Se muestran dos cuadros que definen la tabla 1 y la tabla 2, que, para Sceptre tendrá los mismos valores.

TABLA 1	TABLA 2
0, 10000. 120, 1000. 480, 5000.	factor = 60, factor = 1000 0, 10. 2, 1. 8, 5

1.1.5.1.3.2.5. Cuadro TABLAS_ARCHIVOS

Si se tiene un archivo con varias columnas de datos y se necesita formar una tabla para ser usada en la simulación, se puede llenar un cuadro "TABLAS_ARCHIVOS".

1.1.5.1.3.2.6. Cuadro FUNCIONES

Nos referimos aquí a funciones de tipo ecuación que llegarán, tal cual al archivo de entrada para Sceptre Simusol ya tiene, disponibles para el usuario. Se muestra el cuadro a continuación.

FUNCIONES
$QEJEM(xx1,xx2) = (4.83 + xx1 * xx2 / 2)$ $QRAD(zz,xx,yy) = (1/zz * ((xx+273.0) ** 3 + (xx+273.0) ** 2 * (yy+273.0) + (xx+273.0) * (yy+273.0) ** 2))$

1.1.5.1.3.2.7. Cuadro TIEMPO

La duración de la simulación suele darse en el cuadro TIEMPO.

1.1.5.1.3.2.8. Cuadro INICIALES

Al comienzo de la simulación, usualmente para el instante 0s, los elementos acumuladores de calor tendrán cierta temperatura. Simusol exige que se de este dato en un cuadro INICIALES.

1.1.5.1.3.2.9. Cuadro RESULTADOS

El objetivo principal de Simusol, conseguido usando Sceptre, es averiguar como evolucionan algunas de las variables de la simulación en función del tiempo. Por defecto, Simusol guardará las temperaturas en los nodos del circuito. Pero el usuario puede pedir más o menos que esas variables y en el orden que quiera.

1.1.5.1.3.2.10. **Cuadro CONTROLES**

En este cuadro se puede incorporar sentencias de control para Sceptre como START TIME = 360, INTEGRATION ROUTINE = IMPLICIT etc.

1.1.5.1.3.2.11. **Cuadro USO_DEFINICION**

Con esos cuadros se provee a Simusol de fórmulas relacionadas con formas existente. Cada cuadro debe ir acompañado del o de los esquemas gráficos con los que se asocia.

1.1.5.1.3.2.12. **Cuadro USO y DEFINICION**

Con estos pares de cuadros se provee a Simusol de fórmulas y, eventualmente nuevos esquemas, relacionados con modelos.

1.1.5.1.3.2.13. **Cuadro UNIDADES**

El cuadro se necesita para indicar nombres de unidades y variables asociadas a un conjunto de elementos⁸.

⁸ Saravia Luis R. y Dolores alía de Saravia, "Manual Simusol".

1.2. Lugar de experimentación

El desarrollo del presente trabajo de tesis tuvo como lugar de experimentación Instituto Nacional de Energías No Convencionales (INENCO) de la Universidad de Salta Argentina, la ciudad de Salta esta a 1187 metros sobre el nivel del mar en el Valle de Lerma, al pie del Cerro San Bernardo. La experimentación tuvo lugar en el mes de julio en los días 07 al 11 del 2006.

1.3. Metodología

1.3.1. Diseño del experimento

Se empleo un diseño de investigación teórica comprobando los resultados mediante un procedimiento experimental.

La investigación teórica consistió en el diseño de un modelo matemático utilizando el software SIMUSOL como herramienta de simulación para la determinación del flujo óptimo de calor del secador solar tipo cabina.

1.4. Fase de laboratorio

1.4.1. Determinación del contenido de humedad de la manzana

Para medir el contenido de humedad de la manzana se utilizo el método de deshidratación directa, que consiste en medir la masa del producto antes y después de haber sometido a este a un deshidratado a temperatura constante de 100°C, cuatro grados sobre la temperatura de ebullición del agua, por un tiempo de cuatro horas.

Este proceso se toma una muestra de manzana significativa sin cáscara, luego se lleva al secador para su deshidratado durante cuatro horas tiempo en que la masa del producto es constante.

1.4.2. Instalación del ensayo experimental

El ensayo experimental fue denominado: “Evaluación experimental del flujo de calor del secador tipo cabina”, este ensayo se desarrolló de la siguiente manera:

Se estableció puntos de evaluación de variables que intervienen en el flujo de calor como la temperatura, velocidad y porcentaje de humedades el aire que a traviesa el secador: “a”, “b”, “c”, “d”, “e”, “f”, “g”, “h”, “i”, “j” y “k”, para luego compararlas con sus respectivas variables ambientales; así mismo se fijaron puntos para evaluar el comportamiento de la radiación solar que refleja en el colector como “R₁”, “R₂”, “R₃” y “R₄” para una radiación solar total que llega al secador.

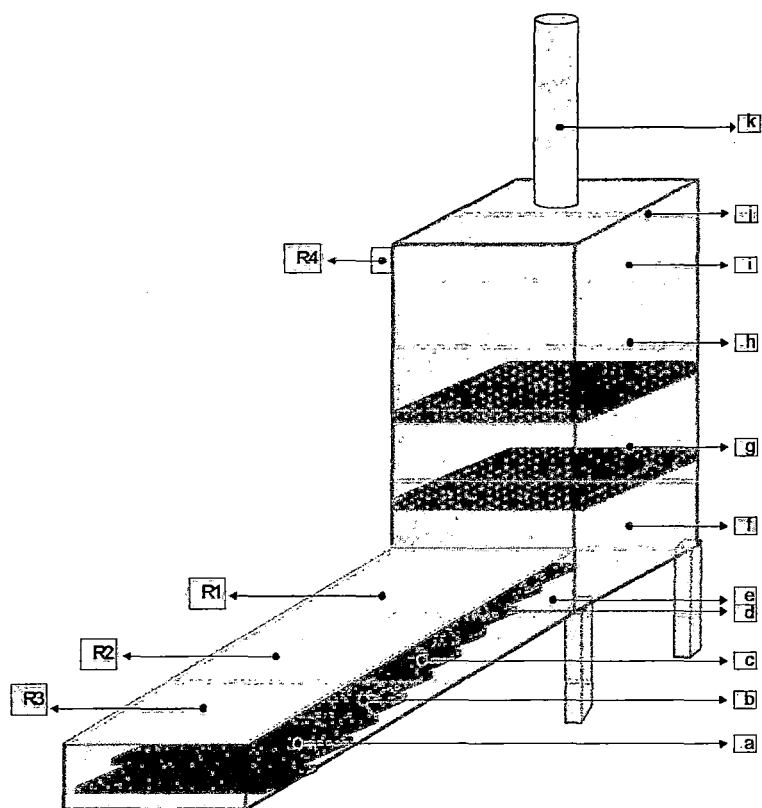


Figura 3.2: Definición de punto de evaluación en el secador solar tipo cabina

1.4.3. Pre - tratamiento del proceso de secado

Se inició un proceso de pre-tratamiento con el fin de conservar las propiedades organolépticas de la manzana antes de llevar al secador.

Primero se seleccionó la materia prima considerando la manzana madura, sin lesiones por magulladuras o microorganismos. Luego se prosiguió con la desinfección de la manzana lavándolo con abundante agua clorada. Luego se procedió a quitar la cáscara, la pepa y a cortar la manzana haciendo cortes radiales a través de su estructura casi circular y de un grosor de aproximadamente medio centímetro. A parte en un recipiente se preparó jugo de limón y se

sumergió las rodajas de manzana por 5 minutos aproximadamente, con el fin de evitar la oxidación del producto. Finalmente se dejó orear al medio ambiente y a ubicar las rodajas en las bandejas del secador solar.

1.4.4. Pruebas experimentales

Estas se hicieron del siguiente modo:

Las evaluaciones de temperatura del aire, velocidad del aire, porcentaje de humedad del aire y radiación solar se hicieron durante cinco días en horas efectivas de sol, desde las 11 hasta las 16 horas tiempo en que duró el secado de la manzana.

1.5. Fase de simulación

El intercambio de flujos de calores externos es uno de los procesos más habituales, los cuales han sido empleados para la simulación. Se tiene disponible los procesos de transferencia de calor en los materiales del secador, la entrega directa de flujo de calor proveniente de la radiación solar en una superficie del equipo y el flujo de calor mediante la circulación de aire que a continuación se analiza.

1.5.1. Análisis de flujo de calor por transporte de masa de aire

El flujo de calor mediante la circulación de aire a cierta temperatura se puede calcular considerando un flujo másico M en (Kg./s) con un calor específico C_p en (J/Kg.⁰C) a una diferencia de temperatura ΔT ($t - t_0$) en (⁰C), el flujo de calor valdrá:

$$Q = M.C_p.(t - t_0) \quad 2.1$$

Para calcular la cantidad de energía acumulada en el aire se considera una temperatura referencial, que en el caso del “Simusol” será el 0 grados centígrados de esta forma la ecuación para calcular el flujo de calor tendrá la forma siguiente:

$$Q = M.Cp.(t - 0) \quad 2.2$$

1.5.2. Análisis de flujo de calor en los materiales del secador solar tipo cabina

El análisis del flujo de calor en la estructura del secador solar se realizó considerando la Segunda Ley de la Termodinámica que plantea que el calor siempre se transfiere de un cuerpo o sustancia caliente a otra más fría. El calor dentro del secador se pierde por tres mecanismos físicos que son; conducción, radiación y convección.

1.5.2.1. Análisis del flujo de calor para el colector

El colector solar es un equipo desarrollado con éxito en diferentes partes del mundo, siendo su construcción y operación relativamente simple. Su propósito es el calentamiento de un fluido, en este caso aire. Existen diversos tipos de colectores calentadores de aire, que se diferencian de su forma y materiales empleados para su construcción.

A continuación se describe el colector empleado para nuestro caso. En la *figura 3.3* se presenta un esquema de una sección del colector solar. Este está construido por una superficie metálica plana pintada de negro para asegurar un mejor contacto térmico con el aire la misma que se encuentra dispuesta en forma escalonada. La superficie transparente puede ser de vidrio. El aire pasa por encima y por debajo del metal en un ducto aislado.

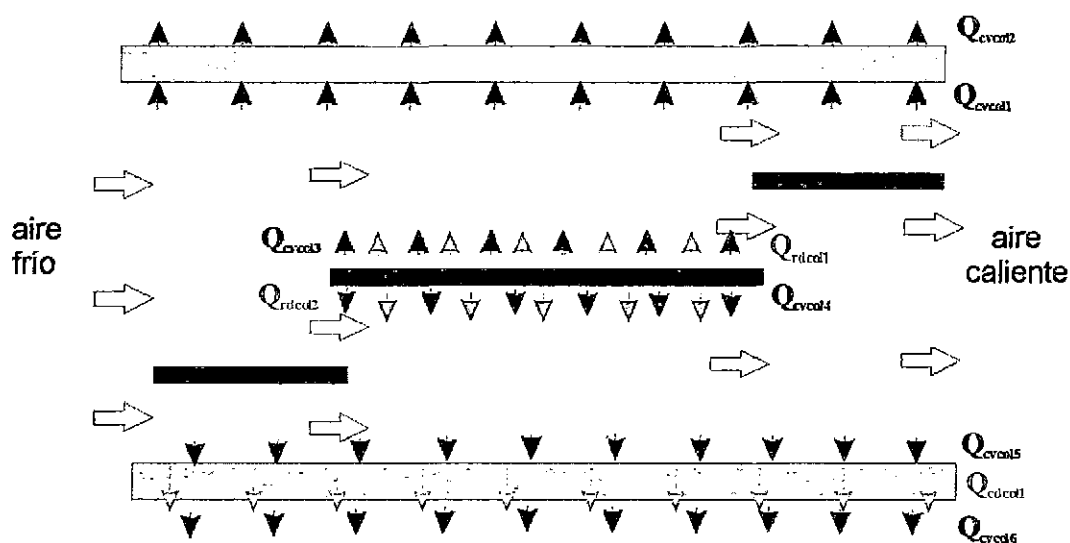


Figura 3.3: Esquema sistematizado de una sección del colector solar

Esta figura muestra la transferencia de calor por los diferentes materiales de construcción que a continuación se detalla:

1.5.2.1.1. Transferencia de calor por Conducción:

Pérdidas de calor por conducción a través del aislante en una diferencia de temperatura t_{b2} y t_{b1} puntos considerados en los dos extremos del grosor del aislante:

$$Q_{con1} = \frac{k}{d}(t_{b2} - t_{b1}) \quad 2.3$$

donde:

k = coeficiente de conductividad térmica, en W/m^0C ,

d = distancia entre las superficies, en m,

1.5.2.1.2. Transferencia de calor por Convección:

Pérdidas de calor por convección de la superficie superior del vidrio t_{v1} hacia el aire a temperatura ambiente t_a :

$$Q_{con1} = h(t_a - t_{v1}) \quad 2.4$$

Pérdida de calor por convección del aire pre-calentado $t_{a.2.1}$ hacia la superficie inferior del vidrio t_{v2} :

$$Q_{con2} = h(t_{v.2} - t_{a.2.1}) \quad 2.5$$

Pérdida de calor por convección de la placa negra t_p al aire previamente calentado que fluye por la parte superior de este $t_{a.2.1}$:

$$Q_{con3} = h(t_{a.2.1} - t_p) \quad 2.6$$

Pérdida de calor por convección de la placa negra t_p al aire caliente que fluye por la parte inferior de este $t_{a.2.2}$:

$$Q_{conv14} = h(t_{a.2.2} - t_p) \quad 2.7$$

Pérdida de calor por convección del aire caliente $t_{a.2.2}$ hacia la superficie superior del aislante $t_{b.1}$:

$$Q_{conv15} = h(t_{b.1} - t_{a.2.2}) \quad 2.8$$

Pérdida de calor por convección de la superficie inferior del aislante t_{b2} hacia el aire circundante externo t_a :

$$Q_{conv16} = h(t_a - t_{b2}) \quad 2.9$$

donde:

h = coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

1.5.2.1.3. Transferencia de calor por Radiación:

Pérdidas de calor por radiación de la placa negra t_p al aire precalentado $t_{a.2.1}$ que fluye por la parte superior de esta:

$$Q_{rdcol1} = hr.(t_{a.2.1} - t_p) \quad 2.10$$

Pérdida de calor por radiación de la placa negra t_p al aire caliente que fluye por la parte inferior de esta:

$$Q_{rdcol2} = hr.(t_{a.2.2} - t_p) \quad 2.11$$

donde:

$h_r = 4 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T^3$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$.

1.5.2.2. Análisis del flujo de calor para la cámara

En esta parte del secador es donde se aloja el producto a secar en bandejas, este debe de estar previamente aislado para evitar las pérdidas de calor, y debe de tener una entrada de aire seco previamente calentado por el colector y una salida para expeler el aire con vapor de agua perdido por el producto. En la siguiente figura se explica el funcionamiento de este y el flujo de calor a través del material.

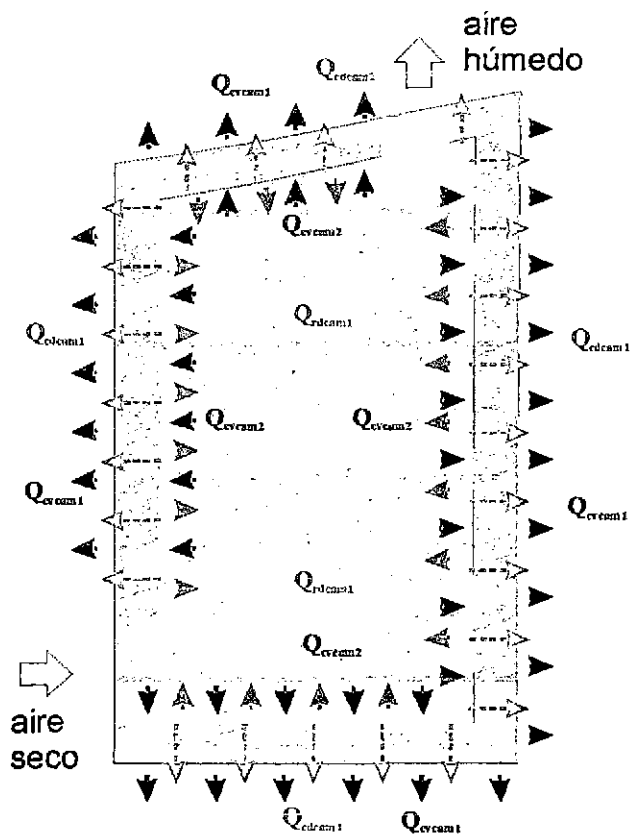


Figura 3.4: Esquema de la cámara del secador solar

En esta figura se observa las pérdidas de calor por los materiales de construcción de la cámara que seguidamente se detallan:

1.5.2.2.1. Transferencia de calor por Conducción

Pérdidas de calor por conducción desde t_{m1} a t_{m2} puntos considerados a través del grosor del aislante:

$$Q_{cdcaml} = \frac{k}{d}(t_{m2} - t_{m1}) \quad 2.10$$

donde:

k = coeficiente de conductividad térmica, en W/m^0C ,

d = distancia entre las superficies, en m,

1.5.2.2.2. Transferencia de calor por Convección

Pérdidas de calor por convección de la superficie que esta en contacto con el aire del ambiente desde t_{m2} hasta t_a (temperatura ambiente):

$$Q_{cvcam1} = h(t_a - t_{m2}) \quad 2.11$$

Pérdida de calor por convección del aire caliente dentro de la cámara t_{a2} a la superficie interior del aislante t_{m1} :

$$Q_{cvcam2} = h(t_{m1} - t_{a2}) \quad 2.12$$

donde:

h = coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2 \cdot ^0C$.

1.5.2.2.3. Transferencia de calor por Radiación

Pérdidas de calor por radiación entre las superficies interiores del aislante desde t_{m1} hasta t_{m3} :

$$Q_{rdcam1} = hr.(t_{m3} - t_{m1}) \quad 2.13$$

donde:

$hr = 4\varepsilon_1 \cdot \sigma T^3$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, en $W/m^2 \cdot ^\circ K$.

1.5.3. Análisis de la pérdida de humedad de la manzana

En este análisis se consideró que la cámara tiene una distribución uniforme de temperatura, velocidad del aire húmedo y humedad, con fines de simplificación.

En el proceso de secado de la manzana se consideró que la superficie límite permeable es permeable bilateral, por lo tanto las dos paredes son permeables a los dos gases que se difunden uno a otro. Las ecuaciones básicas que se utilizaron son:

La ecuación de 1.32 para calcular el coeficiente de transferencia de masa (vapor de agua) por difusión del líquido a través de la superficie de la manzana " h_D ", esta ecuación puede relacionar la velocidad de secado " R ", área de la bandeja (A), humedad absoluta de saturación del vapor de agua que depende de la presión de saturación de vapor de agua y esta a su vez de la temperatura del producto " $W_s(P_s(T_p))$ " y la humedad dentro de la cámara del secador " W_c ", así de este modo tenemos lo siguiente

$$h_D = -\frac{R}{A.(W_s(P_s(T_p)) - W_c)} \quad 2.14$$

Para poder obtener “Ws” se aplicó la ecuación 1.13 y 1.9 en función de la temperatura del producto “Tp”.

1.5.4. Diseño del circuito de simulación

1.5.4.1. Diseño del circuito de simulación del flujo de calor

En este diseño es necesario ofrecer al programa *tablas* de datos del comportamiento de temperatura ambiente y radiación solar durante horas de sol efectiva correspondientes a un día. También es fundamental dar al programa los *datos iniciales*, en los puntos que se desea evaluar la temperatura, para que así el programa pueda reproducir estos en intervalos de tiempo durante el día requerido. Así mismo se brindan *datos* de constantes como calor específico del aire seco y aire húmedo a una temperatura dada, masa del aire, constantes de conducción, convección y radiación para cada materia de construcción del secador en, flujo de masa en y dimensiones del secador como volumen, área de la zona a evaluar, todos estos datos estas en unidades del Sistema Internacional (MKS). Esta información se encuentra previamente procesada para los datos iniciales establecidos (*ver apéndice*).

En este diseño de simulación es indispensable dividir en secciones el secador solar, para tener una amplia información de fenómenos térmicos, para esto se dividió en secciones el secador, teniendo diez secciones en la parte del colector que son las correspondientes a cada placa negra (I, II, III, IV, V, IV, VII, VIII, IX, X) , cinco secciones en la parte de la cámara (XI, XII, XIII, XIV, XV) y una sección que representa la chimenea del secador (XVI). Y para un mejor entendimiento es preferible enumerar las partes en cada sección, donde exista una diferencia de temperatura ya sea en los materiales del secador y del aire mismo manteniendo así un orden.

Con el fin de tener una información completa, se hizo el diseño de un circuito que simula la pérdida de humedad de la manzana durante un tiempo establecido, para ello se utilizó los mismos elementos térmicos pero cambiando su función.

Figura 3.5: Representación de puntos en el colector solar

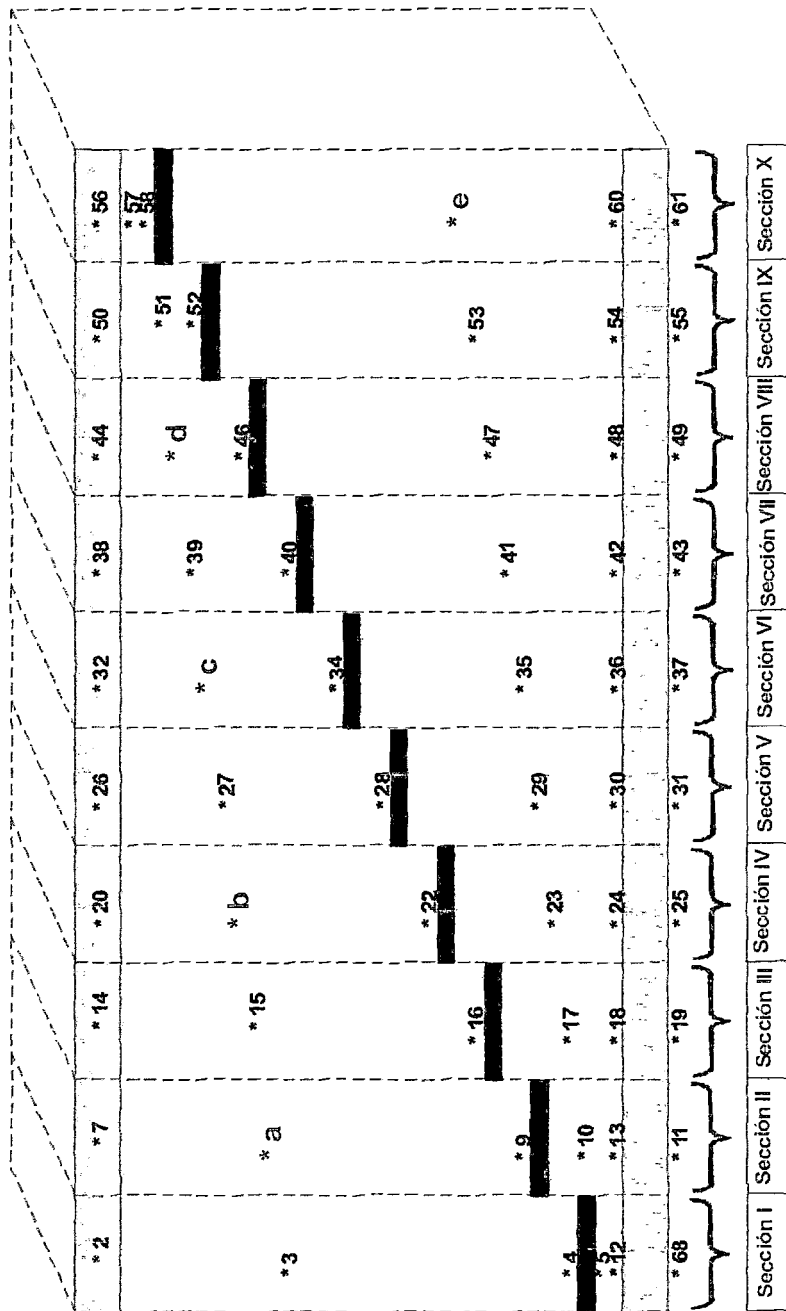
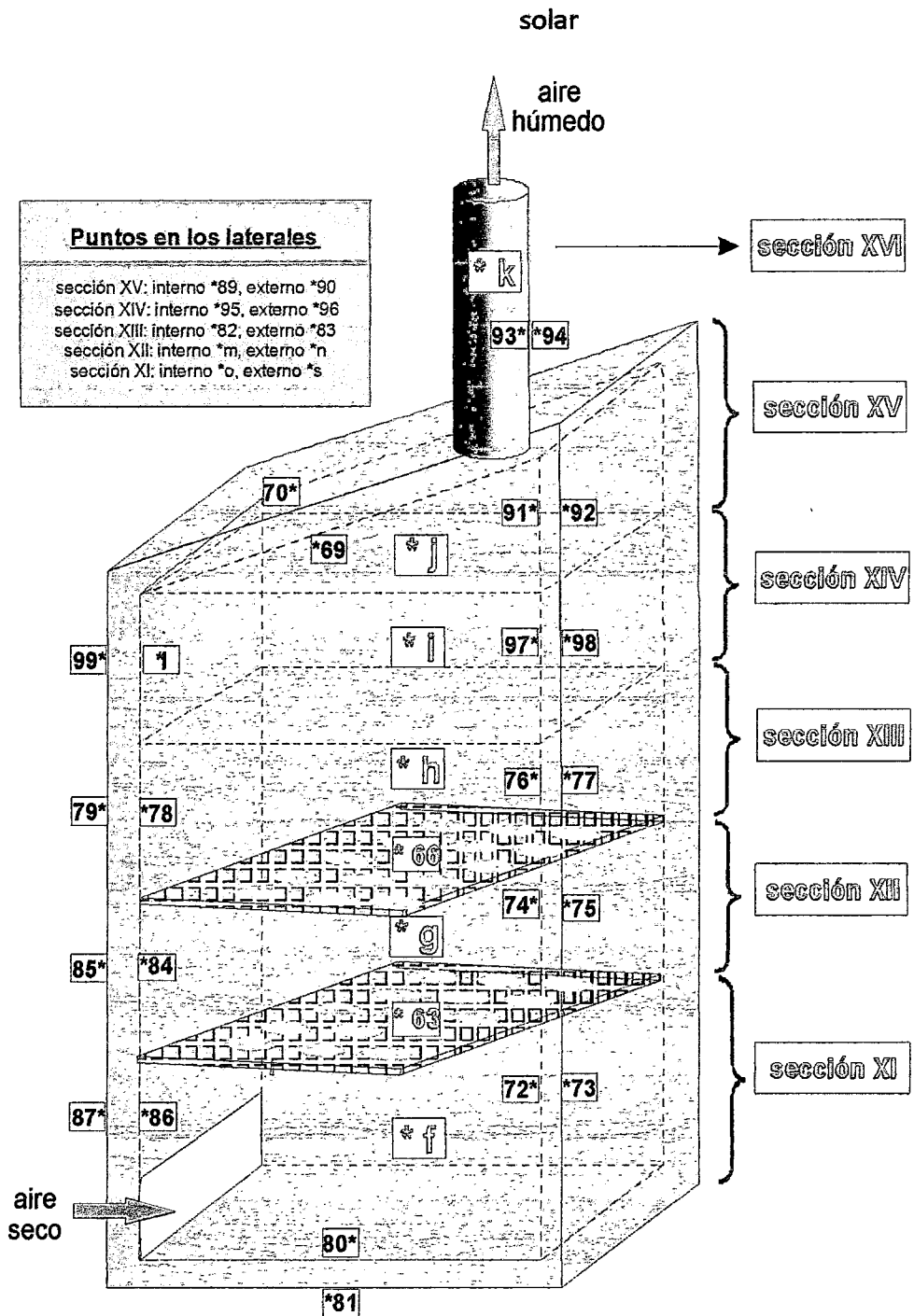


Figura 3.6: Representación de puntos en la cámara del secador



Como el *colector solar* es de tipo escalonado, entonces el aire que ingresa por la parte inferior, fluye encima y sobre la placa negra previamente calentado por interacción con la radiación solar, este a su vez transmite calor al aire que se encuentra en contacto con él. El aire también está en contacto con la cubierta de vidrio y elementos aislantes entonces por este hecho existirá una transferencia de calor por medio de estos. La temperatura del aire bajo las placas es más elevada que el aire que se encuentra encima, es por ello que debajo de la última placa se encuentra la temperatura mayor. Luego esta ingresa a la *cámara* y fluye hacia arriba por convección natural, interacciona con la manzana que se encuentra en las bandejas por este hecho disminuye la temperatura del aire circundante, después de pasar esta zona incrementa gradualmente la temperatura por estar el techo de la cámara caliente y finalmente sale por la chimenea.

