

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MODELADO DE LA OPERACIÓN TRANSITORIA DE UN
DESHIDRATADOR SOLAR PARA SECADO DE CACAO**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Presentado por los Bachilleres:

Lopardo L. Antonio M.

Torres G. Gabriel A.

Para Optar al Título

De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MODELADO DE LA OPERACIÓN TRANSITORIA DE UN
DESHIDRATADOR SOLAR PARA SECADO DE CACAO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Miguel Baritto

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Presentado por los Bachilleres:

Lopardo L. Antonio M.

Torres G. Gabriel A.

Para Optar al Título

De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA

Caracas, 12 de noviembre de 2012

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

Antonio Leopardo y Gabriel Torres

Titulado: *"Modelado de la Operación Transitoria de un Deshidratador Solar para Secado de Cacao"*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. *Julio Segura*
Jurado




Prof. *Eugenio Sansone*
Jurado


Prof. *Miguel Baritto*
Tutor

"50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales"

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios por guiarme e iluminarme siempre en mis pasos, por darme fuerza, fortaleza, sabiduría.

En segundo lugar a mis padres y hermanos Alejandrina Garcia, Antonio Torres, Adriana Torres y Daniel Torres, quienes desde el mismo instante en el que se enteraron de mi existencia, lo han dado todo incondicionalmente para garantizarme una vida llena de felicidad y éxito, estaré siempre en deuda con ustedes por todo lo que me han dado hasta ahora, sobre todo por su confianza, apoyo y comprensión. Este triunfo es por y para ustedes.

En tercer lugar a mis tíos José, Enemencio y Marilene, quienes sin duda alguna y junto a mis primos, hoy día comparten con gran felicidad las metas que he logrado en la vida, mil gracias a todos por su apoyo, paciencia y comprensión.

Gabriel A. Torres G.

DEDICATORIA

A mis padres Liliana Lara y Arcangelo Lopardo, por guiarme y aconsejarme en cada instante de mi vida, a mis hermanas que sin sus ejemplos no hubiese llegado al final de esta etapa, estaré siempre en deuda con ustedes por todo lo que me han dado hasta ahora, sobre todo por su confianza, apoyo y comprensión. Este triunfo es por y para ustedes.

Antonio M. Lopardo L.

AGRADECIMIENTOS

Fueron muchas las personas que de manera directa e indirecta, ayudaron no solo a la realización de este trabajo especial de grado, si no a mi formación profesional. A todas esas personas mil gracias.

Gabriel A. Torres G.

AGRADECIMIENTOS

Fueron muchas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo especial de grado, principalmente a mis profesores Miguel Baritto y Johane Bracamonte que pasaron de ser instructores académicos a colegas profesionales y amigos.

A Felix Nieto, que sin sus grandes consejos a la hora de programar y sus bromas no hubiera sido tan fácil realizar este proyecto.

Johanna Valles por soportar y acompañarme, sin su apoyo, consejos y grandes conocimientos de Microsoft Word, que permitieron la realización de este trabajo especial de grado.

Y en especial a todos mis compañeros tesistas Yoana, Maikel, Carlos, Hebert, Geanfranco, Johanna, Alan, Mariana, Angel, Freddy, Jesus (chicho), Victor (chino), Wissan y muchos más que compartieron conmigo este trayecto, a esos que olvide también muchas gracias.

Antonio M. Lopardo L.

RESUMEN

Lopardo L. Antonio M., Torres G. Gabriel A.

MODELADO DE LA OPERACIÓN TRANSITORIA DE UN DESHIDRATADOR SOLAR PARA SECADO DE CACAO

**Tutor académico: Prof. Miguel Baritto. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012, 100p**

Palabras claves: deshidratador, colector solar, cacao, energía solar

El presente trabajo tiene por objeto desarrollar un modelo matemático de un deshidratador solar para cacao con la finalidad de proporcionar una herramienta numérica, capaz de abarcar todas las variables existentes en el proceso de deshidratación de cacao.