Cuadro 1: Interpretación de elementos térmicos










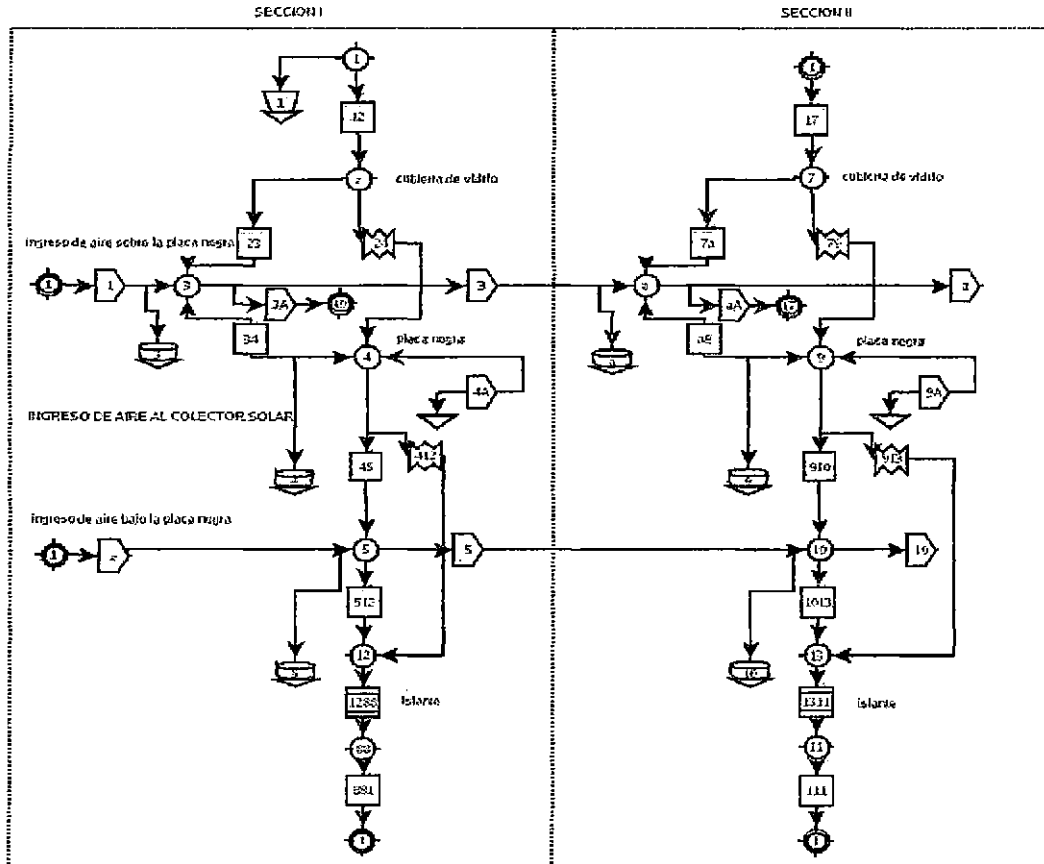
Símbolo	Representación
	Nodo de conexión que representan las temperaturas en (grados centígrados) para distintas zonas del secador.
	Nodo triangular representa una temperatura de cero grados centígrados.
	Transferencia de calor por conducción térmica en las paredes del secador.
	Transferencia de calor por convección entre el aire que circunda por cada material del secador y las rodajas de manzana.
	Transferencia de calor por radiación entre la superficie superior e inferior de la placa negra con el cobertor de vidrio y el aislante.
	Acumulador térmico de calor sensible en la placa negra, manzana y las distintas secciones del secador por donde fluye el aire.
	Fuente de temperatura ambiente.
	Flujo de calor por transporte de masa de aire en todo el secador.
	Flujo de calor proveniente de la radiación solar.

Figura 3.7: Circuito de simulación del flujo de calor del secador solar tipo cabina para la sección I y II



Interpretación del circuito de simulación del colector solar para la sección I y II

En este esquema muestra el flujo de aire que circula en las secciones I y II del circuito mostrado anteriormente.

Ingresa el flujo de aire al colector a temperatura ambiente (1) y (2) sobre y bajo la placa negra por la sección I del colector solar luego fluye hacia la sección II con los flujos (3), (4A) y (5) saliendo de este con flujos (4) y (10).

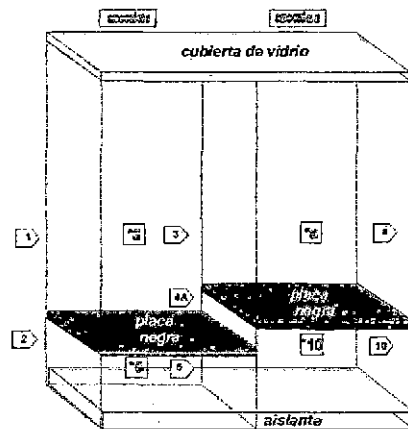
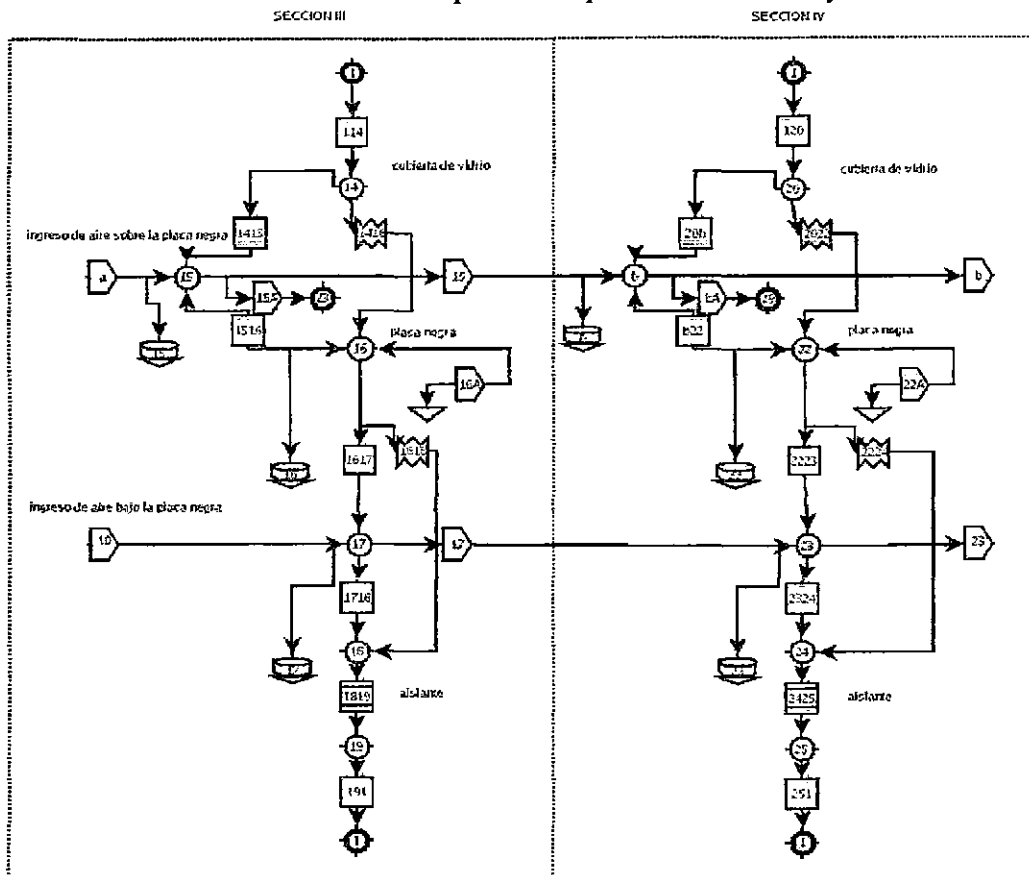


Figura 3.8: Circuito de simulación del flujo de calor del secador solar tipo cabina para la sección III y IV



Interpretación del circuito de simulación del colector solar para la sección III y IV

En este esquema muestra el flujo de aire que circula en las secciones III y IV del circuito mostrado anteriormente.

Ingresa el flujo de aire pre calentado (a) y (10) sobre y bajo la placa negra por la sección III del colector solar luego fluye hacia la sección IV con los flujos (15), (15A) y (17) saliendo de este con flujos (b) y (23).

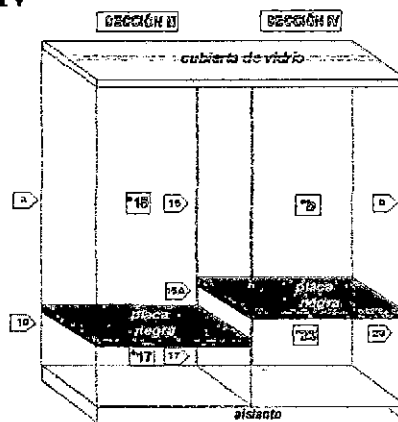
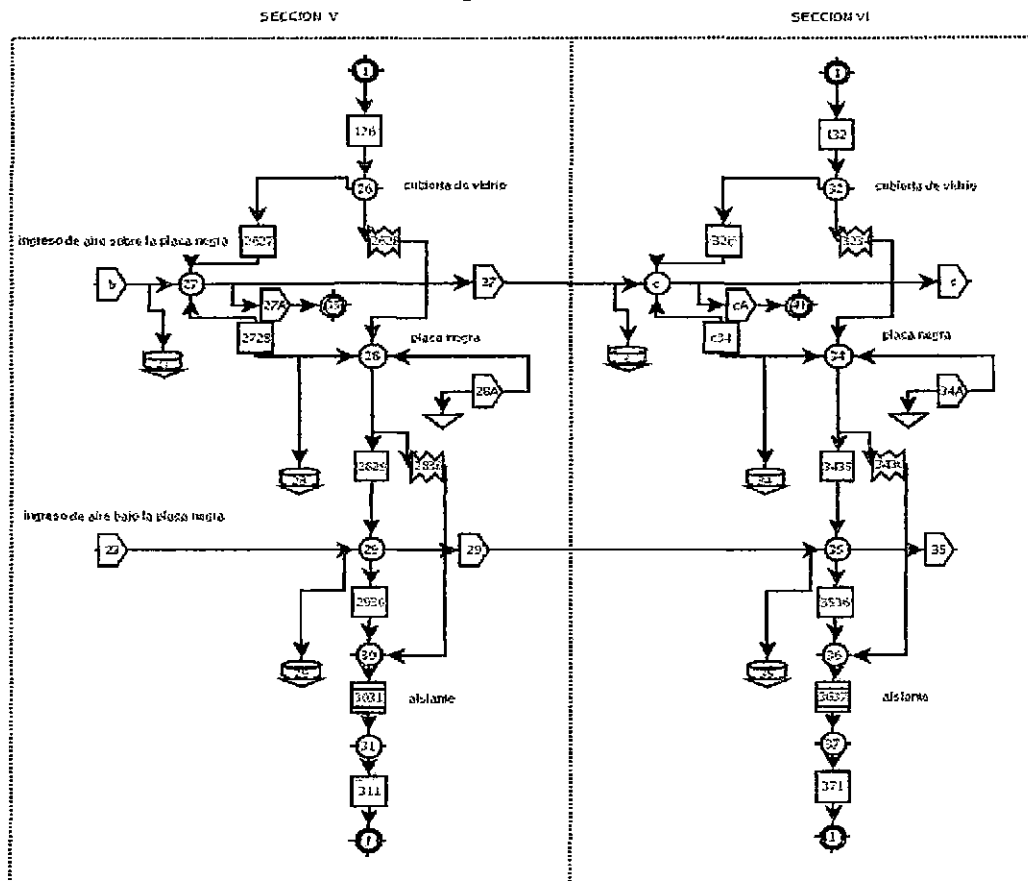


Figura 3.9: Circuito de simulación del flujo de calor del secador solar tipo cabina para la sección V y VI



Interpretación del circuito de simulación del colector solar para la sección V y VI

En este esquema muestra el flujo de aire que circula en las secciones V y VI del circuito mostrado anteriormente.

Ingresa el flujo de aire pre calentado (b) y (23) sobre y bajo la placa negra por la sección V del colector solar luego fluye hacia la sección VI con los flujos (27), (27A) y (29) saliendo de este con flujos (c) y (35).

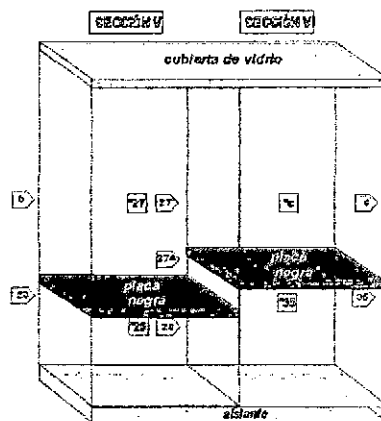
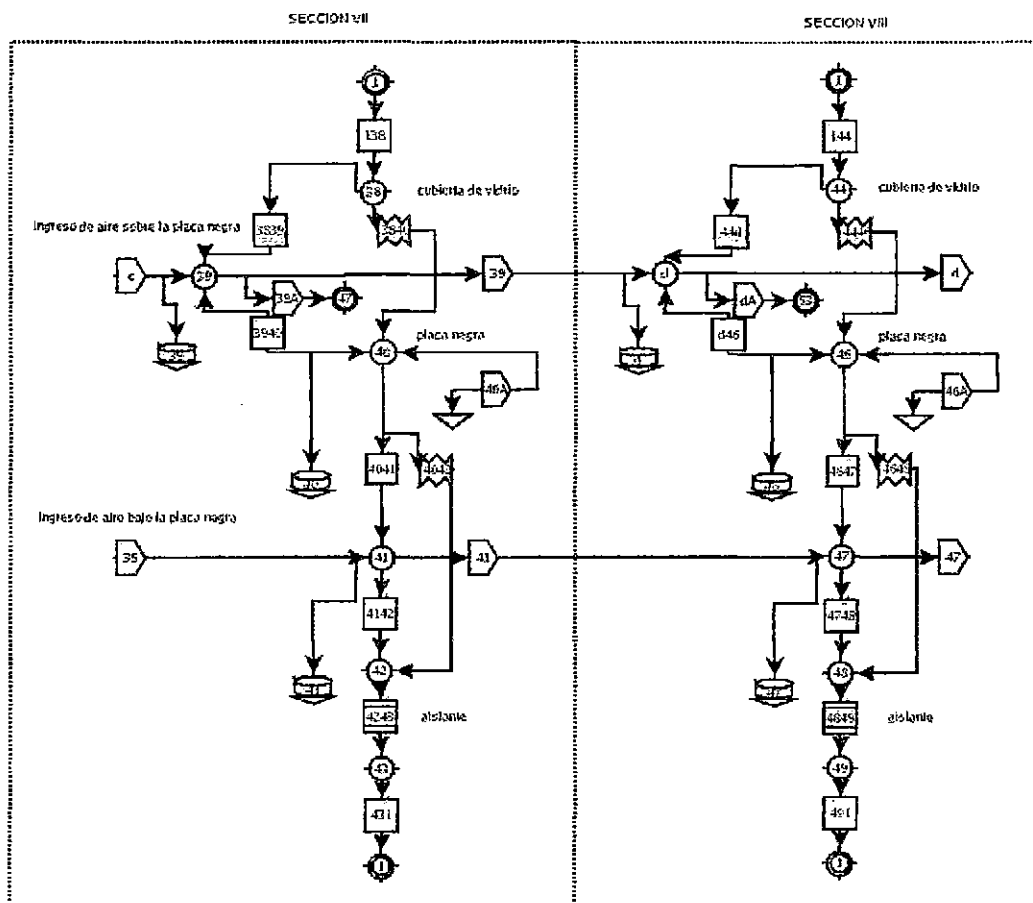


Figura 3.10: Circuito de simulación del flujo de calor del secador solar tipo cabina para la sección VII y VIII



Interpretación del circuito de simulación del colector solar para la sección VI y VIII

En este esquema muestra el flujo de aire que circula en las secciones VII y VIII del circuito mostrado anteriormente.

Ingresa el flujo de aire pre calentado (c) y (35) sobre y bajo la placa negra por la sección VII del colector solar luego fluye hacia la sección VIII con los flujos (39), (39A) y (41) saliendo de este con flujos (d) y (47).

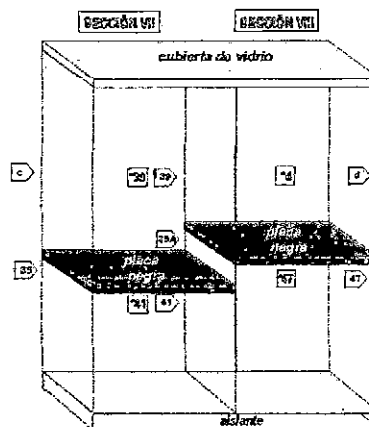
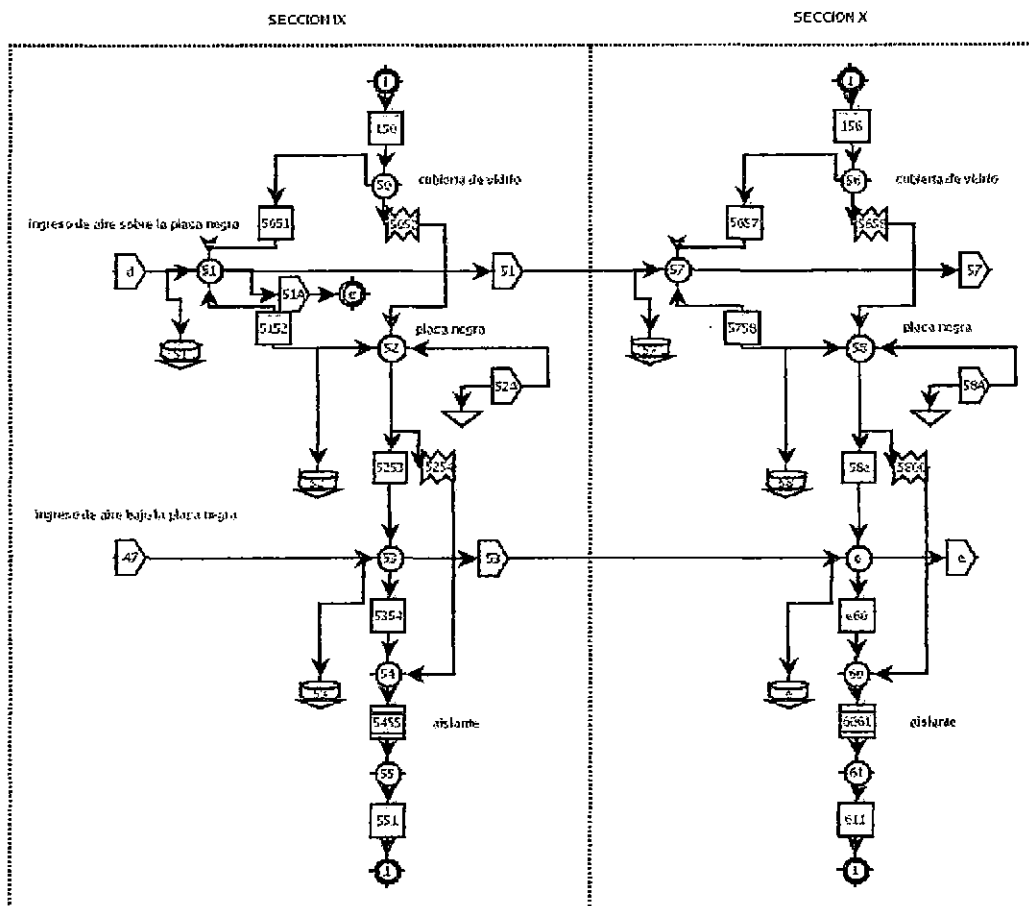


Figura 3.11: Circuito de simulación del flujo de calor del secador solar tipo cabina para la sección IX y X



Interpretación del circuito de simulación del colector solar para la sección IX y X

En este esquema muestra el flujo de aire que circula en las secciones IX y X del circuito mostrado anteriormente.

Ingresa el flujo de aire pre calentado (d) y (47) sobre y bajo la placa negra por la sección IX del colector solar luego fluye hacia la sección X con los flujos (51), (51A) y (53) saliendo de este con flujos (57) y (e).

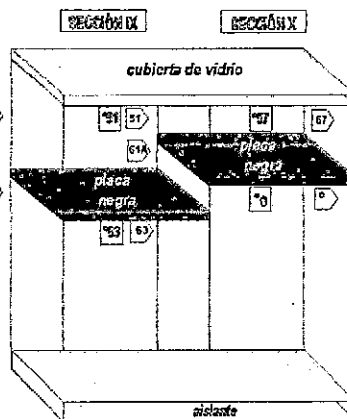
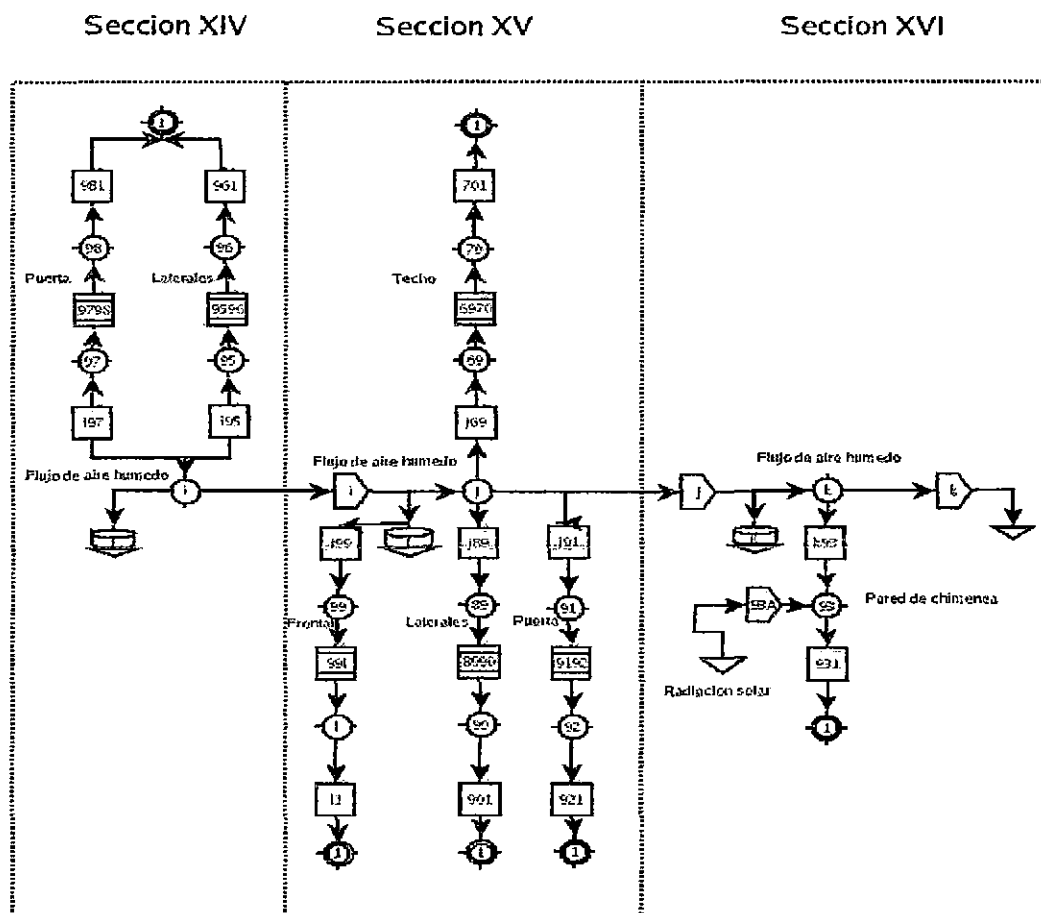


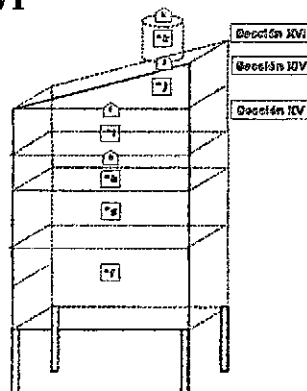
Figura 3.13: Circuito de simulación del flujo de calor del secador solar tipo cabina para la sección XIV, XV y XVI



Interpretación del circuito de simulación del colector solar para la sección XIV, XV y XVI

En este esquema se muestra el flujo de aire que circula por la cámara del secador en las secciones XIV, XV y XVI del circuito mostrado anteriormente.

Ingresa el flujo de aire con humedad de manzana a la sección XIV y XV con flujos (h) y (j) respectivamente luego sigue por la chimenea con el flujo (k) por la sección XVI hasta salir al exterior.



Los datos incorporados al programa SIMUSOL, son los siguientes:

Datos 1: datos característicos de acumuladores incorporados al programa.

Datos 2: datos característicos de resistencias térmicas conductivas incorporados al programa.

<u>datos</u>
C3=C1,1026.2,0.05064
C4=C1,300,0.238
C5=C1,1020.54,0.022517
Ca=C1,1018.91,0.064966
C9=C1,300,0.238
C10=C1,1023.49,0.005034
C15=C1,1020.06,0.012438
C16=C1,300,0.238
C17=C1,1027.11,0.019811
Cb=C1,1015.42,0.000791
C23=C1,1024.74,0.003638
C27=C1,1012.59,0.000885
C29=C1,1027.73,0.00245
Cc=C1,1018.8,0.000862
C35=C1,1029.68,0.002272
C39=C1,1019.71,0.000309
C41=C1,1033.94,0.002069
Cd=C1,1022.95,0.000029
C47=C1,1036.67,0.001869
C51=C1,1028.85,0.000724
C53=C1,1038.74,0.001674
C57=C1,1036.07,0.000486
Ce=C1,1018.36,0.000857
C34=C1,300,0.238
C40=C1,300,0.238
C46=C1,300,0.238
C52=C1,300,0.238
C58=C1,300,0.238
C28=C1,300,0.238
C22=C1,300,0.238
Cf=C1,1017.95,0.000188
C63=C1,3770,0.4
C66=C1,3770,0.4
Cg=C1,1020.67,0.000038
Ch=C1,1015.73,0.000001
Ci=C1,1017.06,0.000001
Cj=C1,1015.59,0.000118
Ck=C1,1008.39,0.004786

<u>datos 2</u>
R1288=D1,1.8767,0.239,52.17
R1311=D1,1.8767,0.239,52.17
R1819=D1,1.8767,0.239,52.17
R2425=D1,1.8767,0.239,52.17
R3031=D1,1.8767,0.239,52.17
R3637=D1,1.8767,0.239,52.17
R4243=D1,1.8767,0.239,52.17
R4849=D1,1.8767,0.239,52.17
R5455=D1,1.8767,0.239,52.17
R6061=D1,1.8767,0.239,52.17
R6970=D1,0.294292805,0.02175,0.35
R7273=D1,0.135793,0.02175,0.35
R8081=D1,0.263024,0.02175,0.35
Rso=D1,0.271586,0.0275,0.35
R7475=D1,0.131936,0.02175,0.35
R8283=R9596=D1,0.253365,0.02175,0.35
R7677=R9798=D1,0.1266825,0.02175,0.35
R7879=D1,0.1266825,0.02175,0.35
R8485=D1,0.131936,0.02175,0.35
Rmn=D1,0.263872,0.02175,0.35
R8687=D1,0.0630686,0.02175,0.35
R991=D1,0.1266825,0.02175,0.35
R9192=D1,0.105336,0.02175,0.35
R8990=D1,0.370672,0.02175,0.35

Datos 3: datos característicos de resistencias térmicas convectivas incorporados al programa.

datos 3
R12=V1,0.0532,10
R13=V1,0.0532,10
R14=V1,0.0532,10
R15=V1,0.0532,10
R16=V1,0.0532,8
R17=V1,0.0532,8
R18=V1,0.0532,10
R19=V1,0.0532,10
R20=V1,0.0532,10
R21=V1,0.0532,10
R22=V1,0.0532,10
R23=V1,0.0532,10
R24=V1,0.0532,8
R25=V1,0.0532,8
R26=V1,0.0532,10
R27=V1,0.0532,10
R28=V1,0.0532,10
R29=V1,0.0532,10
R30=V1,0.0532,8
R31=V1,0.0532,8
R32=V1,0.0532,10
R33=V1,0.0532,10
R34=V1,0.0532,10
R35=V1,0.0532,10
R36=V1,0.0532,8
R37=V1,0.0532,8
R38=V1,0.0532,10
R39=V1,0.0532,10
R40=V1,0.0532,10
R41=V1,0.0532,10
R42=V1,0.0532,8
R43=V1,0.0532,8
R44=V1,0.0532,10
R45=V1,0.0532,10
R46=V1,0.0532,10
R47=V1,0.0532,10
R48=V1,0.0532,8
R49=V1,0.0532,8
R50=V1,0.0532,10
R51=V1,0.0532,10
R52=V1,0.0532,10
R53=V1,0.0532,8
R54=V1,0.0532,8
R55=V1,0.0532,10
R56=V1,0.0532,10
R57=V1,0.0532,10
R58=V1,0.0532,10
R59=V1,0.0532,10
R60=V1,0.0532,8
R61=V1,0.0532,8
R62=V1,0.254222605,8
R63=V1,0.254222605,10
R64=V1,0.131596,5
R65=V1,0.131596,2
R66=V1,0.131596,10
R67=V1,0.271596,10
R68=V1,0.271596,5
R69=V1,0.271596,10
R70=V1,0.125790,8
R71=V1,0.125790,8
R72=V1,0.223024,8
R73=V1,0.2230,2
R74=V1,0.121596,10
R75=V1,0.263,5
R76=R77=V1,0.252285,10
R78=V1,0.1256825,10
R79=V1,0.121596,8
R80=R81=V1,0.252285,8
R82=R83=V1,0.1256825,8
R84=V1,0.121596,10
R85=V1,0.263872,10
R86=R87=V1,0.131596,8
R88=V1,0.263872,8
R89=V1,0.263872,10
R90=V1,0.271596,10
R91=V1,0.10532,10
R92=V1,0.070672,8
R93=V1,0.155539,8
R94=V1,0.0532,754,15
R95=V1,0.0532,723,10

Datos 4: datos característicos de resistencias térmicas radiactivas incorporados al programa.

datos
R24=R1,0.0532,0.9,1
R412=R1,0.0532,0.276,1
R79=R1,0.0532,0.9,1
R913=R1,0.0532,0.276,1
R1416=R1,0.0532,0.9,1
R1618=R1,0.0532,0.276,1
R2022=R1,0.0532,0.9,1
R2224=R1,0.0532,0.276,1
R2628=R1,0.0532,0.9,1
R2830=R1,0.0532,0.276,1
R3234=R1,0.0532,0.9,1
R3436=R1,0.0532,0.276,1
R3840=R1,0.0532,0.9,1
R4042=R1,0.0532,0.276,1
R4446=R1,0.0532,0.9,1
R4648=R1,0.0532,0.276,1
R5052=R1,0.0532,0.9,1
R5254=R1,0.0532,0.276,1
R5658=R1,0.0532,0.9,1
R5860=R1,0.0532,0.276,1

Datos 5: datos flujo de masa de aire en cada punto del secador

datos
J3=JM,1036.2,0.012711
J3A=JM,1026.2,0.001503
J5=JM,1026.54,0.002775
J1=JM,1020.3,0.01364
J2=JM,1020.3,0.091381
J6=JM,1015.91,0.002532
JAA=JM,1018.91,0.002268
J10=JM,1023.49,0.003123
J13=JM,1020.06,0.012049
J15A=JM,1020.06,0.00225
J17=JM,1027.11,0.016204
J18=JM,1015.42,0.003275
J19A=JM,1012.05,0.001143
J23=JM,1024.74,0.00493
J27=JM,1012.59,0.0056
J27A=JM,1012.59,0.001301
J29=JM,1027.73,0.00526
Jc=JM,1018.8,0.00347
JcA=JM,1015.8,0.001434
J35=JM,1029.08,0.006388
J39=JM,1019.71,0.001679
J39A=JM,1016.71,0.001144
J41=JM,1033.94,0.007242
J4=JM,1022.55,0.000514
J4A=JM,1022.95,0.000368
J47=JM,1038.87,0.007979
J51=JM,1028.65,0.001854
J51A=JM,1028.85,0.002555
J52=JM,1038.74,0.006888
J57=JM,1038.07,0.001558
Jc=JM,1018.96,0.006879
Ji=JM,1017.95,0.004582
Jg=JM,1020.67,0.00255
Jh=JM,1015.73,0.000517
Ji=JM,1017.06,0.000507
Jj=JM,1015.59,0.001073
Jk=JM,1003.39,0.007269

Datos 6: datos flujo de calor en cada punto del secador.

Datos 7: datos iniciales de temperatura en cada punto del secador.

datos 6

J4A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J9A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J16A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J22A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J28A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 B4A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J40A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J46A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J52A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J58A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
 J87A= JQ,0.0530685,tabla2(tiempo)
 J83A= JQ,0.253365,tabla2(tiempo)
 J85A= JQ,0.131936,tabla2(tiempo)
 J79A= JQ,0.253365,tabla2(tiempo)
 E1=E1,tabla1(tiempo)

iniciales

Temp 3=34.4
 Temp 5=30.5
 Temp 4=36
 Temp a=28.8
 Temp 9=30
 Temp 10=32.5
 Temp 15=29.8
 Temp 16=32
 Temp 17=35
 Temp b=25.4
 Temp 23=33.4
 Temp 27=22.1
 Temp 29=35.4
 Temp c=28.7
 Temp 35=36.6
 Temp 39=29.5
 Temp 41= 39
 Temp d= 32.1
 Temp 47= 40.4
 Temp 51= 36.1
 Temp 53= 41.4
 Temp 57= 40.1
 Temp e= 28.3
 Temp 22= 35
 Temp 28= 39
 Temp 34= 42
 Temp 40= 45
 Temp 46= 48
 Temp 52= 49
 Temp 58= 49
 Temp f=26.2
 Temp g=31.2
 Temp h=27.5
 Temp i=27.5
 Temp j=26.7
 Temp k=28.7
 Temp 63=26
 Temp 66=26

Datos 8: tabla de datos de temperatura ambiente (5 horas/un día de secado efectivo).

Datos 9: tabla de datos de radiación solar (5 horas/un día de secado efectivo).

Tabla 1

factor = 3600, factor = 1
 0,30
 1,31
 2,32
 3,33
 4,29.5
 5,25

Tabla 2

factor = 3600, factor = 1
 0, 865.35
 1, 905.35
 2, 946.5
 3, 836.78
 4, 288.07
 5, 212.62

Datos 10: Resultados de comportamiento del flujo de calor por transferencia de masa en el secador solar.

resultados1

Ja
Jb
Jc
Jd
Je
Jf
Jg
Jh
Ji
Jj
Jk

Datos 11: Resultados de comportamiento del flujo de calor en los materiales del colector del secador solar.

resultados2

flujo R126
flujo R2627
flujo R2628
flujo R2728
flujo R2829
flujo R2830
flujo R2930
flujo R3031
flujo R311

Datos 13: Resultados de comportamiento del flujo de calor en los materiales de la cámara del secador solar.

resultados3

flujo R80f
flujo R8081
flujo R811
flujo R876
flujo R7677
flujo R771
flujo R78h
flujo R7978
flujo R791
flujo R7069
flujo R69j
flujo R82h
flujo R8283
flujo R831
flujo R83k
flujo 8384
flujo R941

Datos 14: Tiempo estimado para la simulación.

tiempo

5101ae

Datos 15: Controlador de integración.

CONTROLES

INTEGRATION ROUTINE=IMPLICIT

Nota: Los datos considerados en este programa son para el primer día de secado y de forma similar en los subsiguientes.

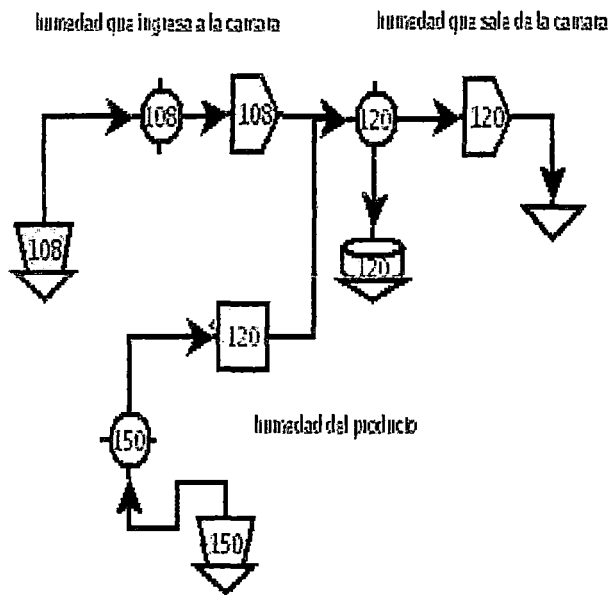
1.5.4.2. Diseño del circuito de simulación para la pérdida de humedad de la manzana

En el diseño del circuito de pérdida de humedad se tomó como referencia el análisis antes mencionado en la sección (1.5.1.3) donde se relacionaron dos circuitos de simulación los cuales son el **circuito de Humedad** y el **circuito Térmico**.

En el **circuito de humedad**, el aire previamente calentado por el colector ingresa a la cámara del secador con una cierta humedad y por un proceso de transferencia de masa por difusión se lleva consigo la **humedad de la manzana** hacia el exterior de la cámara.

Mientras que en el **circuito térmico**, el aire previamente calentado por el colector ingresa a la cámara del secador con una cierta temperatura y por un proceso convectivo transfiere calor a la manzana incrementando su temperatura y rompiendo el enlace del agua con la materia sólida lleva la **humedad hacia el exterior de la cámara**.

Figura 3.14: Circuito de simulación de humedad



Cuadro 2: Interpretación de elementos del circuito de simulación de humedad











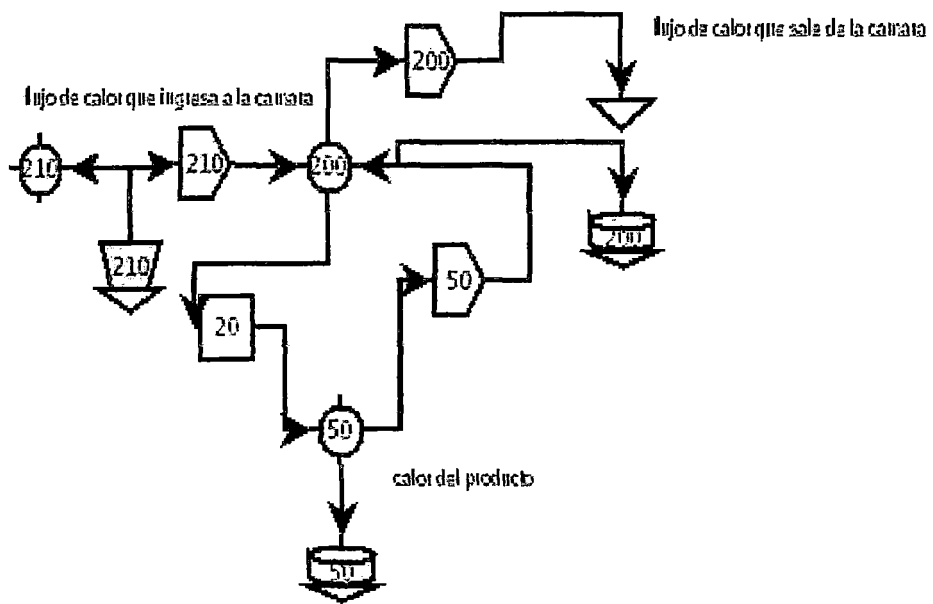










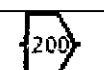
Símbolo	Representación
	Fuente de humedad en el aire que ingresa a la cámara.
	Humedad del aire que ingresa a la cámara.
	Flujo de aire con humedad que entra a la cámara
	Transferencia de masa por difusión entre la manzana y el aire circundante.
	Humedad en la manzana.
	Fuente de humedad en la manzana.
	Mezcla de humedad del aire que ingresa a la cámara y el liberado por la manzana.
	Acumulador de la mezcla de humedad.
	Flujo de la mezcla de humedad que sale al exterior de la cámara.
	Nodo de cero grados absoluto que representa el exterior de la cámara.

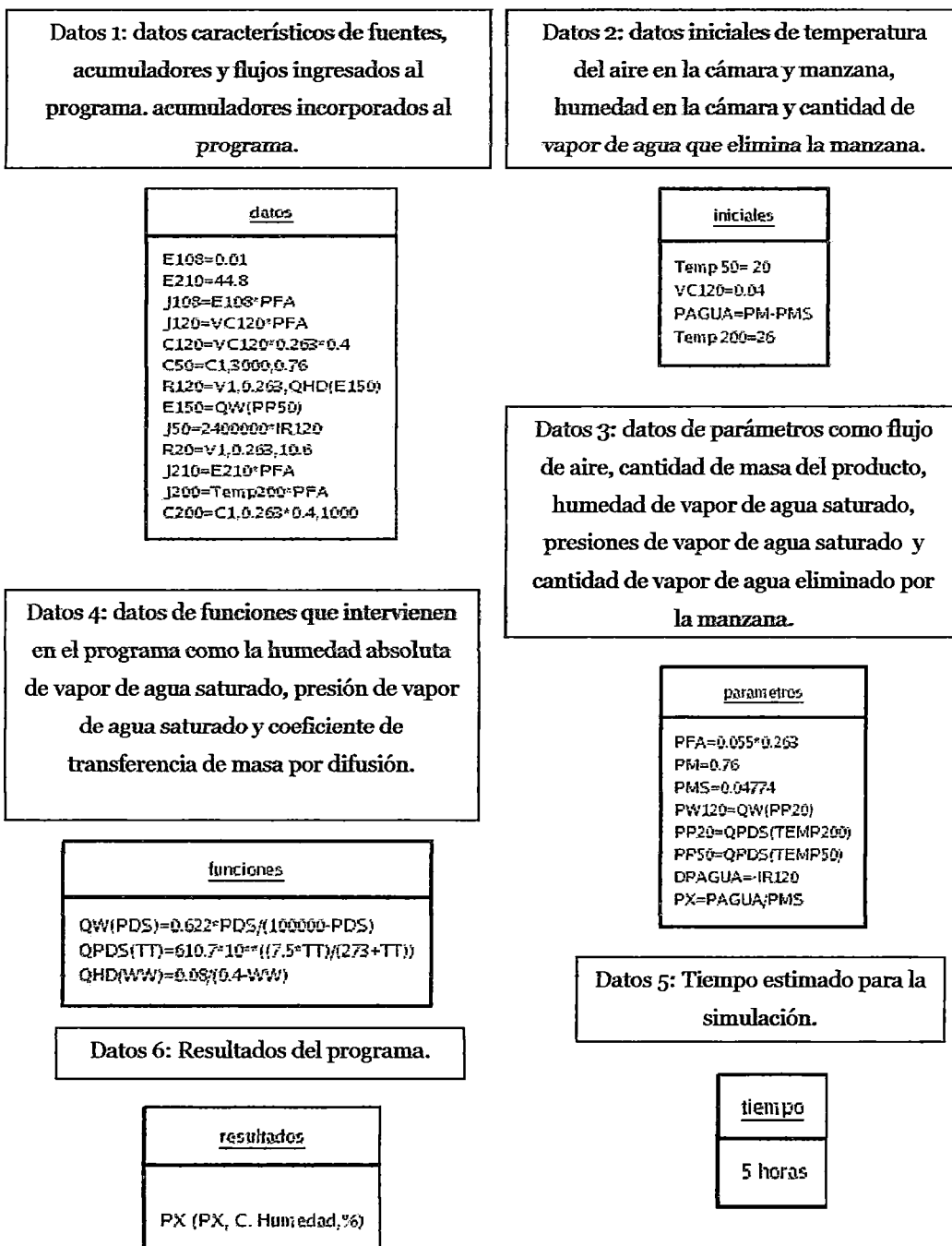
Figura 3.14: Circuito de simulación térmico



**Cuadro 3: Interpretación de elementos del circuito de simulación
térmico**

Símbolo	Representación
	Temperatura del aire que ingresa a la cámara.
	Fuente de temperatura en el aire que ingresa a la cámara.
	Flujo de calor que transporta una cantidad de aire por área.
	Temperatura de aire en la cámara.
	Acumulador de calor sensible en la manzana.
	Temperatura de la manzana.
	Transferencia de calor por convección entre la manzana y el aire circundante.
	Flujo de calor por transporte de vapor de agua eliminado por la manzana (depende de la resistencia R120).
	Acumulador de calor sensible en la cámara.
	Flujo de calor por transporte de la mezcla de aire y vapor de agua que sale al exterior de la cámara.
	Nodo de cero grados absoluto que representa el exterior de la cámara.

Los datos ingresados al programa SIMUSOL, son los siguientes:



Nota: Los datos incorporados en este programa de simulación son para el primer día de secado de forma similar en los subsiguientes días.

CAPITULO IV:

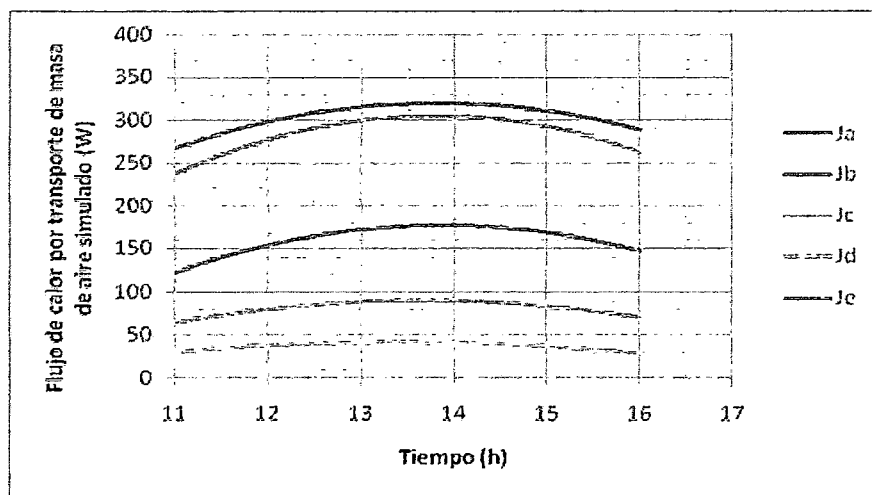
ANÁLISIS DE RESULTADOS É INTERPRETACIÓN

DE RESULTADOS

1. RESULTADOS DE LA FASE DE SIMULACIÓN

1.1. Resultados del circuito de simulación del flujo de calor

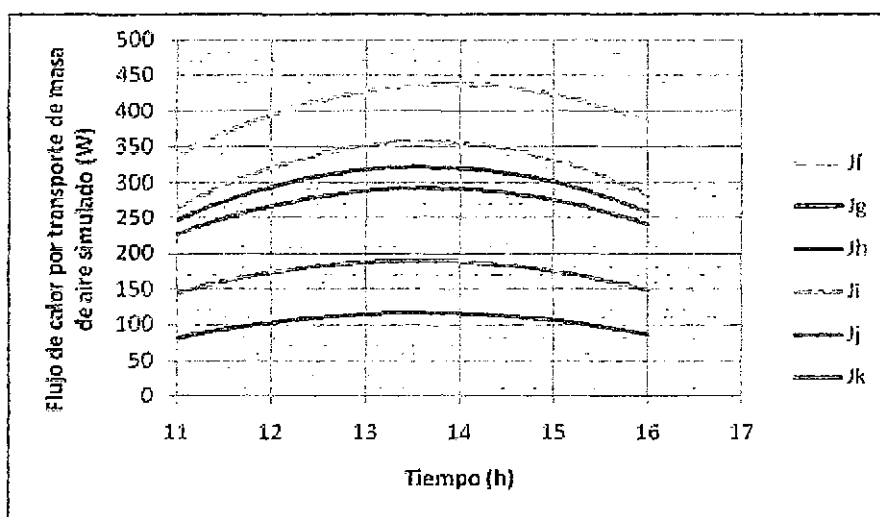
1.1.1. Resultados de la simulación del flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector del secador



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en el colector del secador solar. Los flujos de calor para los puntos evaluados “a”, “b”, “c”, “d” y “e” al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas, estos flujos de calor son 276W; 128,4W; 68,3W; 32,4W; 247,5W. Los resultados de la simulación indica un comportamiento similar al experimental.

La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.2. Resultados de la simulación del flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador

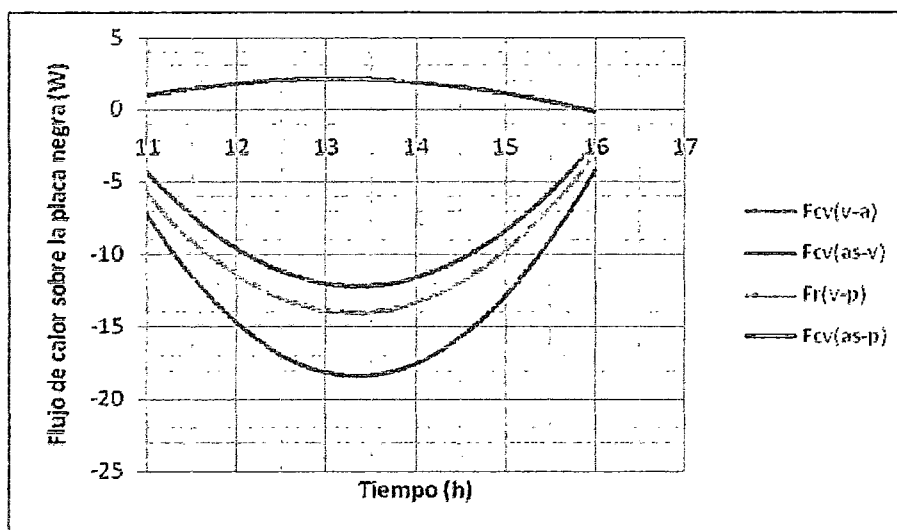


En estos gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en la cámara y chimenea del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados “f”, “g”, “h”, “i”, “j” y “k” al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son 337,2W; 237,1W; 227,9W; 265,2W; 80,4W; 147W.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.3. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales del colector del secador

1.1.3.1. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales sobre la placa negra



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en el colector sobre la placa negra del secador solar, los flujos de calor evaluados son:

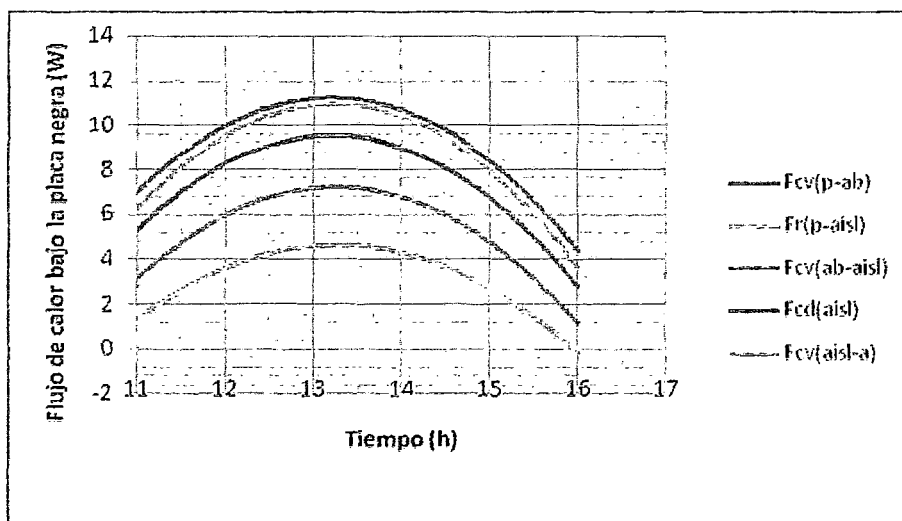
- $F_{cv}(v-a)$: flujo de calor por convección entre el vidrio y aire que circula por fuera a temperatura ambiente, en este caso existe una pérdida de calor del vidrio hacia el ambiente.
- $F_{cv}(as-v)$: flujo de calor por convección entre el aire que circula sobre la placa negra y el vidrio, en el gráfico se puede notar que existe un descenso poco pronunciado ya que ambos puntos se encuentran en similares temperaturas.
- $Fr(v-p)$: flujo de calor por radiación entre el vidrio y placa negra, en el gráfico se muestra una pérdida de calor por parte de la placa negra hacia el vidrio.

- $F_{cv}(as-p)$: flujo de calor por convección entre la placa negra y el aire que circula por encima de ella, en este caso la pérdida de calor es más pronunciada que los demás debido a que el aire se encuentra en contacto directo con la placa negra.

Los flujos de calor al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son $-3W$; $0,75W$; $-4,2W$; $-4,9W$.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.3.2. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales bajo la placa negra



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en el colector bajo la placa negra del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados son:

- Fcv(p-ab): flujo de calor por convección entre la placa negra y el aire que circula bajo esta, donde se puede notar que hay una notable ganancia por parte del aire siendo calentada a medida que pasa el tiempo.
- Fr(p-aisl): flujo de calor por radiación entre la placa negra y el aislante, en el gráfico se puede observar que existe una ganancia de calor por parte del aislante.
- Fcv(ab-aisl): flujo de calor por convección entre el aire que circula por debajo de la placa negra y el aislante, en el gráfico se hace notar una ganancia de calor por parte del aislante.
- Fcd(aisl): flujo de calor por conducción en el aislante, aquí se observa que existen pérdidas notables de calor.

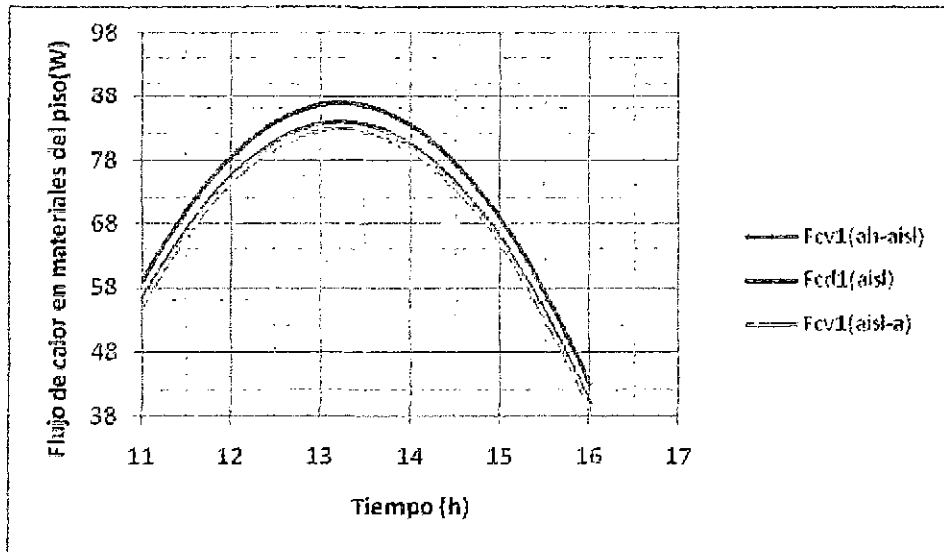
- $F_{cv}(aisl-a)$: flujo de calor por convección entre el aislante y el aire a temperatura ambiente, se observa una ganancia de calor por parte del aire que circula por fuera del colector.

Los flujos de calor simulados al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son 5,4W; 0,8W; 2,9W; 6,2W; 5,8W.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.4. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales de la cámara del secador

1.1.4.1. Resultados de la simulación del flujo de calor en materiales del piso



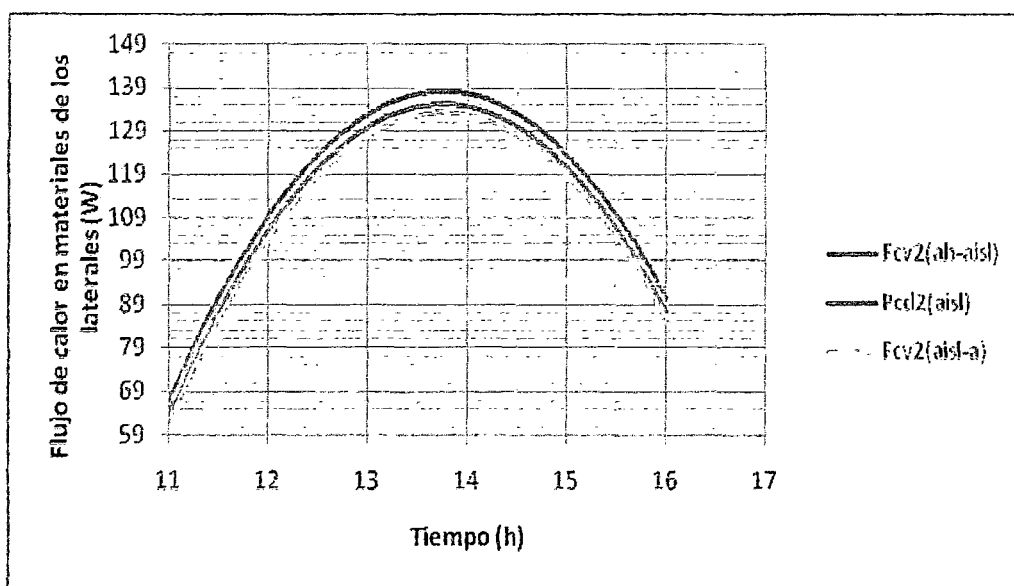
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en el piso de la cámara del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados son:

- Fcv1(ah-aisl): flujo de calor por convección entre el aire húmedo y el aislante, en el gráfico se observa una notable ganancia de calor por parte del aislante.
- Fcd1(aisl): flujo de calor por conducción en el aislante, en el gráfico se muestra una ganancia de calor relativamente menor.
- Fcv1(aisl-a): flujo de calor por convección entre el aislante y el aire que circula por fuera a temperatura ambiente, en el gráfico se muestra un comportamiento de ganancia de calor por parte del aire a temperatura ambiente.