El trabajo abarca todo el proceso de deshidratación de cacao, partiendo de la predicción de radiación solar en una superficie horizontal o inclinada, seguido por el cálculo de los diferentes factores y coeficientes involucrados en el calentamiento del aire dentro de un colector solar plano y finalizando con el cálculo de la rata de extracción de humedad en el cacao. Para la predicción de la radiación solar en un día completo, se dio uso del modelo matemático propuesto por Liu y Jordan en 1963 llamado modelo de cielo isotrópico, el cual predice la radiación solar en un instante determinado de tiempo. Luego, basado en el balance de energía dentro de tres volúmenes de control, se dio uso del modelo propuesto por Lammardo A. y Baritto M. en el 2010 el cual predice el comportamiento de un colector solar en el que el fluido de trabajo es aire atmosférico. Por último, y ya conocidas las propiedades del aire a la salida del colector a lo largo del día en estudio, se puede predecir la rata de extracción de humedad de la semilla de cacao basándonos en la cinética de secado del mismo, propuesta por Villamizar F. y Hernandez J. en 1989, dando a lugar a la construcción final de un modelo matemático de deshidratador solar para cacao.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA PRINCIPAL	i
PORTADA SECUNDARIA	ii
ACTA	iii
DEDICATORIA	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2. ANTECEDENTES	4
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.3.1. Objetivo general	8
1.3.2. Objetivos específicos	8
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1. CACAO	9
2.1.1. Características del fruto.....	11
2.1.2. Características de la semilla.....	12
2.2. ZONAS PRODUCTORAS DE CACAO EN VENEZUELA.....	13

2.3.	DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS.	14
2.3.1.	Mecanismos de eliminación de agua.....	16
2.3.1.1.	Eliminación del agua por vía mecánica.	16
2.3.1.2.	Eliminación del agua por vía térmica.	17
2.3.2.	Descripción del proceso de secado o deshidratación	18
2.3.2.1.	Etapa de pre-calentamiento:.....	19
2.3.2.2.	Etapa de velocidad constante:.....	20
2.3.2.3.	Etapa I de velocidad decreciente:	23
2.3.2.4.	Etapa II de velocidad decreciente:	23
2.4.	ENERGÍA SOLAR	24
2.4.1.	Uso de la energía solar	26
2.4.2.	Tipos de secador solar.....	28
2.4.2.1.	Secador solar directo.....	28
2.4.2.2.	Secador solar indirecto.....	29
2.4.3.	Colector solar plano	30
2.4.3.1.	Descripción general de un colector solar plano	31
2.4.3.2.	Ventajas y desventajas de un colector solar plano para calentamiento de aire.....	32
CAPITULO III.....		34
MODELOS MATEMÁTICOS		34
3.1.	MODELO MATEMÁTICO DE RADIACIÓN SOLAR.....	34
3.1.1.	Radiación Solar Extraterrestre	34
3.1.2.	Modelo de cielo isotrópico.....	36
3.1.3.	Solución del modelo.....	39
3.2.	MODELO MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR.....	39
3.2.1.	Balance de energía (placa cubierta).	40
3.2.2.	Balance de energía (placa de absorción).....	43
3.2.3.	Balance de energía (flujo másico del aire).....	45

3.2.4.	Solución del modelo.....	46
3.3.	MODELO MATEMÁTICO DE LA CAMARA DE SECADO	47
3.4.	PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN EL SECADOR SOLAR	53
3.4.1	Pérdidas de presión en el colector solar	53
3.4.2	Perdidas de presión en la cámara de secado.....	54
3.5.	PRESIÓN DEL AIRE DENTRO DEL SISTEMA	56
CAPITULO IV	57
METODOLOGÍA DE LA PROGRAMACIÓN.....	57
4.1.	MÓDULO DE IRRADIACIÓN.....	59
4.2.	MÓDULO DEL COLECTOR SOLAR	61
4.3.	MÓDULO DE LA CAMARA DE SECADO	64
CAPITULO V	66
VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
5.1.	VALIDACION- MODELO DE IRRADIACIÓN.....	66
5.2.	VALIDACIÓN-MODELO DEL COLECTOR.....	72
5.3.	VALIDACIÓN-MODELO DE LA CÁMARA DE SECADO	75
CAPITULO VI	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
6.1.	MODELO DE IRRADIACIÓN	89
6.1.1.	Conclusiones.	89
6.1.2.	Recomendaciones.....	89
6.2.	MODELO DEL COLECTOR SOLAR	90
6.2.1.	Conclusiones.	90
6.2.2.	Recomendaciones.....	90
6.3.	MODELO CÁMARA DE SECADO	91
6.3.1.	Conclusiones	91
6.3.2.	Recomendaciones.....	91