Los flujos de calor al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son 53,9W; 50,9W; 49,9W.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.4.2. Resultados del flujo de calor en materiales de los laterales



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en los laterales de la cámara del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados son:

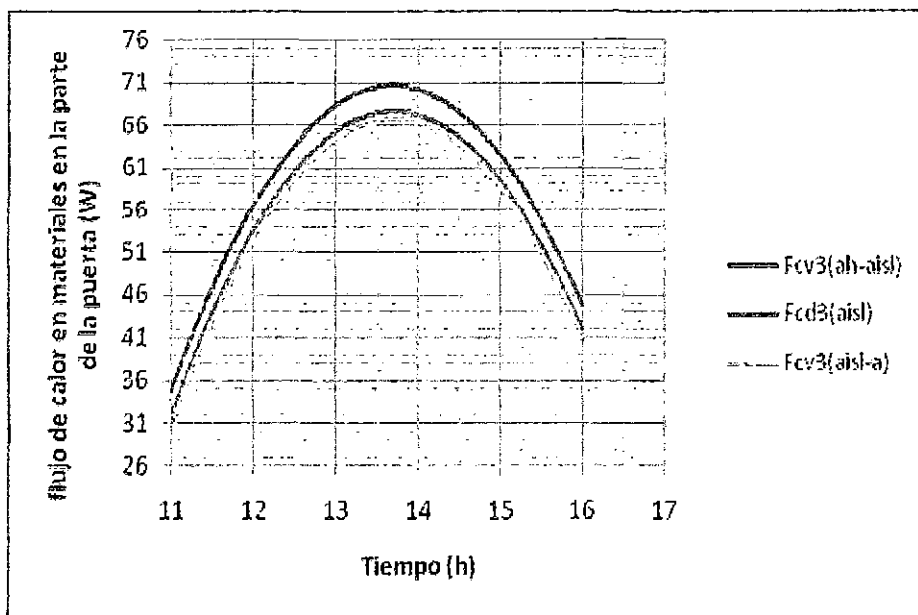
- Fcv2(ah-aisl) flujo de calor por convección entre el aire húmedo y el aislante, en el gráfico se observa una notable ganancia de calor por parte del aislante.

- $F_{cd2}(\text{aisl})$ flujo de calor por conducción en el aislante, en el gráfico se muestra una ganancia de calor relativamente menor.
- $F_{cv2}(\text{aisl-a})$ flujo de calor por convección entre el aislante y el aire a temperatura ambiente, en el gráfico se muestra un comportamiento de ganancia de calor por parte del aire a temperatura ambiente.

Los flujos de calor al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son 56,7W; 53,7W; 51,7W.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a la tercera hora que corresponde a las 14 horas.

1.1.4.3. Resultados del flujo de calor en materiales de la puerta



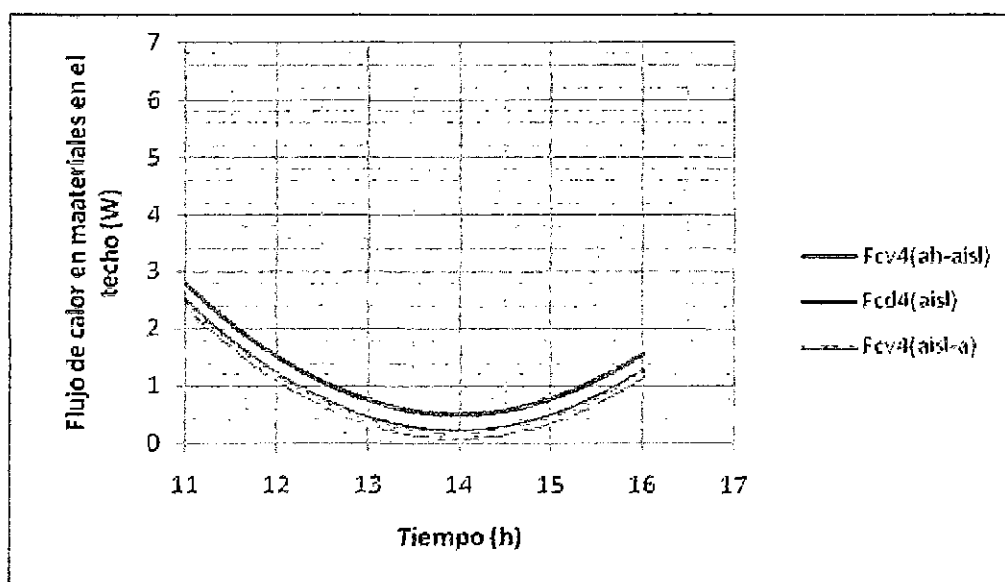
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en la parte frontal de la cámara del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados son:

- Fcv3(ah-aisl) flujo de calor por convección entre el aire húmedo y el aislante, en el gráfico se observa una notable ganancia de calor por parte del aislante.
- Fcd3(aisl) flujo de calor por conducción en el aislante, en el gráfico se muestra una ganancia de calor relativamente menor.
- Fcv3(aisl-a) flujo de calor por convección entre el aislante y el aire a temperatura ambiente, en el gráfico se muestra un comportamiento de ganancia de calor por parte del aire a temperatura ambiente.

Los flujos de calor al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son 30W; 27W; 26W.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.4.4. Resultados del flujo de calor en materiales del techo



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en el techo de la cámara del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados son:

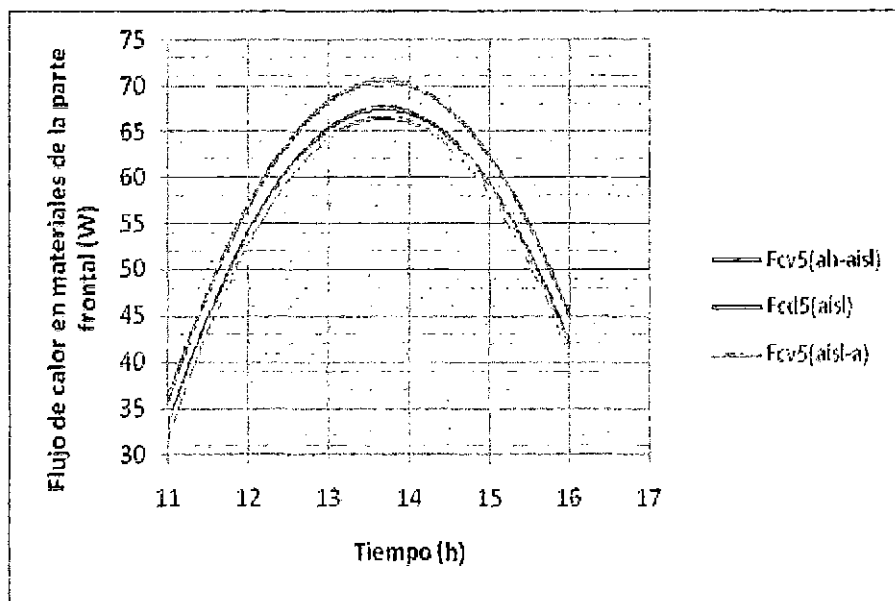
- $F_{cv4}(ah-aisl)$ flujo de calor por convección entre el aire húmedo y el aislante, en el gráfico se observa una notable ganancia de calor por parte del aislante.
- $F_{cd4}(aisl)$ flujo de calor por conducción en el aislante, en el gráfico se muestra una ganancia de calor relativamente menor.
- $F_{cv4}(aisl-a)$ flujo de calor por convección entre el aislante y el aire a temperatura ambiente, en el gráfico se muestra un

comportamiento de ganancia de calor por parte del aire a temperatura ambiente.

Los flujos de calor al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son 3,3W; 3W; 2,9W.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.4.5. Resultados del flujo de calor en materiales de la parte frontal



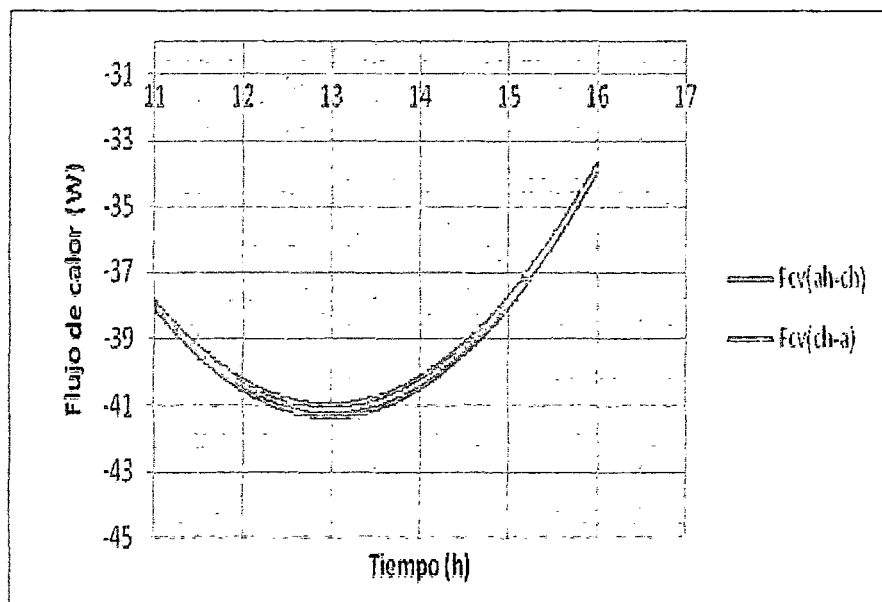
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en la parte frontal de la cámara del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados son:

- $F_{cv5}(ah-aisl)$ flujo de calor por convección entre el aire húmedo y el aislante, en el gráfico se observa una notable ganancia de calor por parte del aislante.
- $F_{cd5}(aisl)$ flujo de calor por conducción en el aislante, en el gráfico se muestra una ganancia de calor relativamente menor.
- $F_{cv5}(aisl-a)$ flujo de calor por convección entre el aislante y el aire a temperatura ambiente, en el gráfico se muestra un comportamiento de ganancia de calor por parte del aire a temperatura ambiente.

Los flujos de calor al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son 31,4W; 28,4W; 27,4W.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.5. Resultados del flujo de calor en materiales de la chimenea del secador



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado en la chimenea del secador solar, los flujos de calor para los puntos evaluados son:

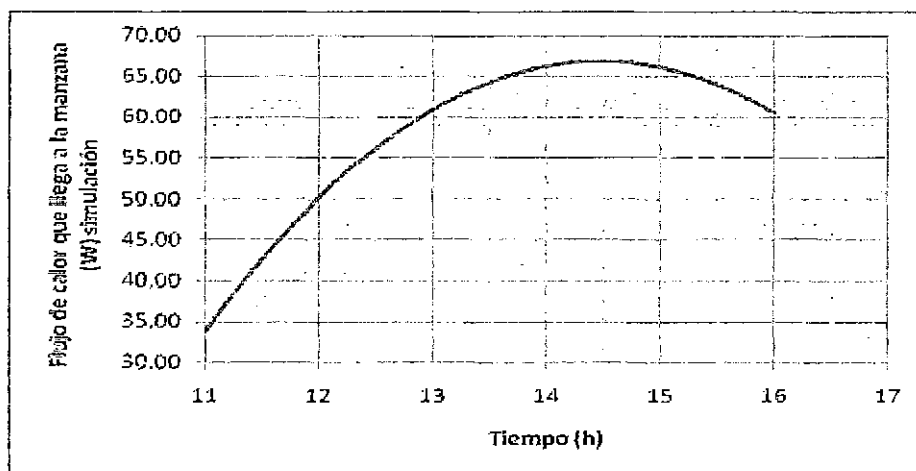
- $f_{cv}(ah-ch)$ flujo de calor por convección entre el aire húmedo y las paredes de la chimenea, en el gráfico se observa una pérdida de calor poco pronunciado del aire que fluye por medio de la chimenea.

- $F_{cv}(ch-a)$ flujo de calor por convección entre la chimenea y el aire que circula por fuera a temperatura ambiente, se observa que existe una ganancia de calor por parte de la chimenea ya que se le llega la radiación solar y la caliente.

Los flujos de calor al inicio son las mismas que el experimental ya que el programa Simusol lo requiere para poder reproducirlo en las siguientes horas estos flujos de calor son $-38,7W$; $-38,5W$.

Los resultados de la simulación indican un comportamiento similar al experimental. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo de calor obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos de calor a las 14 horas.

1.1.6. Resultados del flujo de calor que llega a la manzana

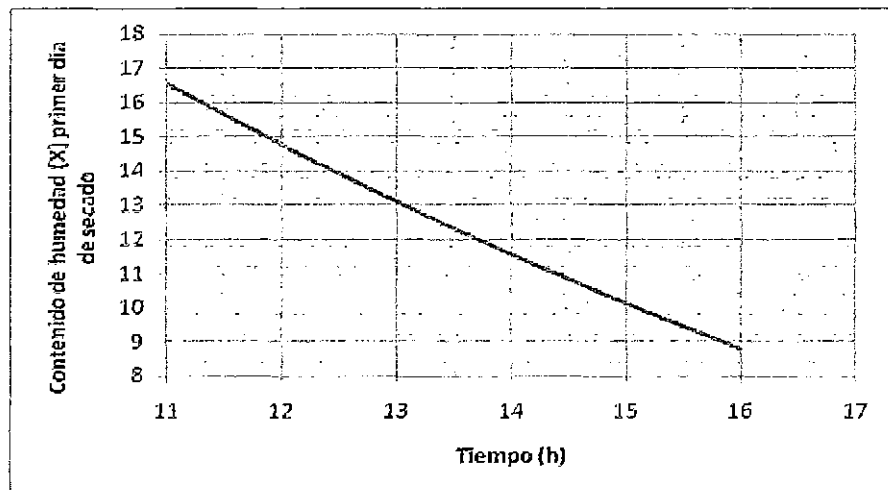


En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado del flujo de calor, que llega a la primera bandeja de rodajas de manzana; en este caso se puede observar que el flujo de calor por convección es ascendente debido al aire seco caliente que ingresa a la cámara y se encuentra con la bandeja que contiene la

manzana, luego desciende debido a la caída de temperatura por la tarde.

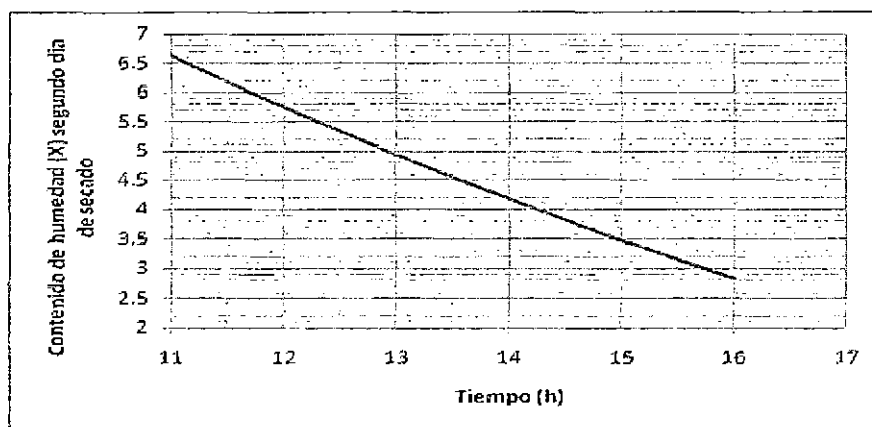
1.2. Resultado del circuito de simulación de la pérdida de humedad de la manzana

1.2.1. Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado



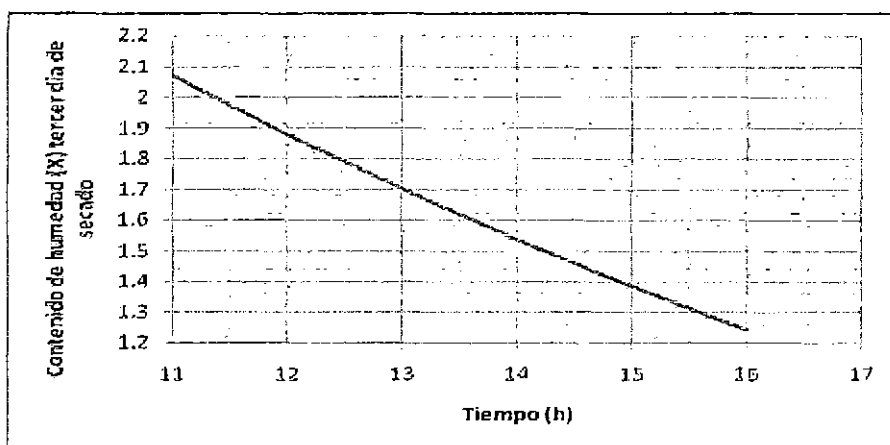
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde la curva es descendente debido a la disminución de agua en el producto.

1.2.2. Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado



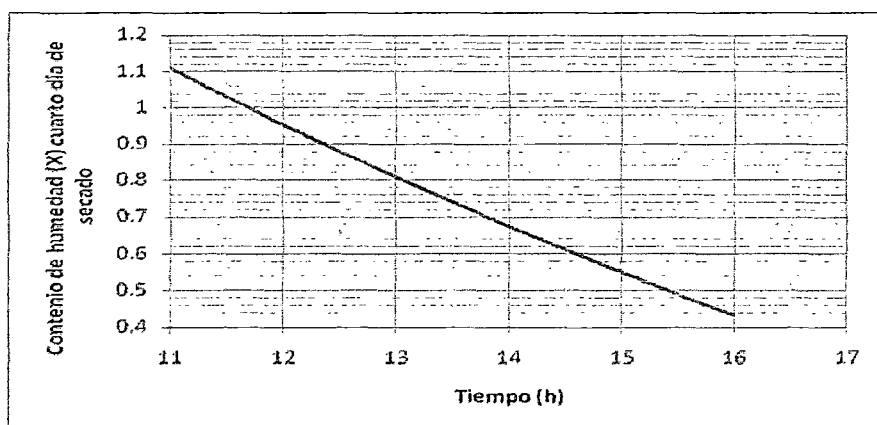
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el segundo día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde la curva es descendente debido a la disminución de agua en el producto.

1.2.3. Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado



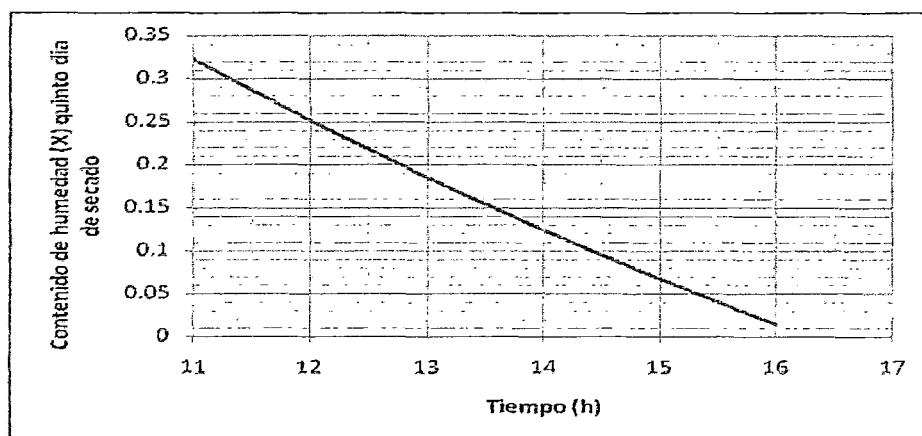
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el tercer día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde la curva es descendente debido a la disminución de agua en el producto.

1.2.4. Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el cuarto día de secado



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el cuarto día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde la curva es descendente debido a la disminución de agua en el producto.

1.2.5. Resultados de simulación de la pérdida de humedad de la manzana en el quinto día de secado



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el quinto día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde la curva es descendente debido a la disminución de agua en el producto.

2. RESULTADOS DE LA FASE DE LABORATORIO

2.1. Determinación de la cantidad de humedad de la manzana

2.1.1. Tabulación de datos

- Masa del producto: 3,116gr.
- Masa del producto seco: 0.468gr.

2.1.2. Cálculo y Resultados

- Contenido de humedad en base húmeda (M):

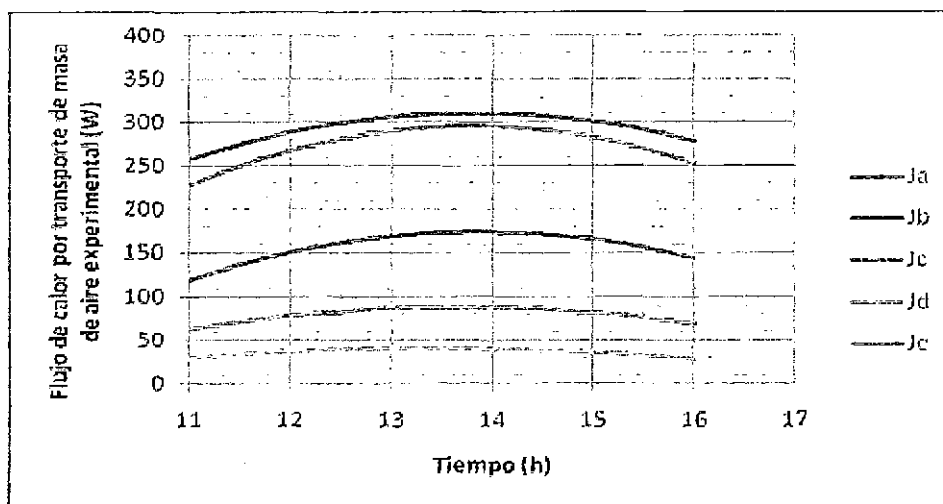
$$M = \frac{m - m_s}{m} = \frac{3,116gr - 0,468gr}{3,116gr} = 0,85$$

- Contenido de humedad en base seca (X):

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} = \frac{3,116gr - 0,468gr}{0,468gr} = 5,66$$

2.2. Resultado experimental del flujo de calor

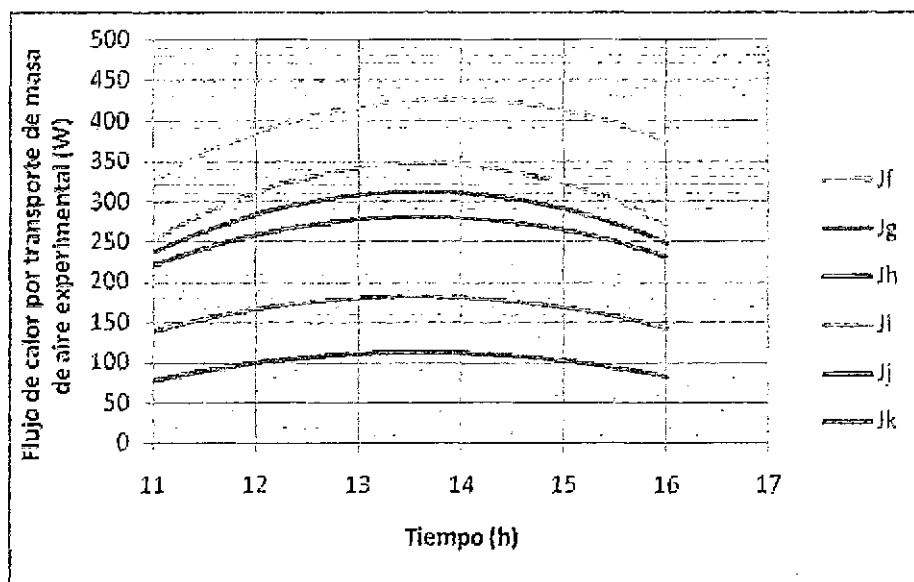
2.2.1. Resultado experimental flujo de Calor por transporte de masa de aire en el colector del secador tipo cabina



En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire en cada punto del colector del secador para el primer día de secado. Los flujos de calor por transporte de masa de aire en los puntos “a”, “b”, “c” y “d” que son puntos sobre las placas negras se van disminuyendo consecutivamente a medida que ingresa el aire al colector esto se encuentra inicialmente a 266W en el punto “a” luego 125,4W en el punto “b”, 66,3W en el punto “c”, 31,4W en el punto “d” llegando finalmente al punto “e” que es el flujo de calor del aire al final del colector y bajo las placas negras a 237,5W. Con estos flujos de calor ingresa el aire a la cámara donde se aloja el producto a secar. Todos estos flujos de calor por transporte de masa de aire son altas a comparación con el flujo de calor del aire a temperatura ambiente. La forma de las curvas en el gráfico para cada flujo obedece generalmente a la intensidad de la radiación durante el día, teniendo los máximos flujos a la tercera hora que corresponde a las 14 horas.

Las variaciones del flujo de calor por transporte de masa de aire se repiten en los posteriores días, puesto que se ha trabajado en las mismas condiciones para realizar las comparaciones respectivas.

2.2.2. Resultado experimental del flujo de Calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador



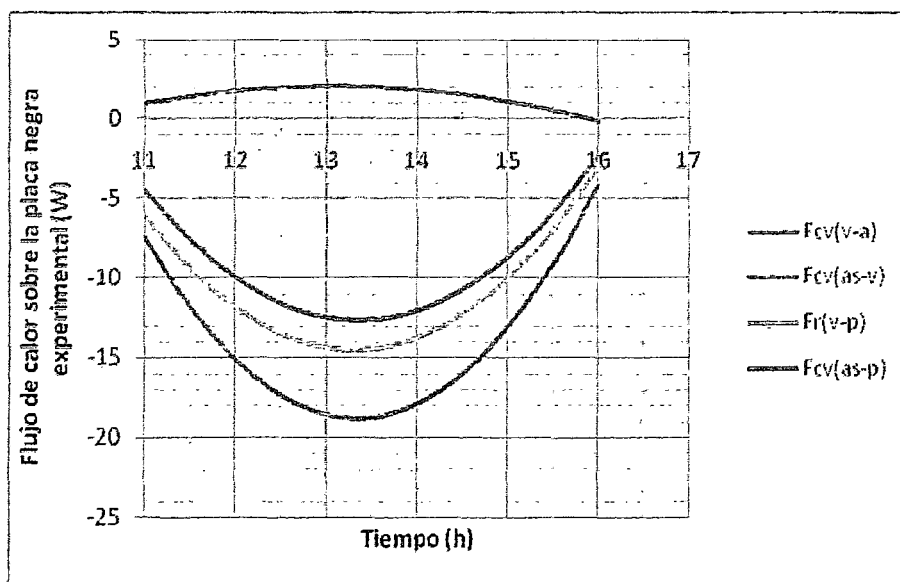
En estos gráficos se observa el comportamiento experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire más vapor de agua en los puntos “f”, “g”, “h” y “i” de la cámara del secador para el primer día de secado. Considerando los datos iniciales de la evaluación se observa que el aire seco ingresa a la cámara, pasando por el punto “f” a un flujo relativamente alta de 337,2W y por acción de la convección natural de un fluido cuando es sometido a calor, el flujo más caliente tiende a subir y el flujo mas frio tiende a bajar, es por esta razón que el aire sube pasando por los siguiente puntos “g”, “h”, “i”, “j” y “k”. Se ha observado que en los punto “g”, “h” donde baja el flujo de calor por presencia de vapor de agua desprendido de la manzana

deshidratada, teniendo los flujos de calor respectivamente a la cual se inicia el secado de 237,1W y 227,9W. Luego el aire húmedo sigue fluyendo por los puntos “i” y “j” donde éste se calienta nuevamente a 265,2W y 80,4W por estar cerca del techo caliente de la cámara, por ultimo escapa esta masa de aire con vapor de agua por la chimenea al medio ambiente pasando por el punto “k” registrándose los flujos de calor del aire húmedo que fluye a 147W por contacto con las paredes de la chimenea.

Las causas de las variaciones del flujo de calor por transporte de masa de aire se repiten en los posteriores días, puesto que se ha trabajado en las mismas condiciones para realizar las comparaciones respectivas.

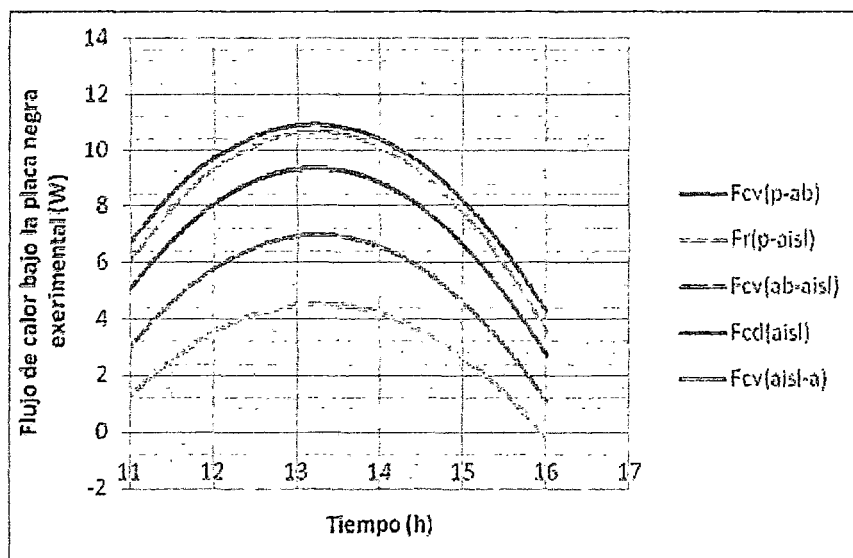
2.2.3. Resultado experimental del flujo de calor en materiales del colector del secador

2.2.3.1. Resultado experimental del flujo de calor en materiales sobre la placa negra



En estos gráficos se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en los materiales sobre la placa negra, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen Fcv(v-a): -3,1W; Fcv(as-v): 0,7W; Fr(as-v):-4,3W; Fcv(as-p):-5W. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

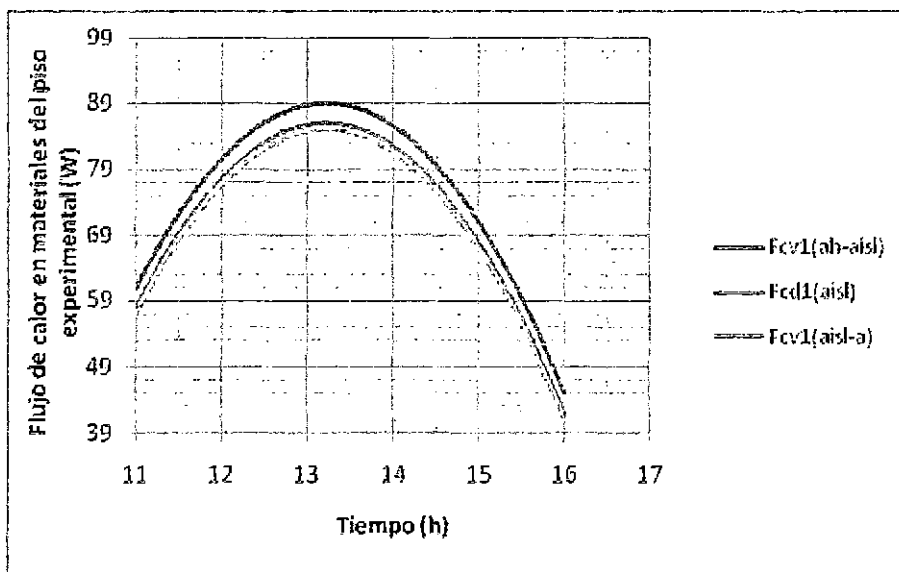
2.2.3.2. Resultado experimental del flujo de calor en materiales bajo la placa negra



En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en los materiales sobre la placa negra, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen $F_{cv}(aisl-a)$: 5,2W; $F_r(p-aisl)$: 0,8W; $F_{cv}(ab-aisl)$:2,9W; $F_{cd}(aisl)$:6,2W; $F_{cv}(p-ab)$:5,8W. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

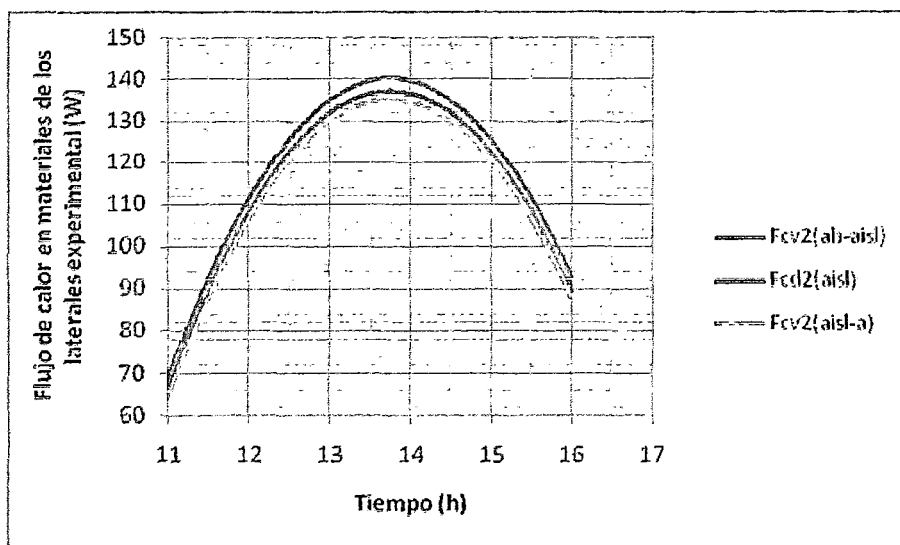
2.2.4. Resultado experimental del flujo de calor en materiales de la cámara del secador

2.2.4.1. Resultado experimental del flujo de calor en materiales del piso



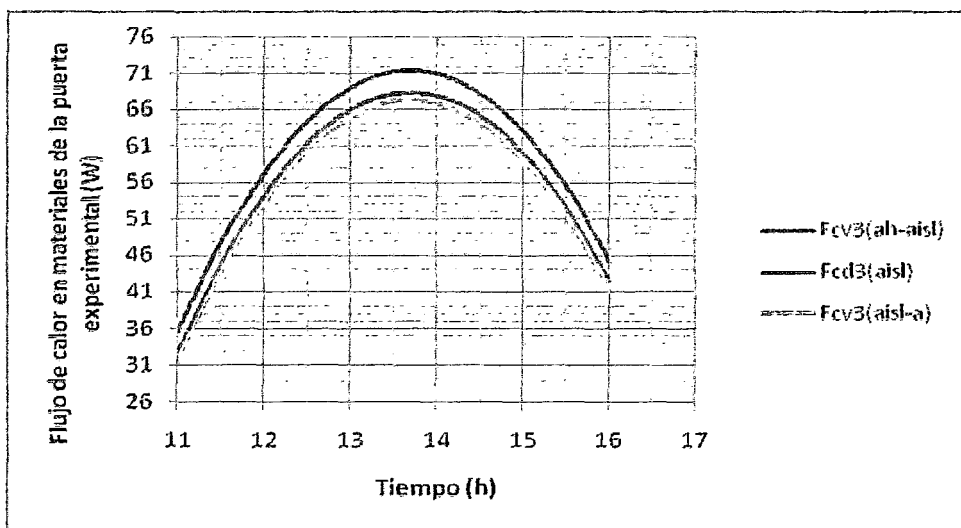
En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en el piso de la cámara, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen Fcv1(ab-aisl):55,9W; Fcd1(aisl):52,9W; Fcv1(aisl-a):51,9W. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

2.2.4.2. Resultado experimental del flujo de calor en materiales de los laterales



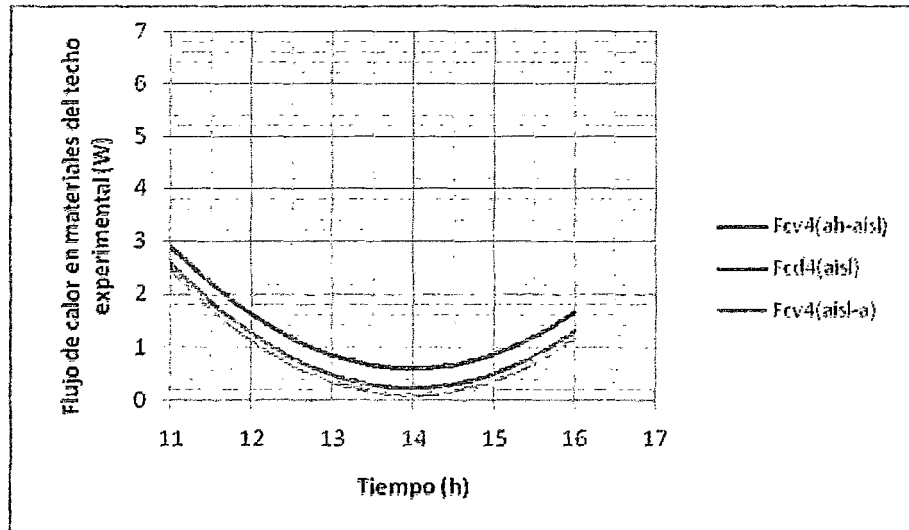
En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en los materiales en los laterales de la cámara, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen $F_{cv2}(ah-aisl):58,7W$; $F_{cd2}(aisl):55,7W$; $F_{cv2}(aisl-a):53,7W$. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

2.2.4.3. Resultado experimental del flujo de calor en materiales de la puerta



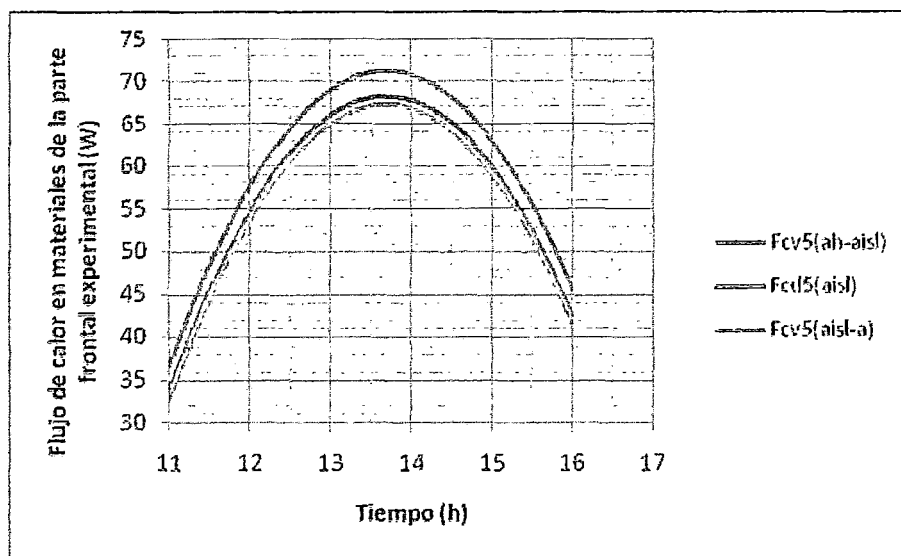
En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en los materiales de la puerta de la cámara, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen $F_{cv3(ah-aisl)}:30,7W$; $F_{cd3(aisl)}:27,7W$; $F_{cv3(aisl-a)}:26,7W$. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

2.2.4.4. Resultado experimental del flujo de calor en materiales del techo



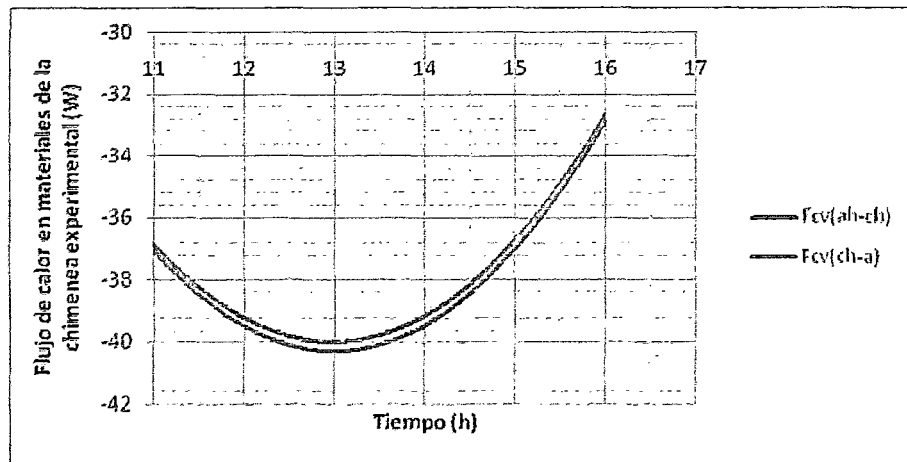
En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en los materiales del techo de la cámara, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen $F_{cv4}(ah-aisl):3,3W$; $F_{cd4}(aisl):3W$; $F_{cv4}(aisl-a):2,9W$. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

2.2.4.5. Resultado experimental del flujo de calor en materiales de la parte frontal



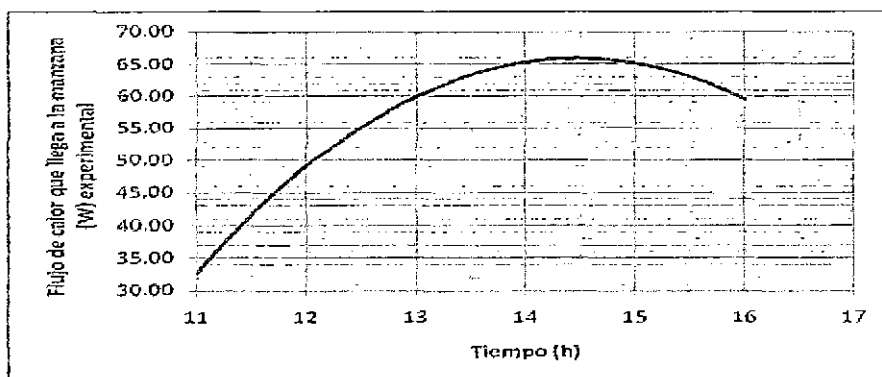
En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en los materiales en la parte frontal de la cámara, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen $F_{cv5(ah-aisl)}:32,1W$; $F_{cd5(aisl)}:29,1W$; $F_{cv5(aisl-a)}:28,1W$. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

2.2.5. Resultado experimental del flujo de calor en materiales de la chimenea del secador



En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor en los materiales de la chimenea del secador, este gráfico al inicio los valores para cada punto considerado son los que siguen $F_{cv}(ah-ch)$: -37,7W; $F_{cv}(ch-a)$: -37,5W. Estos resultados experimentales muestran similitud con respecto al simulado.

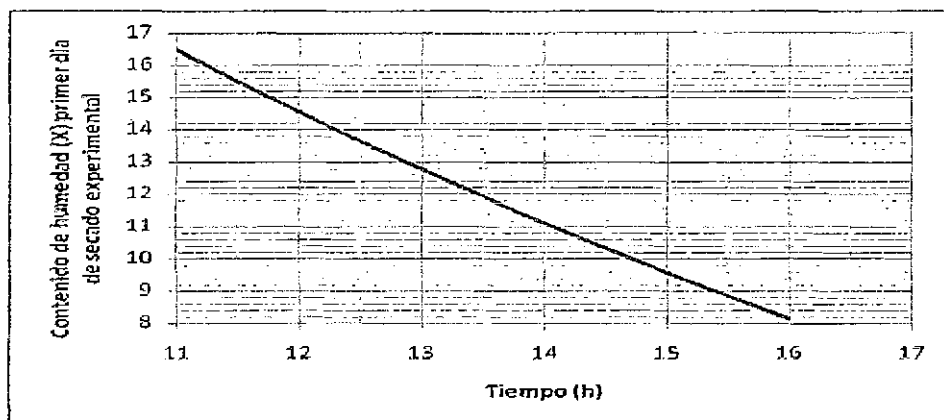
2.2.6. Resultado experimental del flujo de Calor que llega a la manzana



En este gráfico se observa el comportamiento experimental del flujo de calor que llega a la primera bandera de manzana que es similar al simulado.

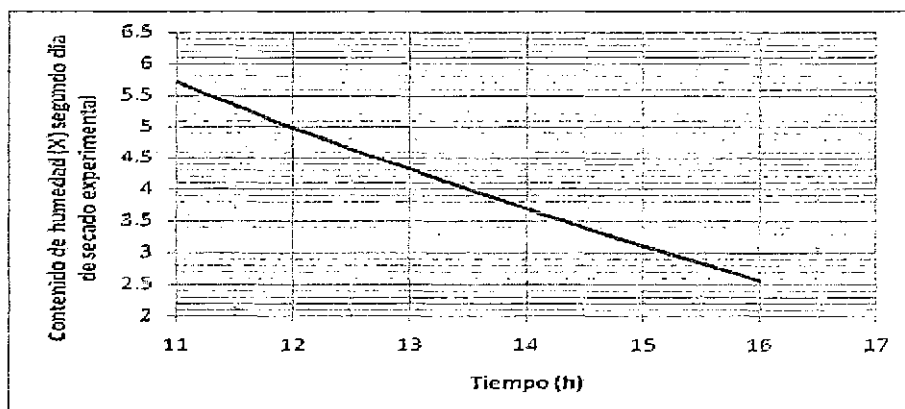
2.3. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana

2.3.1. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado



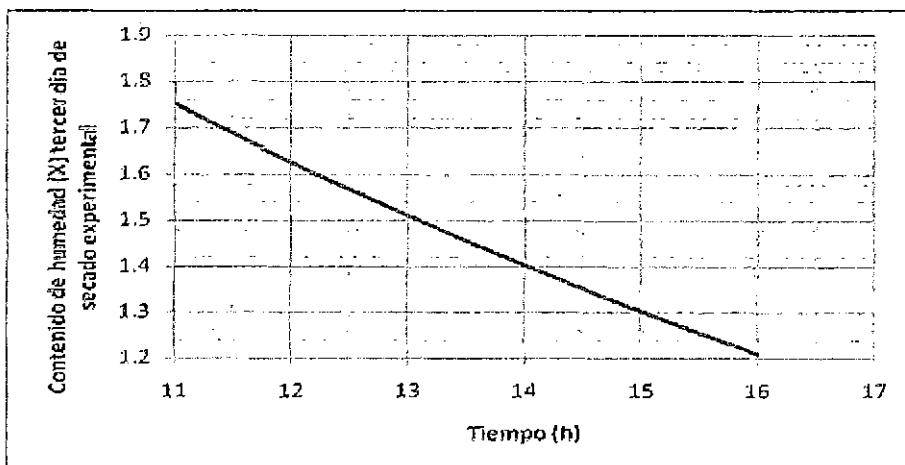
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el primer día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde se observa que es similar al resultado simulado.

2.3.2. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado



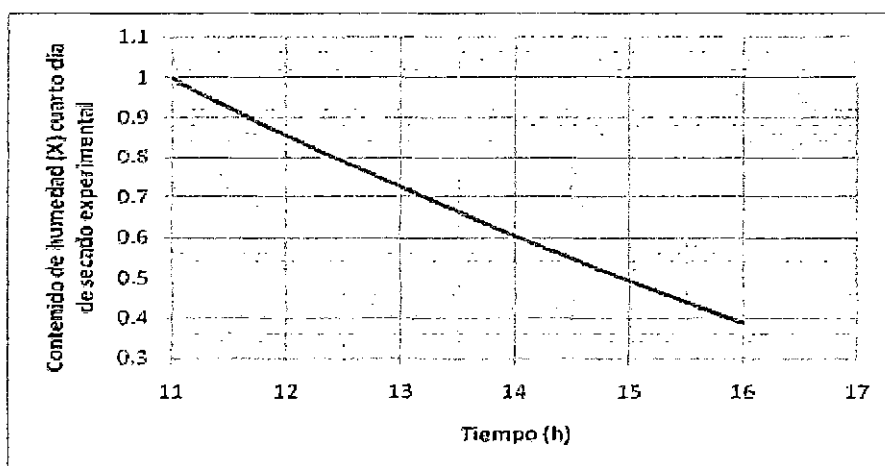
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el segundo día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde se observa que es similar al resultado simulado.

2.3.3. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado



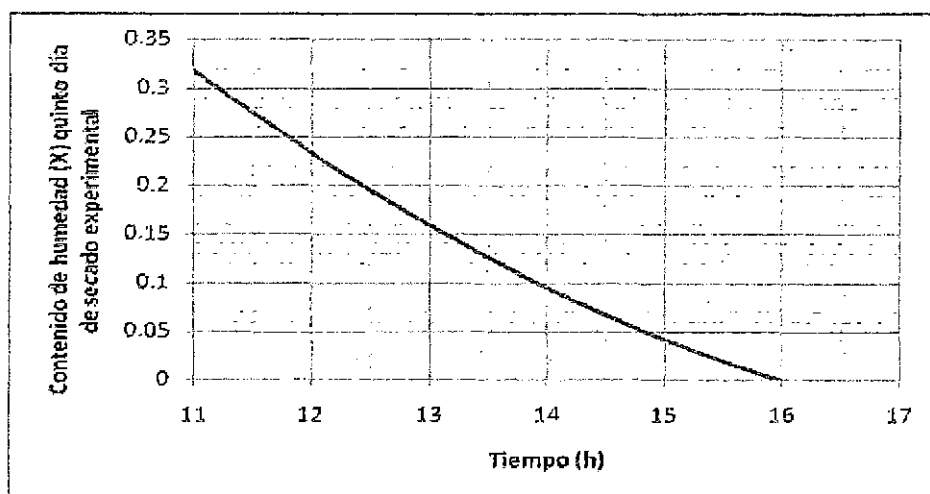
En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el tercer día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde se observa que es similar al resultado simulado.

2.3.4. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el cuarto día de secado



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el cuarto día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde se observa que es similar al resultado simulado.

2.3.5. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el quinto día de secado



En este gráfico se observa el resultado de la simulación para el quinto día de secado del contenido de humedad en base seca de la manzana donde se observa que es similar al resultado simulado.

3. PORCENTAJE DE ERROR EN LA COMPARACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON LA SIMULADA

3.1. Flujo de calor por transporte de masa de aire del secador

Hora	Flujo de calor por transporte de masa de aire (W)									
	Colector					Cámara				
	Ja	Jb	Jc	Jd	Je	Jf	Jg	Jh	Ji	Jj
11:00	3.62%	2.34%	2.93%	3.08%	4.04%	2.88%	4.05%	2.15%	3.63%	3.60%
12:00	3.53%	2.19%	2.77%	2.94%	3.82%	2.69%	3.38%	3.94%	3.41%	3.08%
13:00	3.22%	1.66%	2.20%	2.32%	3.43%	2.27%	3.20%	3.39%	2.76%	2.61%
14:00	2.91%	1.63%	2.12%	2.22%	3.07%	2.24%	3.02%	3.39%	2.67%	2.42%
15:00	3.36%	1.85%	2.44%	2.99%	3.46%	2.42%	3.42%	3.66%	3.19%	3.05%
16:00	3.45%	2.03%	2.84%	3.33%	3.85%	2.58%	3.82%	4.15%	3.49%	3.41%

Hora	Flujo de calor por transporte de masa de aire (W)
	Chimenea
	Jk
11:00	3.29%
12:00	4.28%
13:00	3.91%
14:00	3.49%
15:00	3.89%
16:00	3.50%

3.2. Flujo de calor en materiales del colector del secador

Hora	Porcentaje de error (%)			
	Flujo de calor sobre la placa negra			
	Fcv(v-a)	Fcv(as-v)	Fr(v-p)	Fcv(as-p)
11:00	3.34%	2.66%	2.37%	2.03%
12:00	3.35%	2.24%	3.54%	2.15%
13:00	3.51%	2.69%	3.74%	2.29%
14:00	3.21%	2.10%	3.35%	2.08%
15:00	7.06%	3.30%	1.86%	1.34%
16:00	2.73%	3.95%	1.90%	1.44%

Hora	Porcentaje de error (%)				
	Flujo de calor bajo la placa negra				
	Fcv(p-ab)	Fr(p-aisl)	Fcv(ab-aisl)	Fcd(aisl)	Fcv(aisl-a)
11:00	3.68%	1.30%	3.40%	3.23%	1.71%
12:00	2.94%	2.20%	3.07%	2.67%	2.97%
13:00	2.53%	2.36%	3.02%	2.76%	2.80%
14:00	1.09%	2.07%	2.97%	2.61%	2.66%
15:00	1.85%	3.43%	3.97%	3.14%	1.58%
16:00	2.04%	2.18%	2.89%	1.86%	2.31%

3.3. Flujo de calor en materiales de la cámara del secador

Hora	Porcentaje de error (%)								
	Fcv1 (ah-aisl)	Fcd1 (aisl)	Fcv1 (aisl-a)	Fcv2 (ah-aisl)	Fcd2 (aisl)	Fcv2 (aisl-a)	Fcv3 (ah-aisl)	Fcd3 (aisl)	Fcv3 (aisl-a)
11:00	3.71%	3.93%	4.01%	3.53%	3.73%	3.87%	3.08%	2.72%	2.11%
12:00	2.34%	2.43%	2.46%	1.59%	1.63%	1.66%	12.18%	5.76%	2.37%
13:00	2.25%	2.33%	2.35%	1.46%	1.50%	1.52%	16.41%	9.69%	2.86%
14:00	2.33%	2.42%	2.45%	1.48%	1.52%	1.54%	12.95%	6.36%	2.69%
15:00	3.61%	3.82%	3.89%	1.88%	1.94%	1.97%	7.76%	3.04%	1.13%
16:00	3.97%	4.22%	4.31%	1.97%	2.03%	2.08%	8.42%	3.38%	1.27%

Hora	Porcentaje de error (%)					
	Fcv4 (ah-aisl)	Fcd4 (aisl)	Fcv4 (aisl-a)	Fcv5 (ah-aisl)	Fcd5 (aisl)	Fcv5 (aisl-a)
11:00	2.33%	2.59%	2.69%	2.23%	2.46%	2.55%
12:00	1.09%	1.14%	1.16%	1.09%	1.14%	1.16%
13:00	1.01%	1.05%	1.07%	1.01%	1.05%	1.07%
14:00	1.01%	1.08%	1.08%	1.01%	1.06%	1.07%
15:00	1.28%	1.35%	1.38%	1.28%	1.35%	1.38%
16:00	1.41%	1.50%	1.53%	1.41%	1.50%	1.53%

3.4. Flujo de calor en materiales de la chimenea del secador

Hora	Porcentaje de error (%)	
	Fcv (ah-ch)	Fcv(ch-a)
11:00	2.58%	2.60%
12:00	2.53%	2.55%
13:00	2.46%	2.48%
14:00	2.38%	2.40%
15:00	2.65%	2.67%
16:00	2.97%	2.99%

3.5. Flujo de calor que llega a la manzana

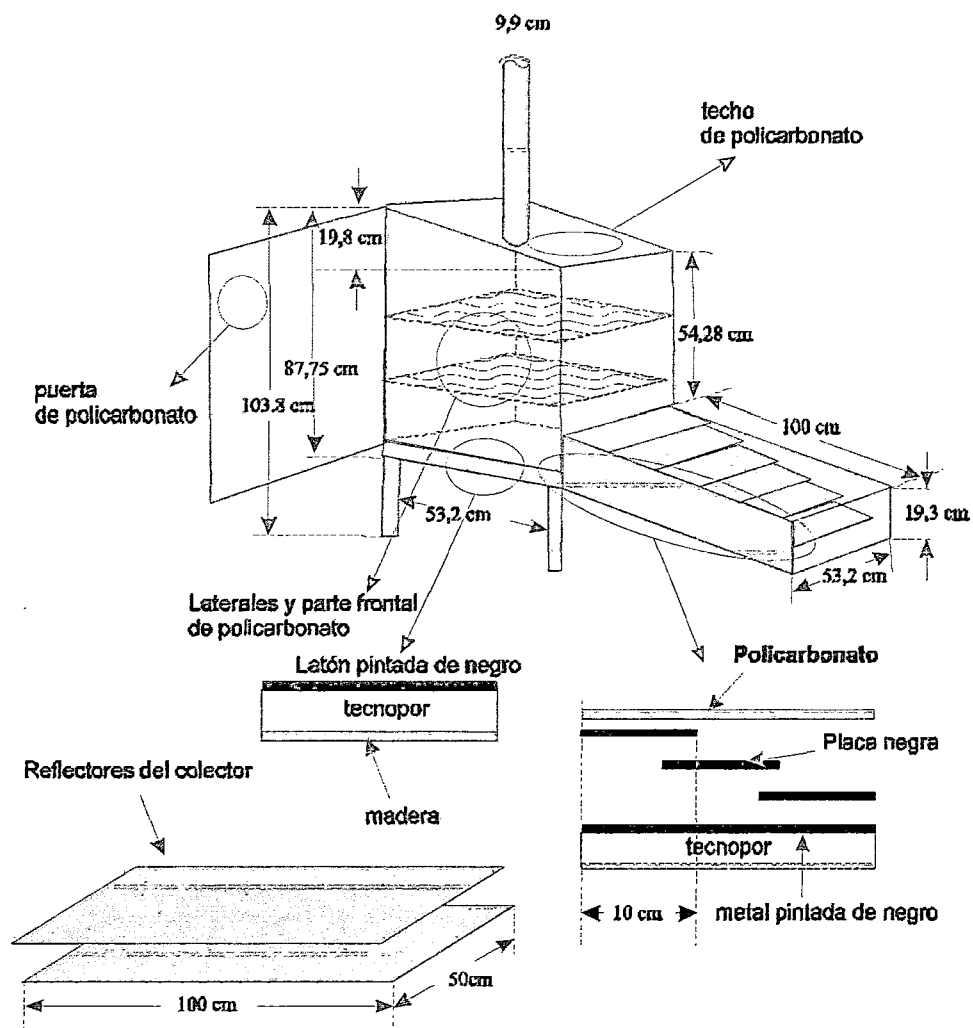
Hora	Porcentaje de error (%)
11:00	3.54%
12:00	1.67%
13:00	1.64%
14:00	1.62%
15:00	1.59%
16:00	1.57%

La variación porcentual entre el proceso experimental y el simulado es aceptable, puesto que mayormente la diferencia es inferior al 5 % .