NOMENCLATURA.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Factor de reflectividad del suelo (Geosol 2012).....	37
Tabla 3.2. Constantes para el cálculo del índice de claridad en diferentes estaciones de Venezuela (Almorox 2008).....	38
Tabla 5.1. Datos piranómetro del día (24/10/2012)	70
Tabla 5.2. Datos piranómetro del día (26/10/2012)	71
Tabla 5.3. Datos de entrada del secador solar	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Frutos de varias especies del género <i>Theobroma</i> (Reyes 2000).....	11
Figura 2.2. Parte interna del cacao (Vivas 2005)	12
Figura 2.3. Isoterma de equilibrio de almidón de yuca (Moreno 2008)	16
Figura 2.4. Esquema de deshidratación en capa delgada. (Domínguez 1983).....	18
Figura 2.5. Curva de secado a 50°C de pulpa de cupuacu (<i>Theobroma grandiflorum</i>) en rodajas (Giraldo 2012).....	19
Figura 2.6. Etapa de velocidad de secado constante. Pulpa de cupuacu (<i>Theobroma grandiflorum</i>) en rodajas a 50°C (Giraldo 2012).	21
Figura 2.7. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado. Curvas de secado de pimiento rojo a diferentes temperaturas (Vega 2005).....	22
Figura 2.8. Influencia de la velocidad del aire en la velocidad de secado. Cinética del secado de Lúcumá. (Barrena 2009).....	22
Figura 2.9. Periodos de velocidad decreciente para pulpa de Lúcumá a 60°C y tres velocidades de aire (Barrena 2009).....	24
Figura 2.10. Calentador solar termosifónico con colector tipo caja plana y termotanque de almacenamiento. (Mundo Solar 2012).	27
Figura 2.11. Secador solar directo.....	29
Figura 2.12. Secador solar indirecto de convección natural	30
Figura 2.13. Dibujo esquemático de un colector solar plano.....	32
Figura 3.1. Colector solar de placa plana (Lammardo 2010).....	40
Figura 3.2. Balance de energía de la placa cubierta.	41
Figura 3.3. Balance de energía de la placa de absorción.	43
Figura 3.4. Circuito equivalente.....	44
Figura 3.5. Balance de energía del flujo másico de aire.	45
Figura 3.6. Esquema representativo del comportamiento de la temperatura del aire.	46
Figura 3.7. Representación esquemática de secado de una capa delgada de cacao. (Villamizar 1989).....	48

Figura 3.8. Gráfico para determinar la fracción de huecos del lecho, en función de la esfericidad de la partícula ϕ (Levenspiel 1998).	55
Figura 3.9. Tabla para determinar la esfericidad y redondez de una partícula. (Santamarina 2004).	55
Figura 4. 1. Esquema general de la programación.	58
Figura 4.2. Esquema de la programación aplicada al modelo de Irradiación solar sobre una superficie.....	59
Figura 4.3. Esquema de la programación aplicada al modelo de Irradiación solar sobre una superficie.....	60
Figura 4.4. Esquema de la programación aplicada al modelo del Colector solar.	62
Figura 4.5. Datos de entrada-módulo del colector solar, formato txt.	63
Figura 4.6. Esquema de la programación, aplicada al modelo de Cámara de secado. 64	
Figura 4.7. Datos de entrada-módulo cámara de secado, formato txt.	65
Figura 5.1. Irradiación solar (Latitud: 10° 30'0''; Longitud: 66° 54'0''; 920msnm). Fecha: 24/10/2012.	67
Figura 5.2. a) Foto 24/10/2012 9:00 a.m. b) Foto 24/10/2012 1:00 p.m.	68
Figura 5.3. Irradiación solar (Latitud: 10° 30'0''; Longitud: 66° 54'0''; 920msnm). Fecha: 26/10/2012.....	68
Figura 5.4. a) Foto 26/10/2012 9:00 a.m. b) Foto 26/10/2012 11:00 a.m.....	69
Figura 5.5. Flujo másico de 0.009 [kg/seg].....	72
Figura 5.6. Flujo másico de 0.017 [kg/seg].....	73
Figura 5.7. Flujo másico de 0.026 [kg/seg].....	74
Figura 5.8. Comparación de isotermas experimentales con las obtenidas numéricamente. Ec. (3.44). (Villamizar 1989).	75
Figura 5.9. Validación de la ecuación (3.44).	76
Figura 5.10. Comparación de isotermas experimentales con las obtenidas numéricamente. Ec. (3.43). (Villamizar 1989).	77
Figura 5.11. Validación de la ecuación (3.43).	78
Figura 5.12. Temperatura del aire a la salida del colector.	80