CAPITULO V:

MEJORAMIENTO DEL FLUJO DE CALOR EN EL SECADOR SOLAR TIPO CABINA

1. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SECADOR TIPO CABINA



2. DATOS INCORPORADOS AL PROGRAMA SIMUSOL PARA EL MEJORAMIENTO DEL FLUJO DE CALOR DEL SECADOR

Datos 1: datos característicos de acumuladores incorporados al programa.

Datos 2: datos característicos de resistencias térmicas conductivas incorporados al programa.

datos

C3=C1,1009.21,0.0506404
 C4=C1,300,0.238
 C5=C1,1007.17,0.0063641
 Ca=C1,1011.87,0.0104379
 C9=C1,300,0.238
 C10=C1,1007.43,0.0016833
 C15=C1,1012.53,0.0049858
 C16=C1,300,0.238
 C17=C1,1008.13,0.0081181
 Cb=C1,1013.22,0.0016711
 C23=C1,1008.89,0.0019187
 C27=C1,1010.96,0.0006026
 C29=C1,1009.76,0.0017872
 Cc=C1,1014.94,0.0003562
 C35=C1,1010.59,0.0016290
 C39=C1,1015.57,0.0002564
 C41=C1,1012.03,0.0014542
 Cd=C1,1016.22,0.0001648
 C47=C1,1012.56,0.001285
 C51=C1,1020.13,0.0012214
 C53=C1,1013.74,0.0011226
 C57=C1,1021.23,0.0003427
 Ce=C1,1014.86,0.0009664
 C34=C1,300,0.238
 C40=C1,300,0.238
 C46=C1,300,0.238
 C52=C1,300,0.238
 C58=C1,300,0.238
 C28=C1,300,0.238
 C22=C1,300,0.238
 Cf=C1,1034.78,0.0014143
 C63=C1,3770,0.4
 C66=C1,3770,0.4
 Cg=C1,1031.27,0.0004548
 Ch=C1,1023.66,0.0003198
 Ci=C1,1029.77,0.0003832
 Cj=C1,1030.98,0.0008702
 Ck=C1,1028.03,0.00529

datos

R1288=D1,1.8767,0.239,52.17
 R1311=D1,1.8767,0.239,52.17
 R1819=D1,1.8767,0.239,52.17
 R2425=D1,1.8767,0.239,52.17
 R3031=D1,1.8767,0.239,52.17
 R3637=D1,1.8767,0.239,52.17
 R4243=D1,1.8767,0.239,52.17
 R4849=D1,1.8767,0.239,52.17
 R5455=D1,1.8767,0.239,52.17
 R6061=D1,1.8767,0.239,52.17
 R6970=D1,0.294292805,0.008,0.0119
 R7273=D1,0.1359,0.008,0.0119
 R8081=D1,3.8023,0.239,52.17
 Rso=D1,0.2518,0.008,0.0119
 R7475=D1,0.0798,0.239,0.0119
 R8283=R9596=D1,0.1558,0.008,0.0119
 R7677=R9798=D1,0.0779,0.239,0.0119
 R7879=D1,0.0779,0.008,0.0119
 R8485=D1,0.0798,0.008,0.0119
 Rnin=D1,0.1596,0.008,0.0119
 R8687=D1,0.0532,0.008,0.0119
 R991=D1,0.0779,0.008,0.0119
 R9192=D1,0.1053,0.239,0.0119
 R8990=D1,0.3707,0.008,0.0119

Datos 3: datos característicos de resistencias térmicas convectivas incorporados al programa.

datos
R12=V1,0.0532,8
R23=V1,0.0532,10
R24=V1,0.0532,10
R45=V1,0.0532,10
R512=V1,0.0532,10
R681=V1,0.0532,8
R17=V1,0.0532,8
R7A=V1,0.0532,10
R89=V1,0.0532,10
R910=V1,0.0532,10
R1013=V1,0.0532,10
R111=V1,0.0532,8
R114=V1,0.0532,8
R1415=V1,0.0532,10
R1516=V1,0.0532,10
R1617=V1,0.0532,10
R1718=V1,0.0532,10
R191=V1,0.0532,8
R120=V1,0.0532,8
R201=V1,0.0532,10
R22=V1,0.0532,10
R223=V1,0.0532,10
R234=V1,0.0532,10
R251=V1,0.0532,8
R126=V1,0.0532,8
R267=V1,0.0532,10
R278=V1,0.0532,10
R2829=V1,0.0532,10
R2930=V1,0.0532,10
R311=V1,0.0532,8
R32=V1,0.0532,8
R32C=V1,0.0532,10
R34=V1,0.0532,10
R345=V1,0.0532,10
R376=V1,0.0532,10
R371=V1,0.0532,8
R138=V1,0.0532,8
R389=V1,0.0532,10
R3940=V1,0.0532,10
R4041=V1,0.0532,10
R4142=V1,0.0532,10
R431=V1,0.0532,8
R144=V1,0.0532,8
R44=V1,0.0532,10
R46=V1,0.0532,10
R4947=V1,0.0532,10
R4748=V1,0.0532,10
R491=V1,0.0532,8
R150=V1,0.0532,8
R5051=V1,0.0532,10
R5152=V1,0.0532,10
R5253=V1,0.0532,10
R5354=V1,0.0532,10
R551=V1,0.0532,8
R156=V1,0.0532,8
R567=V1,0.0532,10
R578=V1,0.0532,10
R59=V1,0.0532,10
R60=V1,0.0532,10
R611=V1,0.0532,8
R701=V1,0.294292805,8
R789=V1,0.294292805,10
R639=V1,0.131506,8
R63=V1,0.131506,2
R72=V1,0.1315,10
R6=V1,0.2518,10
R61=V1,0.2518,8
R60=V1,0.2620,10
R731=V1,0.1259,8
R811=V1,0.2620,8
R956=V1,0.262,2
R974=V1,0.0798,10
R96=V1,0.262,8
R982=R98=V1,0.1558,10
R976=R97=V1,0.0779,10
R975=V1,0.0779,10
R751=V1,0.0798,8
R921=R961=V1,0.1558,8
R771=R981=V1,0.0779,8
R791=V1,0.0779,8
R984=V1,0.0798,10
R901=V1,0.1596,10
R951=V1=V1,0.0798,8
R91=V1,0.1596,8
R99=V1,0.0532,10
R971=V1,0.0532,8
R105=V1,0.0779,10
R98=V1,0.0797,10
R91=V1,0.1052,10
R11=V1,0.0779,8
R901=V1,0.2767,8
R921=V1,0.1052,8
R932=V1,0.211067672,15
R991=V1,0.311067672,10

Datos 4: datos característicos de resistencias térmicas radiactivas incorporados al programa.

datos
R24=R1,0.0532,0.9,1
R412=R1,0.0532,0.276,1
R79=R1,0.0532,0.9,1
R913=R1,0.0532,0.276,1
R1416=R1,0.0532,0.9,1
R1618=R1,0.0532,0.276,1
R2022=R1,0.0532,0.9,1
R2224=R1,0.0532,0.276,1
R2628=R1,0.0532,0.9,1
R2830=R1,0.0532,0.276,1
R3234=R1,0.0532,0.9,1
R3436=R1,0.0532,0.276,1
R3840=R1,0.0532,0.9,1
R4042=R1,0.0532,0.276,1
R4446=R1,0.0532,0.9,1
R4648=R1,0.0532,0.276,1
R5052=R1,0.0532,0.9,1
R5254=R1,0.0532,0.276,1
R5658=R1,0.0532,0.9,1
R5860=R1,0.0532,0.276,1

Datos 5: datos flujo de masa de aire en cada punto del secador.

datos
J3=JM,1009.21,0.0128113
J3A=JM,1009.21,0.001903
J5=JM,1007.17,0.0014764
J1=JM,1007.08,0.0139102
J2=JM,1007.08,0.001408
J6=JM,1011.87,0.0095002
J6A=JM,1011.87,0.0016782
J10=JM,1007.49,0.0012277
J15=JM,1012.53,0.0060956
J15A=JM,1012.53,0.0015578
J17=JM,1008.13,0.0103724
J0=JM,1013.22,0.0047615
J0A=JM,1010.53,0.0013799
J23=JM,1008.89,0.0036168
J27=JM,1010.96,0.0034289
J27A=JM,1010.96,0.0012684
J29=JM,1009.76,0.0045783
Jc=JM,1014.94,0.0022302
JcA=JM,1014.94,0.0011366
J55=JM,1019.59,0.0054083
J9=JM,1015.57,0.0017697
J9A=JM,1015.57,0.0011733
J41=JM,1012.03,0.0060723
Jd=JM,1018.22,0.0012299
JdA=JM,1016.22,0.0012087
J47=JM,1012.56,0.0066163
J51=JM,1020.13,0.0018658
J51A=JM,1020.13,0.0025664
J53=JM,1013.74,0.0070323
J57=JM,1021.23,0.0013816
J8=JM,1014.86,0.0073057
Jf=JM,1034.78,0.0127743
Jg=JM,1031.27,0.0098238
Jh=JM,1023.66,0.0082652
Ji=JM,1029.77,0.0094241
Jj=JM,1030.98,0.0029187
Jk=JM,1028.03,0.0076419

Datos 6: datos flujo de calor en cada punto del secador

datos
J4A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J9A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J16A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J22A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J28A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J34A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J40A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J46A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J52A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J58A= JQ,0.0532,tabla2(tiempo)
J93A= JQ,0.000127234,tabla2(tiempo)
J63A= JQ,0.263,tabla2(tiempo)
J66A= JQ,0.263,tabla2(tiempo)
E1=E1,tabla1(tiempo)

Datos 7: datos iniciales de temperatura en cada punto del secador.

iniciales
Temp 3=29
Temp 5=24.8
Temp 4=28
Temp a=33.4
Temp 5=30
Temp 10=25.4
Temp 15=34.4
Temp 16=32
Temp 17=26.9
Temp b=35.3
Temp 23=28.4
Temp 27=32
Temp 29=30
Temp c=37.5
Temp 35=31.4
Temp 39=38.3
Temp 41= 33.6
Temp d= 39
Temp 47= 34.4
Temp 51= 43
Temp 53= 36
Temp 57= 44
Temp e= 37.4
Temp 22= 35
Temp 28= 39
Temp 34= 42
Temp 40= 45
Temp 46= 48
Temp 52= 49
Temp 58= 49
Temp f=41.5
Temp g=41.1
Temp h=37.6
Temp i=43.2
Temp j=45
Temp k=47.3
Temp 63=30
Temp 66=30

Datos 8: tabla de datos de temperatura ambiente (5 horas/un día de secado efectivo).

Tabla 1
factor = 3600; factor = 1
0, 22.6
1, 28
2, 30
3, 31
4, 30
5, 29

Datos 9: tabla de datos de radiación solar (5 horas/un día de secado efectivo).

Tabla 2
factor = 3600; factor = 1
0, 789
1, 900
2, 1200
3, 1160
4, 1055
5, 578

Datos 10: Resultados de comportamiento del flujo de calor por transferencia de masa en el secador solar.

resultados1
 Ja
 Jb
 Jc
 Jd
 Je
 Jf
 Jg
 Jh
 Ji
 Jj
 Jk

Datos 11: Resultados de comportamiento del flujo de calor en los materiales del colector del secador solar.

resultados2
 flujo R126
 flujo R2627
 flujo R2628
 flujo R2728
 flujo R2829
 flujo R2830
 flujo R2936
 flujo R3031
 flujo R311

Datos 13: Resultados de comportamiento del flujo de calor en los materiales de la cámara del secador solar.

resultados3
 flujo R30f
 flujo R3031
 flujo R311
 flujo R376
 flujo R7677
 flujo R771
 flujo R78h
 flujo R7978
 flujo R791
 flujo R7969
 flujo R69j
 flujo R82h
 flujo R8283
 flujo R831
 flujo R93k
 flujo 9394
 flujo R941

Datos 14: Tiempo estimado para la simulación.

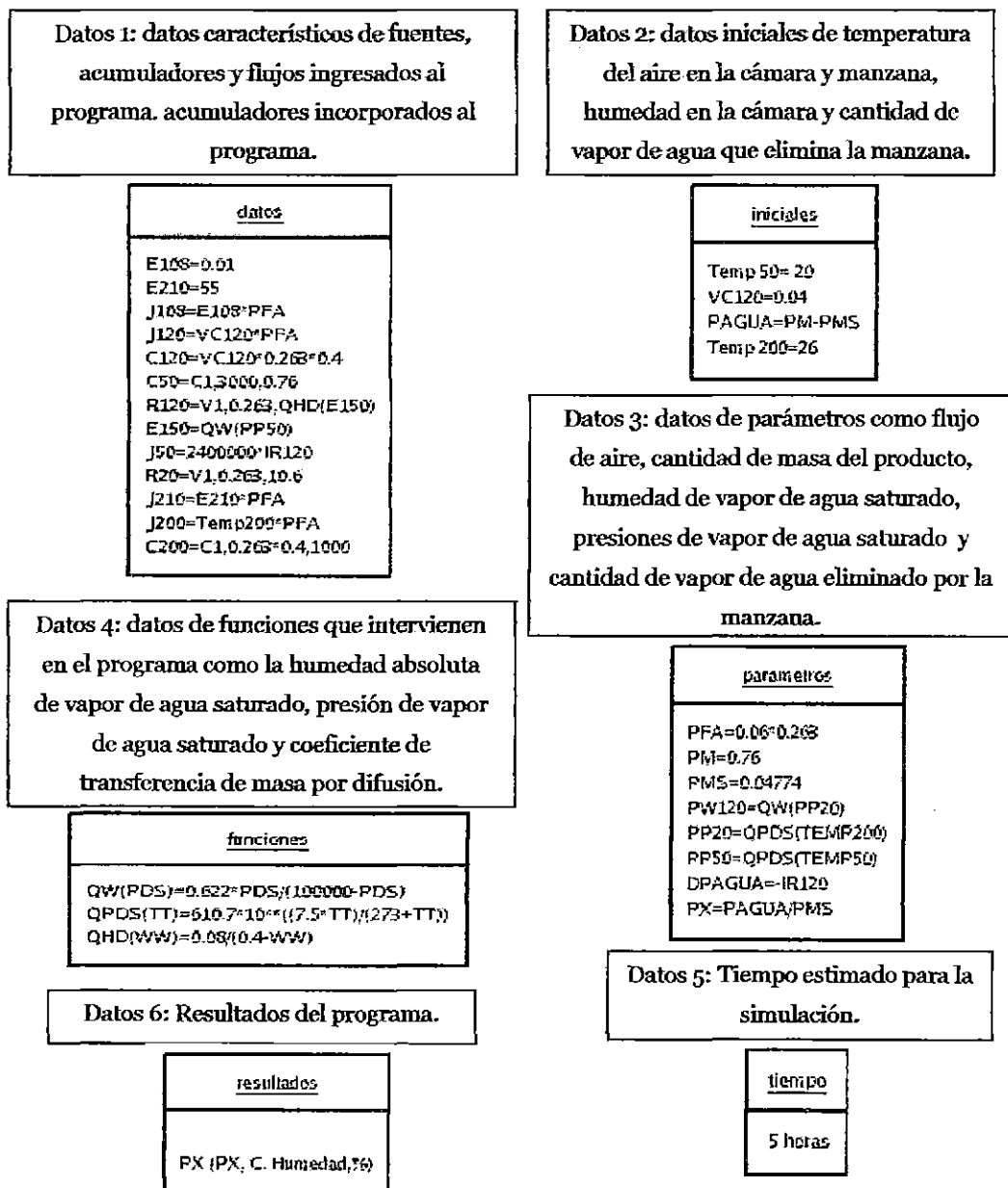
tiempo
 5 horas

Datos 15: Controlador de integración.

CONTROLES
 INTEGRATION ROUTINE=IMPLICIT

Nota: Los datos considerados en este programa son para el primer día de secado y de forma similar en los subsiguientes.

3. DATOS INCORPORADOS AL PROGRAMA SIMUSOL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PÉRDIDA DE HUMEDAD DE LA MANZANA



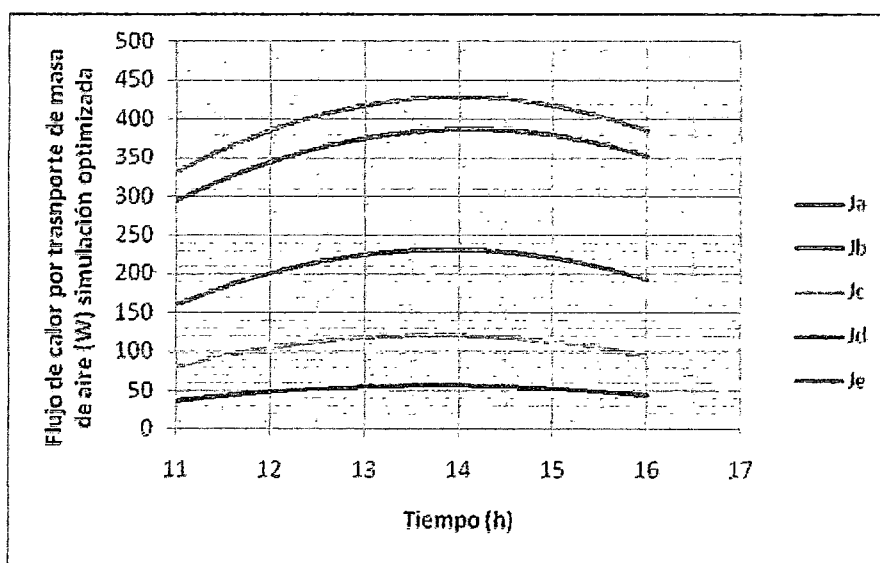
Nota: Los datos incorporados en este programa de simulación son para el primer día de secado de forma similar en los subsiguientes días.

4. RESULTADOS DEL CIRCUITO DE SIMULACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL FLUJO DE CALOR DEL SECADOR

4.1. Resultados de la fase de simulación

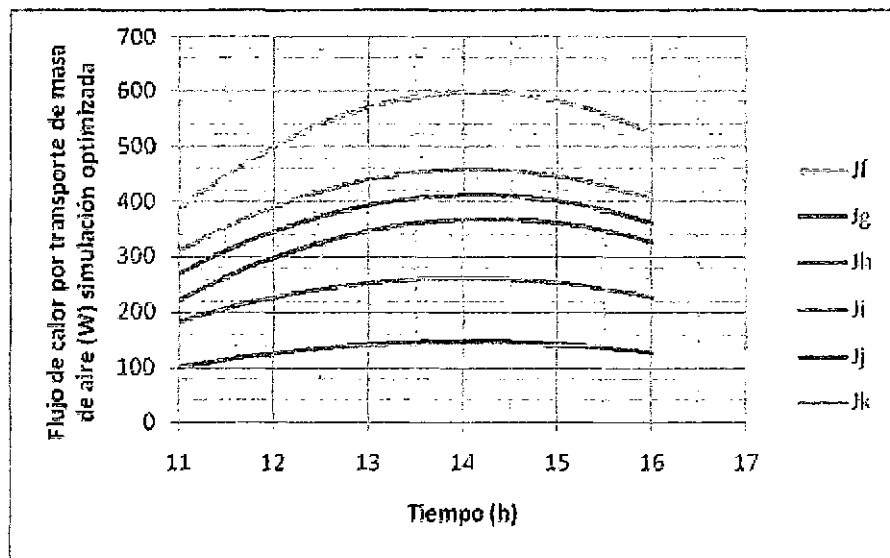
4.1.1. Resultados del circuito de simulación mejorado del flujo de calor

4.1.1.1. Resultado del circuito de simulación mejorado del flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector del secador



Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector más alto que el modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: a = 299W, b = 164W, c = 82,9W, d = 37W, e = 340,6W.

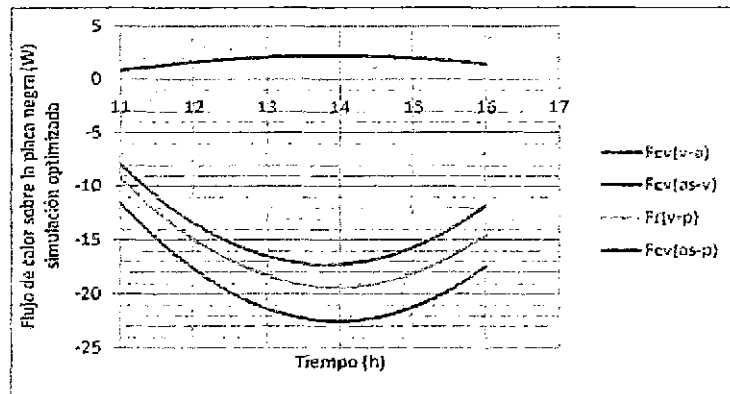
4.1.1.2. Resultado del circuito de simulación mejorado del flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador



Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara más alto que el modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $f = 386,9\text{W}$, $g = 270,3\text{W}$, $h = 218,6\text{W}$, $i = 308,5\text{W}$, $j = 100,8\text{W}$, $k = 182,9\text{W}$.

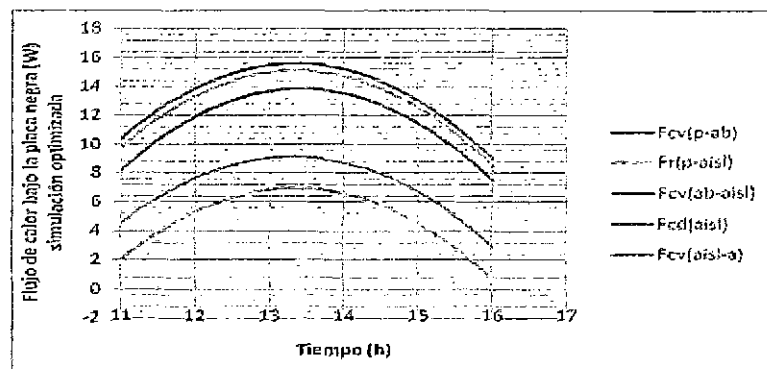
4.1.1.3. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales del colector del secador

4.1.1.3.1. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales sobre la placa negra



Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor sobre la placa negra del colector similar que el modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv}(v-a) = -7,6W$, $F_{cv}(as-v) = 0,9W$, $Fr(v-p) = -8,9W$, $F_{cv}(as-p) = -10,8W$.

4.1.1.3.2. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales bajo la placa negra

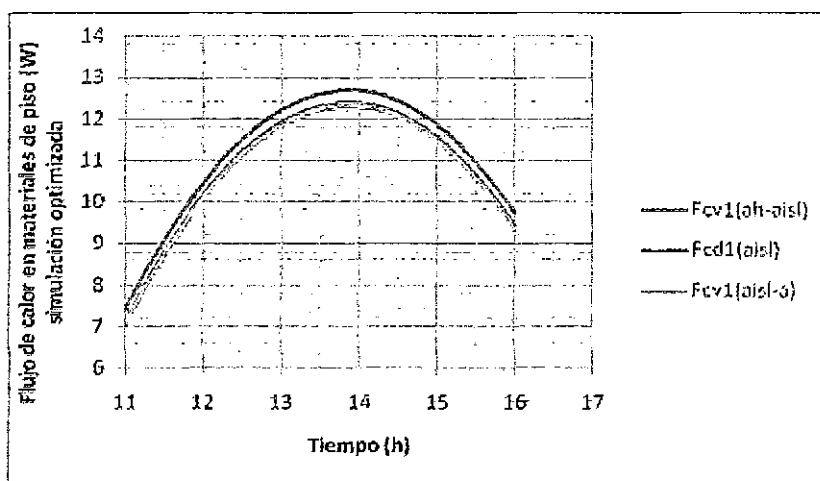


Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor sobre la placa negra del colector similar que el modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv}(p-ab)$

= 8,7W, $F_r(p\text{-aisl}) = 2,3\text{W}$, $F_{cv}(ab\text{-aisl}) = 4,8\text{W}$, $F_{cd}(aisl) = 11,2\text{W}$,
 $F_{cv}(aisl\text{-a}) = 10,3\text{W}$.

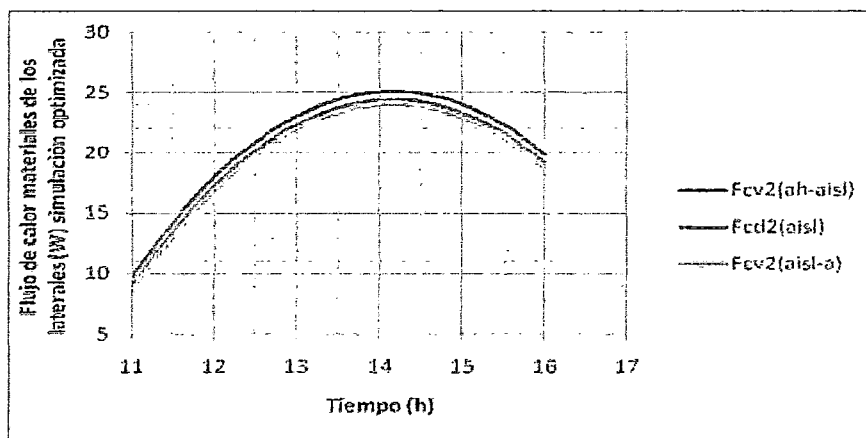
4.1.1.4. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en los materiales de la cámara del secador

4.1.1.4.1. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales del piso



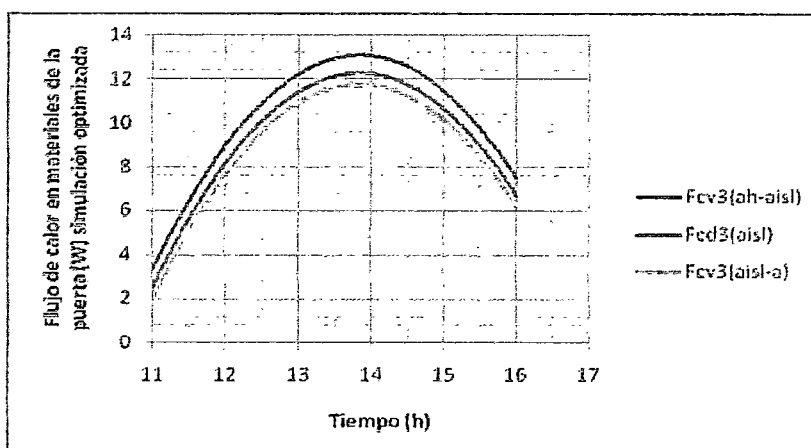
Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor en los materiales del piso de la cámara del secador el cual es bajo con respecto al modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv1}(ah\text{-aisl}) = 7,8\text{W}$, $F_{cd1}(aisl) = 7,4\text{W}$, $F_{cv1}(aisl\text{-a}) = 7,3\text{W}$.

4.1.1.4.2. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales de los laterales



Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor en los materiales del piso de la cámara del secador el cual es bajo con respecto al modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv2}(ah-aisl) = 8,7W$, $F_{cd2}(aisl) = 8W$, $F_{cv2}(aisl-a) = 7,6W$.

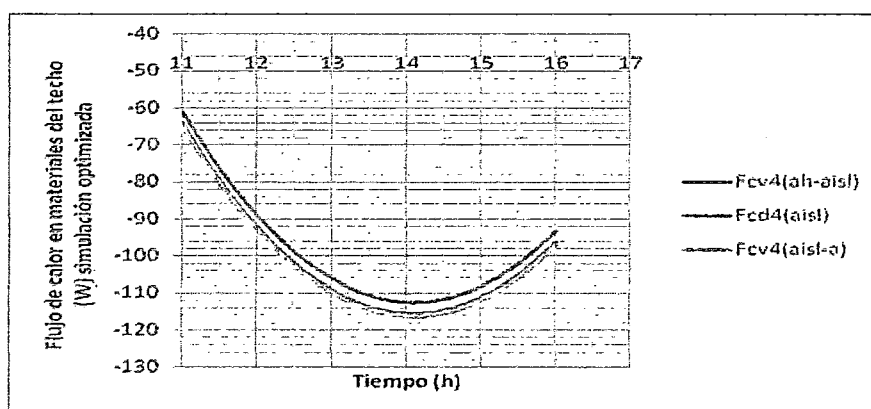
4.1.1.4.3. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en materiales de la puerta



Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor en los materiales de la puerta de la cámara del secador el cual es bajo

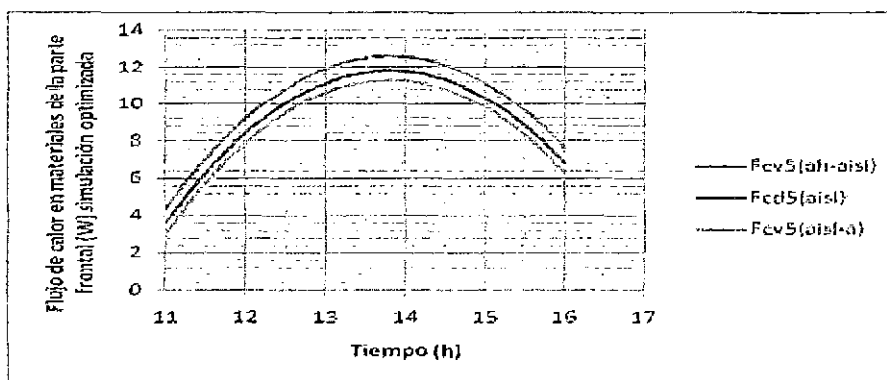
con respecto al modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv3}(ah-aisl) = 2,6W$, $F_{cd3}(aisl) = 1,8W$, $F_{cv3}(aisl-a) = 1,3W$.

4.1.1.4.4. Resultado de la simulación del flujo de calor en materiales del techo



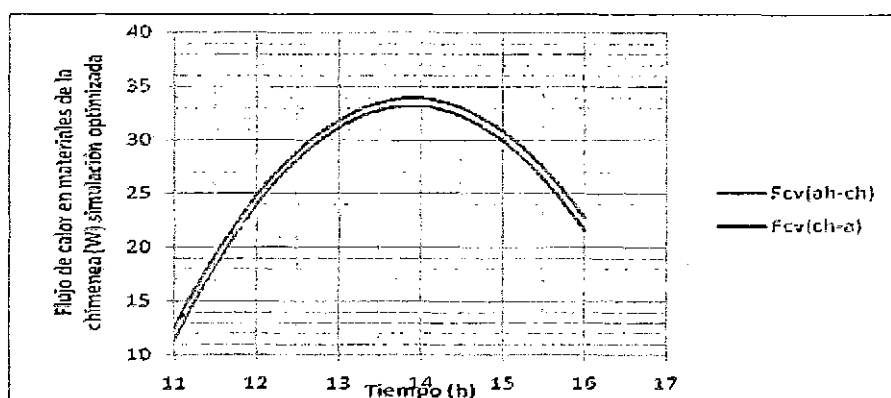
Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor en los materiales del techo de la cámara del secador el cual es diferente con respecto al modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv4}(ah-aisl) = -55,6W$, $F_{cd4}(aisl) = -58,6W$, $F_{cv4}(aisl-a) = -59,6W$.

4.1.1.4.5. Resultado de la simulación del flujo de calor en materiales de la parte frontal



Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor en los materiales de la parte frontal de la cámara del secador el cual es bajo con respecto al modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv5}(ah-aisl) = 4,2W$, $F_{cd5}(aisl) = 3,4W$, $F_{cv5}(aisl-a) = 2,9W$.

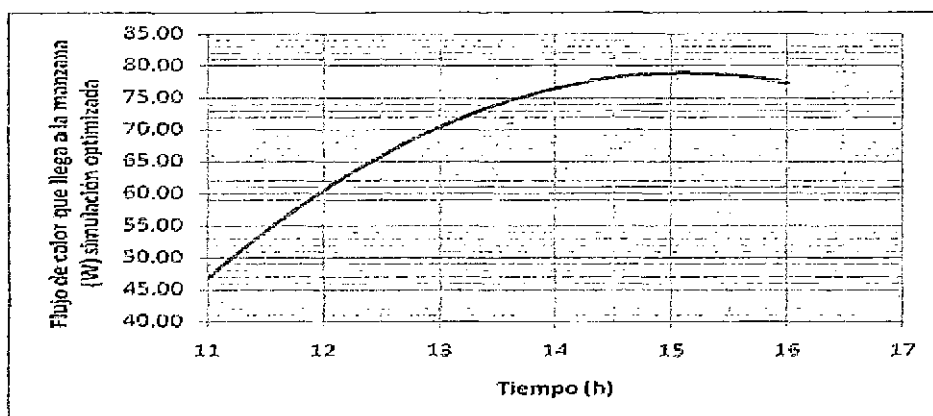
4.1.1.5. Resultado de la simulación mejorado del flujo de calor en los materiales de la chimenea del secador



Los resultados del circuito simulado demuestran un flujo de calor en los materiales de la chimenea del secador el cual es diferente con

respecto al modelo inicial. Comenzando los valores del flujo de calor en cada punto: $F_{cv}(ah-ch) = 11,3W$; $F_{cv}(ch-a) = 9,9W$.

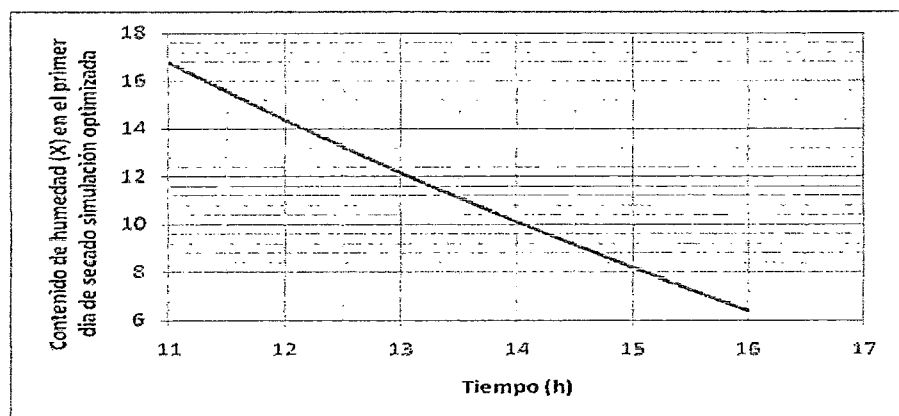
4.1.1.6. Resultado de la simulación del flujo de calor que llega a la manzana



El flujo de calor que llega a la manzana es relativamente alto con respecto al resultado inicial dado que las temperaturas aumentan en este caso.

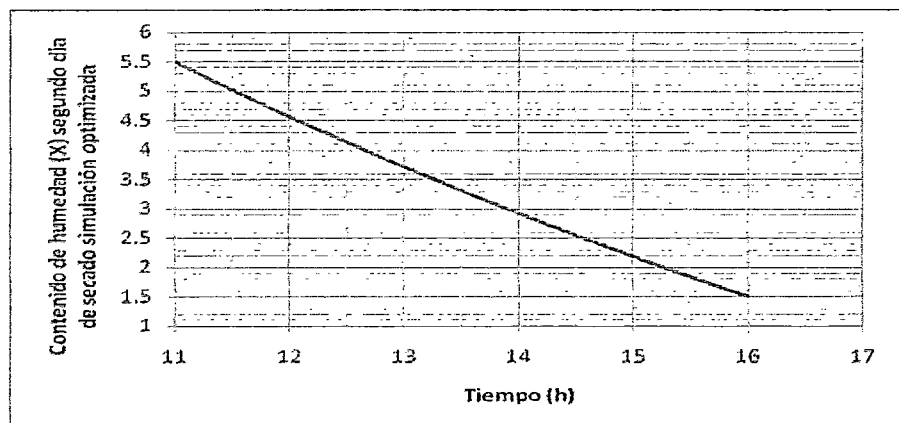
4.1.2. Resultado del circuito de simulación mejorado de la pérdida de humedad de la manzana

4.1.2.1. Resultado de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado



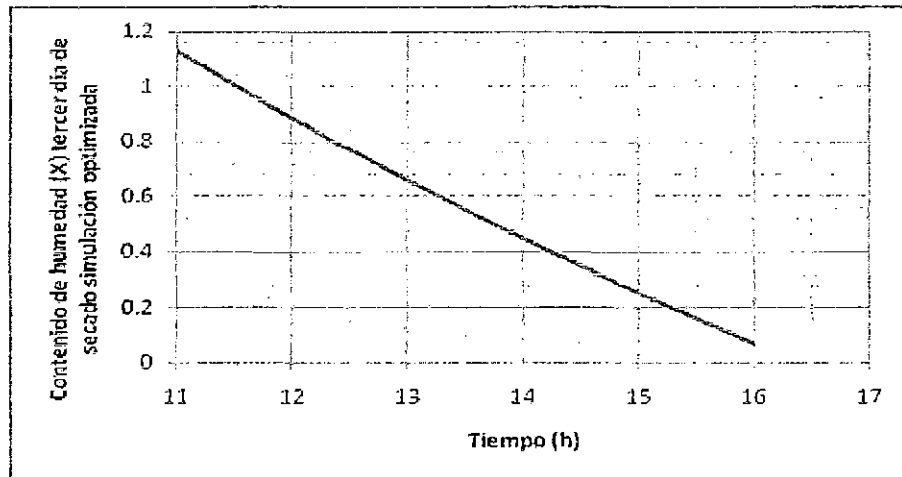
Este gráfico demuestra la acelerada pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado.

4.1.2.2. Resultado de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado



Este gráfico demuestra la acelerada pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado.

4.1.2.3. Resultado de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado

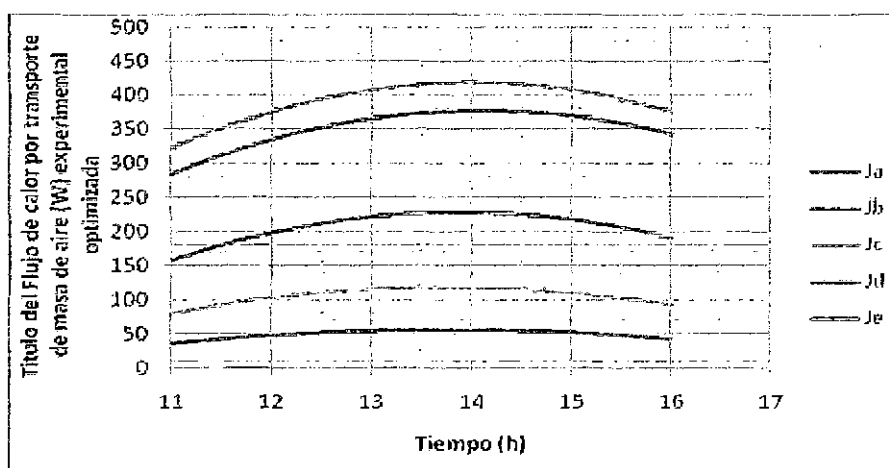


Este gráfico demuestra la acelerada pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado.

4.2. RESULTADO DE LA FASE DE LABORATORIO

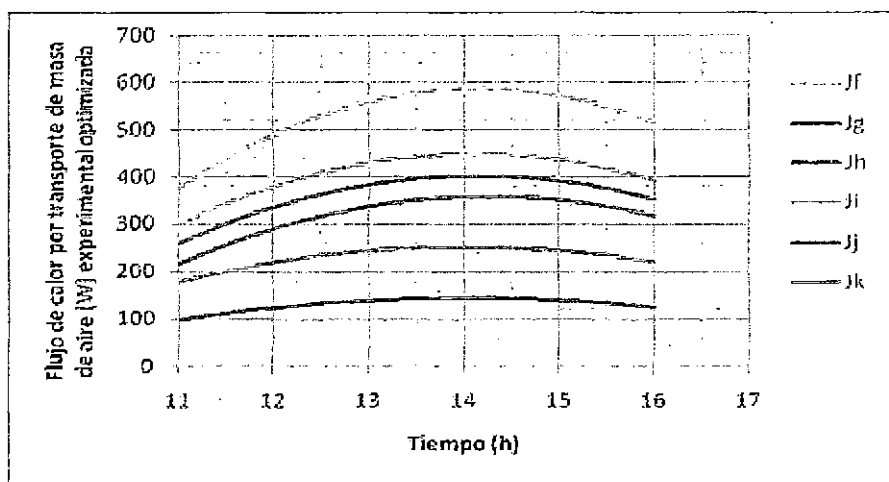
4.2.1. Resultado experimental del flujo de calor mejorado

4.2.1.1. Resultado experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector del secador mejorado



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

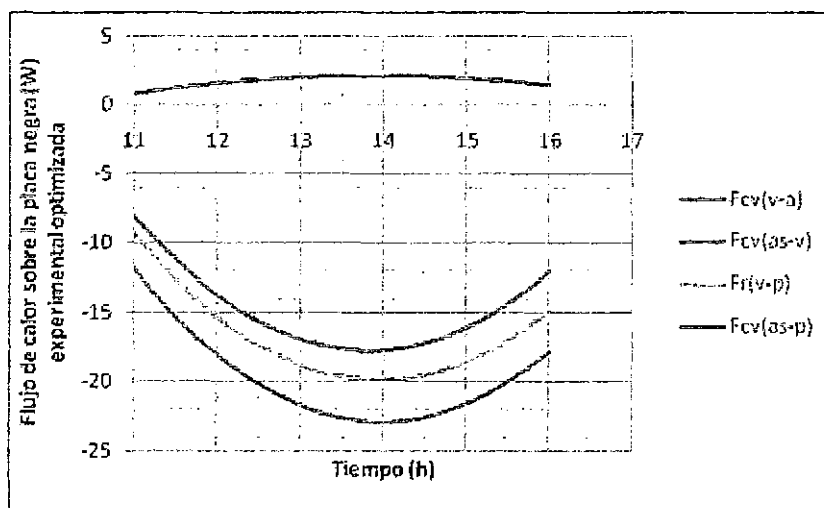
4.2.1.2. Resultado experimental del flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara y chimenea del secador mejorado



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

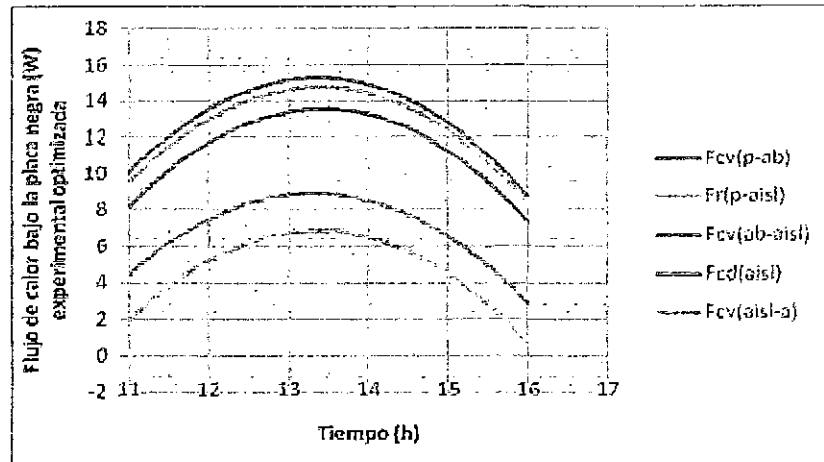
4.2.1.3. Resultado experimental del flujo de calor en los materiales del colector del secador mejorado

4.2.1.3.1. Resultado experimental del flujo de calor en materiales sobre la placa negra mejorado



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

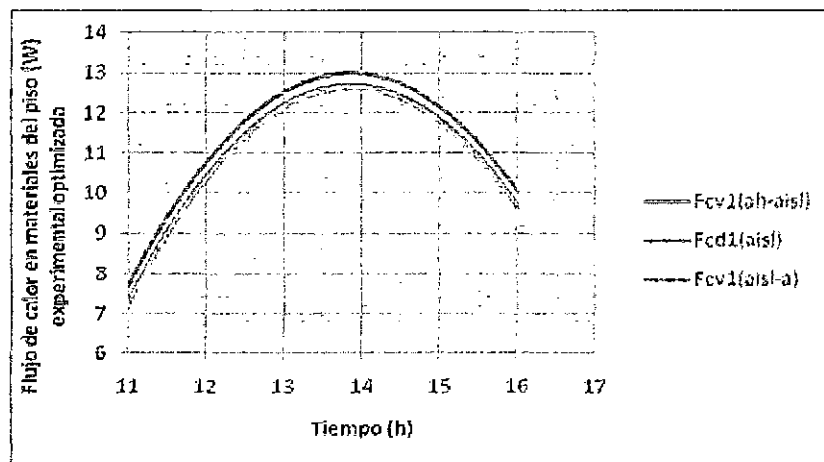
4.2.1.3.2. Resultado experimental del flujo de calor en materiales bajo la placa negra



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

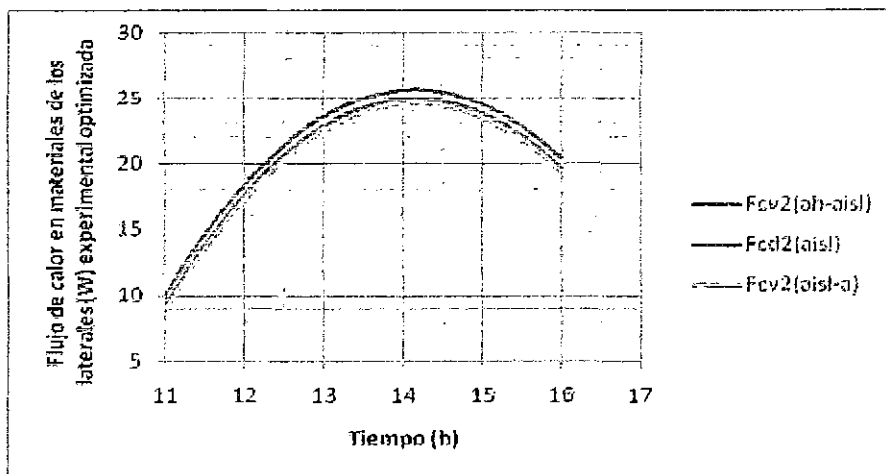
4.2.1.4. Resultado experimental del flujo de calor en los materiales de la cámara del secador mejorado

4.2.1.4.1. Resultado del flujo de calor en materiales del piso



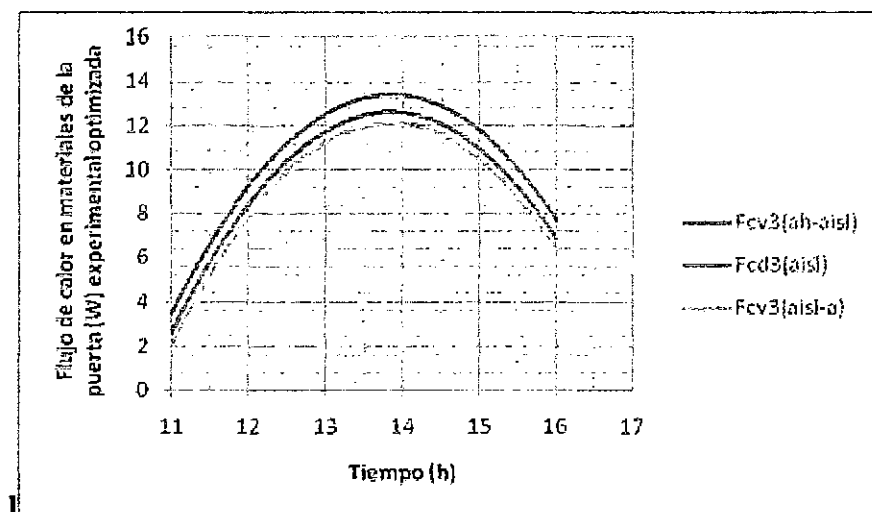
Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

4.2.1.4.2. Resultado del flujo de calor en materiales de los laterales



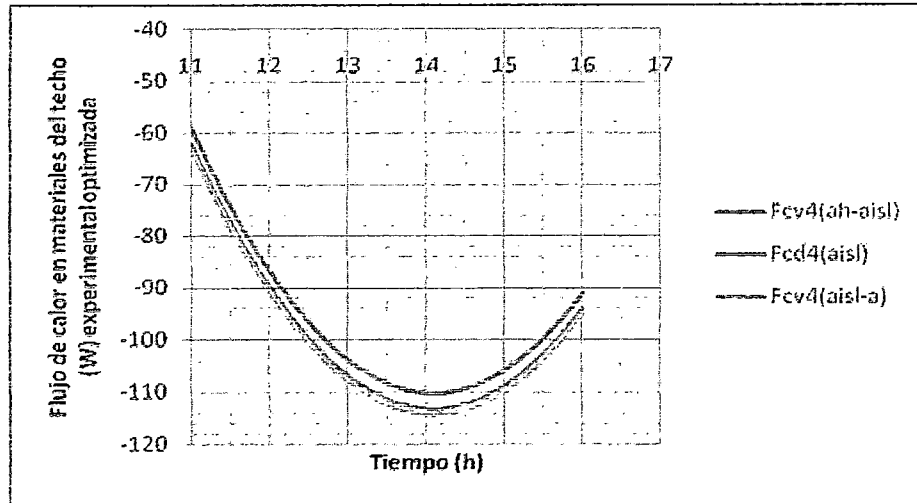
Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

4.2.1.4.3. Resultado del flujo de calor en materiales de la puerta



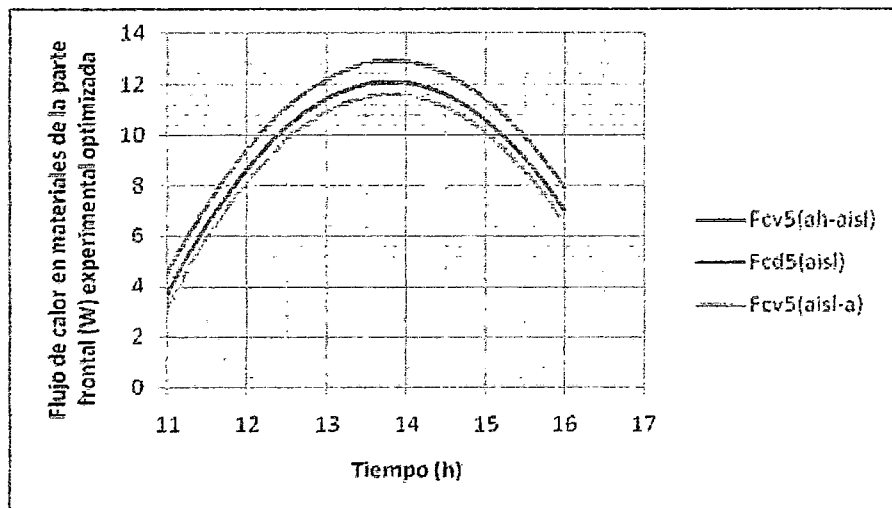
Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

4.2.1.4.4. Resultado del flujo de calor en materiales del techo



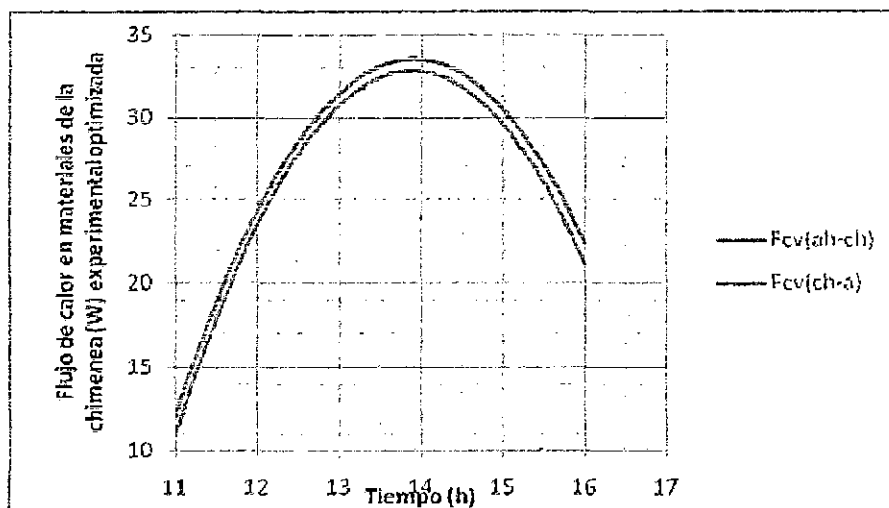
Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

4.2.1.4.5. Resultado del flujo de calor en materiales de la parte frontal



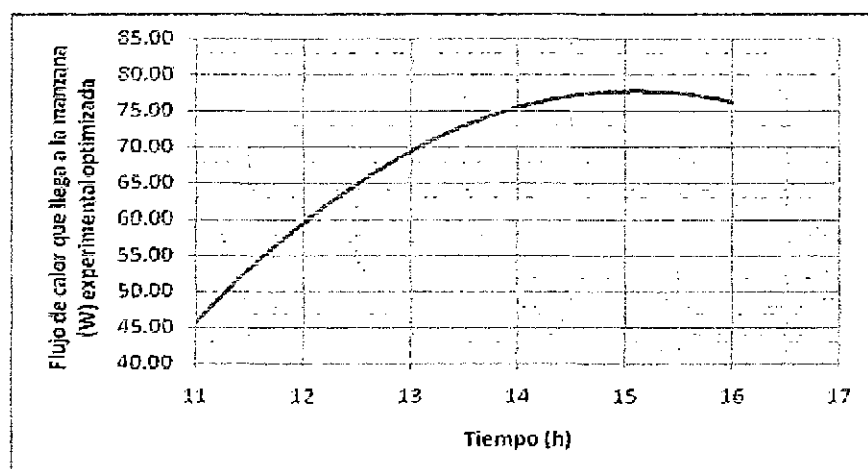
Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

4.2.1.5. Resultado experimental del flujo de calor en los materiales de la chimenea del secador mejorado



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

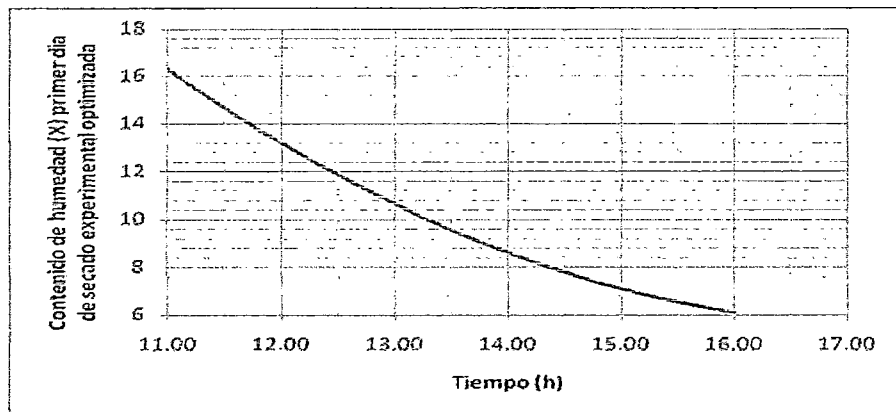
4.2.1.6. Resultado experimental del flujo de calor que llega a la manzana mejorado



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

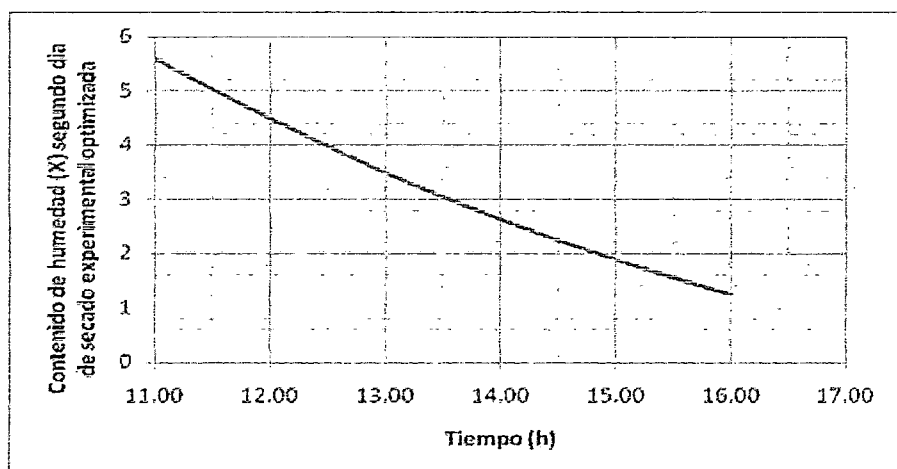
4.2.2. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana mejorado

4.2.2.1. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el primer día de secado



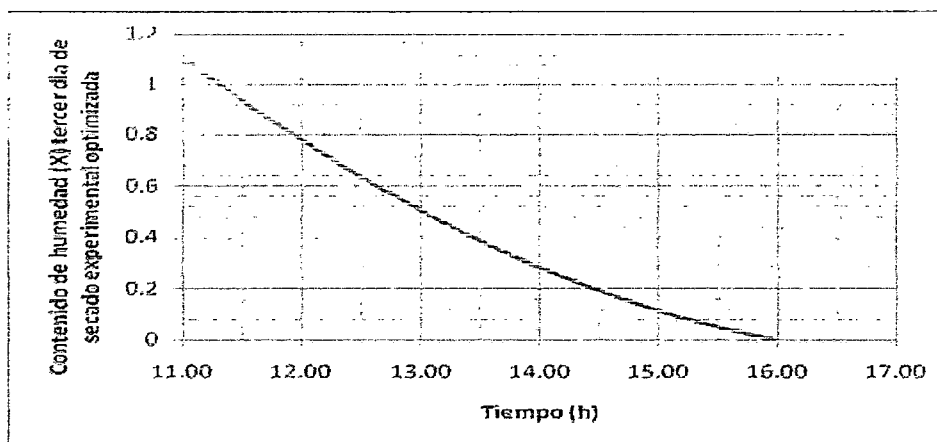
Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

4.2.2.2. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el segundo día de secado



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

4.2.2.3. Resultado experimental de la pérdida de humedad de la manzana en el tercer día de secado



Estos resultados experimentales demuestran una similitud con respecto al modelo simulado optimizado.

5. PORCENTAJE DE ERROR EN LA COMPARACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON LA SIMULADA

5.1. Flujo de calor por transporte de masa de aire

Hora	Flujo de calor por transporte de masa de aire (W)									
	Colector					Cámara				
	Ja	Jb	Jc	Jd	Je	Jf	Jg	Jh	Ji	Jj
11:00	3.34%	1.82%	2.41%	2.70%	2.94%	2.58%	3.70%	2.29%	3.24%	2.97%
12:00	2.98%	1.55%	1.94%	2.10%	2.72%	2.01%	2.93%	3.31%	2.57%	2.36%
13:00	2.67%	1.34%	1.73%	1.82%	2.39%	1.75%	2.53%	2.87%	2.27%	2.15%
14:00	2.57%	1.29%	1.63%	1.75%	2.27%	1.69%	2.45%	2.77%	2.20%	2.05%
15:00	2.61%	1.32%	1.74%	1.87%	2.39%	1.70%	2.46%	2.76%	2.22%	2.06%
16:00	2.87%	1.59%	2.15%	2.31%	2.63%	1.92%	2.79%	3.06%	2.50%	2.38%

Hora	Flujo de calor por transporte de masa de aire (W)
	Chimenea
	Jk
11:00	2.73%
12:00	3.04%
13:00	2.83%
14:00	3.83%
15:00	3.85%
16:00	3.12%

5.2. Flujo de calor en materiales del colector del secador

Hora	Porcentaje de error (%)			
	Flujo de calor sobre la placa negra			
	Fcv(v-a)	Fcv(as-v)	Fr(v-p)	Fcv(as-p)
11:00	1.31%	2.20%	1.12%	3.69%
12:00	2.85%	3.57%	3.27%	2.14%
13:00	2.46%	2.42%	2.74%	1.88%
14:00	2.35%	2.18%	2.59%	1.81%
15:00	2.53%	2.08%	2.25%	1.92%
16:00	2.54%	2.81%	2.71%	2.25%

Hora	Porcentaje de error (%)				
	Flujo de calor bajo la placa negra				
	Fcv(p-ab)	Fr(p-aisl)	Fcv(ab-aisl)	Fcd(aisl)	Fcv(aisl-a)
11:00	1.04%	1.30%	2.06%	2.68%	2.91%
12:00	1.76%	1.97%	2.63%	2.36%	2.37%
13:00	2.27%	1.63%	2.42%	2.08%	2.07%
14:00	2.20%	1.54%	2.35%	1.84%	2.05%
15:00	2.35%	1.51%	2.44%	2.12%	2.12%
16:00	1.48%	3.82%	2.26%	3.68%	1.30%

5.3. Flujo de calor en materiales de la cámara del secador

Hora	Porcentaje de error (%)											
	Fcv1 (ah- aisl)	Fcd1 (aisl)	Fcv1 (aisl-a)	Fcv2 (ah- aisl)	Fcd2 (aisl)	Fcv2 (aisl-a)	Fcv3 (ah- aisl)	Fcd3 (aisl)	Fcv3 (aisl-a)	Fcv4 (ah- aisl)	Fcd4 (aisl)	Fcv4 (aisl-a)
11:00	3.98%	2.77%	2.80%	3.53%	3.85%	2.71%	3.13%	2.93%	2.93%	3.92%	3.99%	3.99%
12:00	2.95%	3.03%	3.07%	2.50%	2.59%	2.64%	2.43%	2.35%	2.33%	2.86%	3.09%	3.26%
13:00	2.44%	2.50%	2.52%	2.16%	2.22%	2.26%	2.17%	2.11%	2.09%	2.49%	2.66%	2.79%
14:00	2.33%	2.39%	2.41%	2.05%	2.11%	2.15%	2.09%	2.03%	2.01%	2.49%	2.66%	2.79%
15:00	2.55%	2.62%	2.64%	2.19%	2.26%	2.30%	2.18%	2.12%	2.10%	2.57%	2.76%	2.89%
16:00	3.08%	3.17%	3.21%	2.40%	2.49%	2.54%	2.41%	2.33%	2.31%	3.91%	2.91%	4.71%

Hora	Porcentaje de error (%)		
	Fcv5(a h-aisl)	Fcd5(aisl)	Fcv5(a isl-a)
11:00	2.45%	3.05%	3.60%
12:00	2.99%	3.25%	3.43%
13:00	2.60%	2.80%	2.93%
14:00	2.47%	2.65%	2.77%
15:00	2.60%	2.80%	2.93%
16:00	3.98%	2.97%	3.21%

5.4. Flujo de calor en la chimenea

Hora	Porcentaje de error (%)	
	Fcv (ah- ch)	Fcv(ch-a)
11:00	2.58%	2.60%
12:00	2.53%	2.55%
13:00	2.46%	2.48%
14:00	2.38%	2.40%
15:00	2.65%	2.67%
16:00	2.80%	2.82%

5.5. Flujo de calor que llega a la manzana

Hora	Porcentaje de error (%)
11:00	2.30%
12:00	1.51%
13:00	1.42%
14:00	1.35%
15:00	1.30%
16:00	1.26%

La variación porcentual entre el proceso experimental y el simulado es aceptable, puesto que mayormente la diferencia es inferior al 5 % .

6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CALOR ANTES Y DESPUES DEL MEJORAMIENTO (F. calor mejorado – F. calor inicial)

6.1. Flujo de calor por transporte de masa de aire del secado

Hora	Flujo de calor por transporte de masa de aire (W)									
	Colector					Cámara				
	Ja	Jb	Jc	Jd	Je	Jf	Jg	Jh	Ji	Jj
11:00	23.02	36.31	14.70	4.56	92.71	39.67	23.15	12.64	33.31	17.48
12:00	52.58	56.03	30.72	13.61	106.43	125.31	45.47	48.31	95.79	29.73
13:00	63.36	43.72	24.67	11.74	125.89	132.56	83.14	53.18	78.30	24.95
14:00	46.14	49.34	28.07	12.06	114.07	143.77	76.85	66.04	78.78	22.03
15:00	86.25	64.89	32.72	20.00	128.36	176.25	113.62	89.72	137.63	47.68
16:00	58.24	40.63	22.50	13.19	121.18	132.85	97.41	86.22	114.05	37.82
promedio	54.93	48.49	25.56	12.53	114.77	125.07	73.27	59.35	89.64	29.95

Hora	Flujo de calor por transporte de masa de aire (W)
	Chimenea
	Jk
11:00	30.90
12:00	66.34
13:00	67.85
14:00	60.68
15:00	79.70
16:00	81.70
promedio	64.53

6.2. Flujo de calor en materiales del colector del secador

Hora	Flujo de calor (W)			
	Flujo de calor sobre la placa negra			
	Fcv(v-a)	Fcv(as-v)	Fr(v-p)	Fcv(as-p)
11:00	-4.62	0.16	-4.67	-5.91
12:00	-2.09	-0.83	-1.15	-0.14
13:00	-4.85	0.21	-4.91	-3.88
14:00	-4.55	-0.09	-4.38	-2.80
15:00	-10.14	1.62	-12.38	-13.35
16:00	-8.14	1.22	-9.48	-10.85
promedio	-5.73	0.38	-6.16	-6.15

Hora	Flujo de calor (W)				
	Flujo de calor bajo la placa negra				
	Fcv(p-ab)	Fr(p-aisl)	Fcv(ab-aisl)	Fcd(aisl)	Fcv(aisl-a)
11:00	3.25	1.54	1.91	5.02	4.47
12:00	4.53	0.55	1.09	1.49	2.58
13:00	1.34	1.88	1.65	3.51	3.77
14:00	4.45	1.66	1.77	4.80	3.36
15:00	8.43	4.51	3.17	7.79	7.84
16:00	2.83	0.51	1.17	2.79	3.34
promedio	4.14	1.77	1.79	4.23	4.23

6.3. Flujo de calor en materiales de la cámara del secador

Hora	Flujo de calor (W)											
	Fcv1 (ah- aisl)	Fcd1 (aisl)	Fcv1 (aisl-a)	Fcv2 (ah-aisl)	Fcd2 (aisl)	Fcv2 (aisl-a)	Fcv3 (ah- aisl)	Fcd3 (aisl)	Fcv3 (aisl-a)	Fcv4 (ah- aisl)	Fcd4 (aisl)	Fcv4 (aisl-a)
11:00	-46.38	-43.68	-42.78	-48.18	-45.88	-44.28	-60.70	-63.40	-64.30	-27.50	-25.30	-24.80
12:00	-75.26	-72.56	-71.66	-105.29	-103.09	-101.49	-95.64	-98.34	-99.24	-53.71	-51.51	-51.01
13:00	-76.85	-73.95	-73.05	-113.34	-111.04	-109.44	-106.51	-109.21	-110.11	-67.50	-55.30	-54.80
14:00	-72.82	-70.12	-69.22	-110.59	-108.29	-106.69	-111.08	-113.78	-114.68	-56.91	-54.71	-54.21
15:00	-43.66	-40.96	-40.06	-83.53	-81.23	-79.63	-106.80	-109.50	-110.40	-42.99	-40.79	-40.29
16:00	-40.66	-37.96	-37.06	-80.53	-78.23	-76.63	-96.70	-99.40	-100.30	-41.99	-39.79	-39.29
promedio	-59.24	-56.54	-55.64	-90.26	-87.96	-86.36	-98.24	-98.94	-99.84	-46.77	-44.57	-44.07

Hora	Flujo de calor (W)		
	Fcv5(a h-aisl)	Fcd5(aisl)	Fcv5(a isl-a)
11:00	-27.35	-25.15	-24.65
12:00	-54.17	-51.97	-51.47
13:00	-58.04	-55.84	-55.34
14:00	-57.05	-54.85	-54.35
15:00	-43.14	-40.94	-40.44
16:00	-42.14	-39.94	-39.44
promedio	-46.98	-44.78	-44.28

6.4. Flujo de calor en materiales de la chimenea del secador

Hora	Porcentaje de error (%)	
	Fcv (ah- ch)	Fcv(ch-a)
11:00	49.98	48.41
12:00	66.55	65.97
13:00	72.03	70.98
14:00	74.67	73.41
15:00	68.79	67.51
16:00	56.79	55.51
promedio	64.80	63.63

6.5. Flujo de calor que llega a la manzana

Hora	Flujo de calor (W)
11:00	15.23
12:00	6.44
13:00	9.40
14:00	12.20
15:00	13.79
16:00	15.52
promedio	12.09

7. EFICIENCIA DEL SECADOR TIPO CABINA ANTES DEL MEJORAMIENTO

7.1. Eficiencia del colector solar

7.1.1. Primer día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	28.3	20	24.15	297.15	1006.943	0.007	744.0	13.72%
12:00	30.3	23.6	26.95	299.95	1006.999	0.007	905.35	9.75%
13:00	34.5	26	30.25	303.25	1007.065	0.008	836.763	15.24%
14:00	39.2	27.4	33.30	306.30	1007.126	0.009	946.502	21.25%
15:00	34.2	25.6	29.90	302.90	1007.058	0.008	288.066	44.39%
16:00	30.2	26.4	28.30	301.30	1007.026	0.007	212.620	23.47%

Promedio de la eficiencia 21,30%

7.1.2. Segundo día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	28	23	25.50	298.50	1006.97	0.007	700.000	8.79%
12:00	31.2	26.6	28.90	301.90	1007.038	0.007	836.763	7.54%
13:00	39.1	29	34.05	307.05	1007.141	0.009	925.926	18.74%
14:00	44.2	30.4	37.30	310.30	1007.206	0.010	932.785	28.74%
15:00	40.5	28.6	34.55	307.55	1007.151	0.009	857.339	24.71%
16:00	34.8	29.4	32.10	305.10	1007.102	0.008	130.316	63.37%

Promedio de la eficiencia 25,31%

7.1.3. Tercer día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	33	20	26.50	299.50	1006.99	0.007	720.000	22.21%
12:00	35.4	27.5	31.45	304.45	1007.089	0.007	857.339	12.16%
13:00	41	29.4	35.20	308.20	1007.164	0.008	932.785	19.01%
14:00	42.6	32	37.30	310.30	1007.206	0.008	946.502	17.79%
15:00	42.1	32.8	37.45	310.45	1007.209	0.008	843.621	17.31%
16:00	36.2	32.7	34.45	307.45	1007.149	0.007	253.772	18.62%

Promedio de la eficiencia 17,85%

7.1.4. Cuarto día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	31	18	24.50	297.50	1006.95	0.007	710.000	22.53%
12:00	33.4	25.5	29.45	302.45	1007.049	0.007	847.339	12.36%
13:00	39	27.4	33.20	306.20	1007.124	0.008	922.785	19.46%
14:00	40.6	30	35.30	308.30	1007.166	0.009	936.502	18.24%
15:00	40.1	30.8	35.45	308.45	1007.169	0.008	833.621	17.76%
16:00	34.2	30.7	32.45	305.45	1007.109	0.007	243.772	19.49%

Promedio de la eficiencia 18,31%

7.1.5. Quinto día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	33	20	26.50	299.50	1006.99	0.007	718.000	22.28%
12:00	35.4	27.5	31.45	304.45	1007.089	0.007	855.339	12.19%
13:00	41	29.4	35.20	308.20	1007.164	0.008	930.785	19.05%
14:00	42.6	32	37.30	310.30	1007.206	0.008	944.502	17.83%
15:00	42.1	32.8	37.45	310.45	1007.209	0.008	841.621	17.35%
16:00	36.2	32.7	34.45	307.45	1007.149	0.007	251.772	18.77%

Promedio de la eficiencia 17,91%

Eficiencia promedio total del colector solar 20,14%

7.2. Eficiencia del secador

- Masa inicial de la manzana (m_i) : 0,767 Kg.
- Masa final de la manzana (m_f) : 0,044 Kg.
- Diferencia de masa ($\Delta m = m_f - m_i$) : 0,722 Kg.
- Área del colector : 0,532 m²
- Tiempo de secado : 5 días.

Eficiencia del secador solar 27,16%

8. EFICIENCIA DEL SECADOR TIPO CABINA DESPUES DEL MEJORAMIENTO

8.1. Eficiencia del colector solar

8.1.1. Primer día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	35.4	22.6	29.00	302.00	1007.04	0.007	744.0	21.17%
12:00	44.4	28	36.20	309.20	1007.184	0.008	954.0	26.53%
13:00	51.8	30	40.90	313.90	1007.278	0.010	1111.0	35.34%
14:00	55	31	43.00	316.00	1007.32	0.010	1160.0	39.56%
15:00	52	30	41.00	314.00	1007.28	0.010	1055.0	37.70%
16:00	41.2	29	35.10	308.10	1007.162	0.008	696.0	25.10%

Promedio de la eficiencia 30.90%

8.1.2. Segundo día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	28	18.4	23.20	296.20	1006.924	0.007	583.0	20.26%
12:00	38.4	25	31.70	304.70	1007.094	0.009	744.0	30.39%
13:00	45.8	27	36.40	309.40	1007.188	0.011	875.0	43.25%
14:00	49	28	38.50	311.50	1007.23	0.011	950.0	47.61%
15:00	46	27	36.50	309.50	1007.19	0.011	826.0	46.50%
16:00	35.2	26	30.60	303.60	1007.072	0.008	583.0	24.41%

Promedio de la eficiencia 35,4%

8.1.3. Tercer día de secado

Hora	Ts (°C)	Te (°C)	Tm (°C)	Tm (°K)	Cp (J/Kg °K)	flujo másico (Kg/s)	R (W/m ²)	η (%)
11:00	30	16	23.00	296.00	1006.92	0.007	603.6	28.54%
12:00	36.6	19.7	28.15	301.15	1007.023	0.008	788.8	32.16%
13:00	42	26	34.00	307.00	1007.14	0.009	939.6	29.33%
14:00	47.7	28	37.85	310.85	1007.217	0.010	1000.0	38.55%
15:00	45	26	35.50	308.50	1007.17	0.010	880.0	39.85%
16:00	39.2	20	29.60	302.60	1007.052	0.008	675.0	45.73%

Promedio de la eficiencia 35,69 %

Eficiencia promedio total del colector solar 34%

8.2. Eficiencia del secador

- Masa inicial de la manzana (m_i) : 0,767 Kg.
- Masa final de la manzana (m_f) : 0,044Kg.
- Diferencia de masa ($\Delta m = m_f - m_i$) : 0,722 Kg.
- Área del colector : 0,532 m²
- Tiempo de secado : 3 días.

Eficiencia del secador solar 45,26%

El resultado de eficiencia del secador solar tipo cabina antes de la optimización 27,16% y del colector solar es 32.02%, después de la optimización la eficiencia aumento en el secador a 45,26% y del colector solar 34% estos resultados se encuentran dentro de los valores permitidos para un optimo funcionamiento de colectores solares (Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo V Centenario - Subprograma VI: Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía. "Ingeniería del Secado Solar". Editores R. Convalan, M. Horn, R. Roman, L Saravia 1992).

CAPITULO VI: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y BIBLIOGRAFIA

CONCLUSIONES

1. Mediante la simulación del flujo de calor utilizando el Software SIMUSOL se pueden proponer mejoras en el diseño para el uso de un secador solar tipo cabina con una mayor eficiencia del equipo.
2. El uso del software SIMUSOL sirvió para comprender y mejorar el funcionamiento del secador tipo cabina, a través de la elaboración de una metodología para el diseño de un circuito térmico que simula el comportamiento del flujo de calor en las diferentes partes del equipo.
3. Utilizando el diseño del circuito térmico se obtuvo la simulación de importantes variables que intervienen en el secado, como la temperatura del aire que fluye a través del secador, flujo de calor por transporte de masa de aire, flujo de calor en los materiales de construcción del secador, contenido de humedad en base seca del producto, etc.
4. El porcentaje de error en términos de la data el experimental y el modelo simulado es del 3%, lo que valida su aplicación (conforme se demuestra en las tablas de la pagina 133 y 157).
5. A consecuencia del pronóstico del comportamiento del flujo de calor simulado, se hicieron modificaciones en el diseño del secador tipo cabina con el fin de mejorar el secado del producto, obteniéndose un flujo de calor por transporte de masa de aire en el colector en promedio de 230,9W, flujo de calor por transporte de masa de aire en la cámara en promedio de 180,2W óptimo para su secado, resultado que también se ve reflejado en la eficiencia del equipo, la que mejoró desde un 27,16% hasta un 45,26%.

RECOMENDACIONES

- El software SIMUSOL se recomienda como una herramienta poderosa en el cálculo y la visualización del comportamiento térmico de equipos solares y para calcular las variables óptimas que puedan intervenir a la construcción de un secador solar, tales como, área y características óptimas (conductividad térmica, aislamiento, transmitancia, absorptancia, etc.) de los materiales para la construcción del secador solar, posibilitando optimizar costos y mejorar su eficiencia.
- El Software SIMUSOL puede emplearse con fines académicos, ya que permite visualizar gráficamente los procesos de los secadores solares mediante el diseño de un circuito térmico.
- Para posteriores trabajos de investigación se recomienda fuertemente el uso de programas de simulación en el diseño de secadores solares y otros sistemas de termo conversión solar con el fin de obtener mejores resultados tanto desde el punto de vista técnico como económico, en el producto seco.

BIBLIOGRAFICAS

- CENTRO DE ENERGÍAS RENOVABLES -UNI-GTZ, “Teoría y Práctica del Secado Solar”, Lima 1991.
- CONDORÍ Miguel Angel, Tesis de Doctorado “Estudio de Secadores Invernaderos del Tipo Tunel”. Universidad Nacional de Salta – Facultad de Ciencias Exactas – Argentina 1999.
- ENRIQUEZ Rosa , “Manual de Propiedades Termofísicas de Fluidos y Sólidos en Ingeniería”. Universidad de San Agustín Facultad de Ingeniería de Procesos, Arequipa Perú.
- HERMOSIO VILLALOBOS Juan Jorge, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, “Energía Solar”, México Febrero de 1995.
- INENCO Universidad Nacional de Salta, Avances Introdutorios en la Capacidad del simulador de Sistemas Solares Térmicos SIMUTERM (SIMUSOL); Argentina 2002.
- KERN Donald. “Procesos de Transferencia de Calor”, Editorial continental, S.A. de C.V., México. 1990.
- MORAN M. J. y S. H. Shapiro, “Fundamentos de Termodinámica Técnica”, Barcelona , Reverte 1993.
- PROGRAMA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO V CENTENARIO - SUBPROGRAMA VI: NUEVAS FUENTES Y CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA. “Ingeniería del Secado Solar”. Editores R. Convalan, M. Horn, R. Roman, L Saravia 1992.

- REBOHLE T. “Datos Básicos sobre Procesos Físicos y Químicos Durante el Secado de Alimentos. Proyecto de Secado solar”. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú, 1988.
- SARAVIA Luis R. y Dolores Alía de Saravia, INENCO, “Simulación de Distintos Sistemas Físicos con Símusol”, Argentina 2002.
- SARAVIA Luis R. y Dolores Alía de Saravia, “Manual Simusol”, UNSA-INENCO Argentina 2004.
- TECNOLOGÍA DESAFIANDO LA POBREZA (ITDG) SOLUCIONES PRÁCTICAS, “Secado Solar” Ficha Técnica número 13.
- THRELKELD James L.. “Ingeniería del Ambito Térmico”. Prentice Hall Internacional, .España, 1973.
- TWIDELL John W., “Renewable Energy Resources”, London New York E. F. N. Spon 1986.
- VALERA Anibal, “Energía Solar”, Universidad Nacional de Ingeniería Lima – Perú , Editor Victor López Guzmán 1993.
- TWIDELL John W., “Renewable Energy Resources”, London New York E. F. N. Spon 1986.

APENDICE

1. Formato Técnico del Secador Tipo Cabina

a. Descripción Técnica

NOMBRE: Secador tipo Cabina

APLICACIÓN: Ají, Fruta, Hierbas aromáticas, Hortalizas.

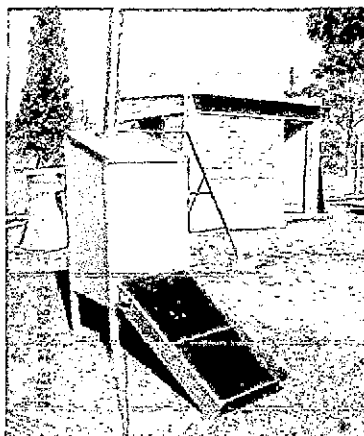
Secador de fácil construcción que puede variar de acuerdo a los materiales que se use en la cabina, si se usa material opaco, el secador es directo, si es transparente el secador es mixto.

Su capacidad es pequeña pero hay ejemplos construidos con capacidad de carga mediana.

El aire recorre el colector y entra por la parte inferior de la cabina atravesando las bandejas que contiene el producto. El aire circula por convección térmica. En algunos casos se ayuda la circulación mediante la colocación de una chimenea.

La estructura del secador es de madera y el material de cubierta es de polietileno antiUV.

ESQUEMA DEL SECADOR TIPO CABINA



b. Especificaciones Técnicas

Modo de Calentamiento : Indirecto
Circulación de aire : Convección Natural
Forma de la cámara de secado : Cabina con bandejas

c. Las dimensiones del secador son:

Ancho = 53,2cm

Largo = 159,7cm

Que comprende la cámara de 59,7cm y el colector solar 100cm.

Altura = 124cm

Material del Colector Solar :

Cubierta: Vidrio

Absorbedor: Latón pintado de negro opaco

Aislante: Madera

Reflectores: Alumina

Material de la Cámara:

Cubierta: Polietileno anti - UV

Estructura: Madera

Capacidad Normal de carga: 10kg de producto

Capacidad específica: Hasta 5 Kg/m²

Tiempo de secado: 4 a 5 días (cielo despejado)

10 a 14 días (caso contrario)

d. INFORMACION COMPLEMENTARIA

Costo de construcción

Costo de construcción	US \$
Vidrio	15.00
Madera	120.00
Polietileno anti - UV	41.10
Plancha de Laton	20.00
Mano de obra (8 jornales)	200.00
Alambrón, clavos y tornillos	7.20
Pintura negro mate	10.00
pernos	3.30
Tecnopor	10.00
Malla verde	10.00
Inversión Inicial (I₀)	436.6

2. Cálculo de Datos para la Simulación

Puntos de temperatura del aire	T (°C)	Espacio Recorrido (m.)	Velocidad del aire (m/s)	Flujo Másico (Kg./s)	Masa (Kg.)	Cp (J/Kg.°C)
Temp1	30	0,001	0,2017	0,01364	2,750669	1020,30
Temp2	30	0,001	0,2017	0,00138	0,278418	1020,30
Temp3	34,4	0,05	0,2057	0,01231	0,050640	1026,20
Temp3A	34,4	0,1	0,3057	0,00191	0,005832	1026,20
Temp5	30,2	0,05	0,4057	0,00278	0,022517	1020,54
Tempa	28,8	0,15	0,4317	0,02258	0,064986	1018,91
TempaA	28,8	0,2	0,5317	0,00327	0,008688	1018,91
Temp10	32,5	0,15	0,3557	0,00212	0,005034	1023,49
Temp15	29,8	0,25	0,2581	0,01205	0,012438	1020,06
Temp15A	29,8	0,3	0,3581	0,00225	0,002686	1020,06
Temp17	35,0	0,25	0,3057	0,01620	0,019811	1027,11
Tempb	25,4	0,35	0,0845	0,00328	0,000791	1015,42
TempbA	21,4	0,4	0,1845	0,00114	0,000527	1012,05
Temp23	33,4	0,35	0,2557	0,00498	0,003638	1024,74
Temp27	22,1	0,45	0,1106	0,00360	0,000885	1012,59
Temp27A	22,1	0,5	0,2106	0,00130	0,000548	1012,59
Temp29	35,4	0,45	0,2057	0,00536	0,002450	1027,73
Tempc	28,7	0,55	0,1367	0,00347	0,000862	1018,80
TempcA	28,7	0,6	0,2367	0,00143	0,000566	1018,80
Temp35	36,6	0,55	0,1957	0,00639	0,002272	1029,68
Temp39	29,5	0,65	0,0893	0,00168	0,000231	1019,71
Temp39A	29,5	0,7	0,1893	0,00114	0,000309	1019,71
Temp41	39,0	0,65	0,1857	0,00724	0,002069	1033,94
Tempd	32,1	0,75	0,0420	0,00051	0,000029	1022,95
TempdA	32,1	0,8	0,1420	0,00086	0,000152	1022,95
Temp47	40,4	0,75	0,1757	0,00798	0,001869	1036,67
Temp51	36,1	0,85	0,3300	0,00186	0,000724	1028,85
Temp51A	36,1	0,9	0,4300	0,00256	0,001221	1028,85
Temp53	41,4	0,85	0,1657	0,00859	0,001674	1038,74
Temp57	40,1	0,95	0,2657	0,00156	0,000436	1036,07
Tempe	28,3	0,95	0,1183	0,00688	0,000857	1018,36
Tempf	26,2	0,366	0,0150	0,00458	0,000188	1017,95
Tempg	31,2	0,55935	0,0083	0,00255	0,000038	1020,67
Temp h	27,5	0,6892	0,0017	0,00052	0,000001	1015,73
Temp i	27,5	0,7624	0,0017	0,00051	0,000001	1017,06
Temp j	26,7	1,1068	0,1213	0,00107	0,000118	1015,59
Temp k	28,7	1,2568	0,8275	0,00727	0,004786	1008,39