Figura 5.13. Temperatura del aire a la salida de las bandejas, Liu-Jordan.	81
Figura 5.14. Temperaturas del aire a la salida de las bandejas, datos reales de irradiación.	81
Figura 5.15. Temperatura de salida del aire en las bandejas obviando periodo irregular.	83
Figura 5.16. Humedad relativa del aire a la salida de cada bandeja, Liu-Jordan.	84
Figura 5.17. Humedad relativa del aire a la salida de cada bandeja, datos reales de irradiación.	84
Figura 5.18. Humedad del cacao en cada instante de tiempo, Liu-Jordan.	86
Figura 5.19. Humedad del cacao en cada instante de tiempo, datos reales de irradiación.	86
Figura 5.20. Rapidez de secado para cada bandeja, Liu-Jordan.	87
Figura 5.21. Rapidez de secado para cada bandeja, datos reales de irradiación.	87

INTRODUCCIÓN

El proceso seguido tradicionalmente por los pequeños y medianos productores venezolanos para la deshidratación de muchos productos agrícolas, principalmente cacao, consiste en tender los productos a la intemperie a fin de exponerlos a la irradiación solar directa. Las principales desventajas de éste método son las grandes extensiones de terreno necesarias, la vulnerabilidad de los productos ante el ataque de insectos, plagas y aves, y la interrupción del proceso de secado por motivo de lluvia. Además, dicho método no es capaz de cuantificar, controlar ni predecir matemáticamente la cantidad de tiempo que los productos deben ser expuestos a la intemperie para lograr obtener las condiciones óptimas de comercialización.

Mediante la optimización del proceso de deshidratación se puede ayudar y respaldar el desarrollo de los productores agrícolas, por lo cual es necesario establecer un método que sirva para distintas condiciones tanto ambientales como de producción. Es necesario desarrollar un modelo matemático que abarque todas las variables que afecten en el proceso de deshidratación.

Ante esta situación se desarrolló el presente Trabajo Especial de Grado que consiste en el modelado matemático de un deshidratador solar de uso agrícola, que permitirá el diseño y construcción del mismo, con el fin de reducir las desventajas propias del actual proceso de secado seguido por pequeños y medianos productores.

Este trabajo pertenece a una línea de investigación del Departamento de Energética de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, y se encuentra enmarcado en un proyecto macro que consta de tres partes: modelado, diseño y construcción de un deshidratador solar, siendo ésta la primera de ellas.

La estructura del presente trabajo consiste de VI capítulos. El capítulo I es el planteamiento del problema y trata sobre la justificación por la cual se realizó el trabajo, antecedentes y los objetivos planteados. El capítulo II es el marco teórico en el que se sustenta el trabajo. Capítulo III es el modelo matemático y trata sobre la formulación detallada empleada en el trabajo. El capítulo IV es la metodología del programa y trata sobre diagramas esquemáticos que explican el funcionamiento de la programación empleada para resolver las ecuaciones del capítulo III. Luego se tiene el capítulo V el cual es validación y análisis de resultados y trata sobre la comparación entre los resultados obtenidos mediante los modelos matemáticos e información experimental. Finalmente, se tiene el capítulo VI el cual es conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. JUSTIFICACIÓN

En la producción agrícola venezolana, los procesos de secado y deshidratación son utilizados para la preservación de los productos durante el almacenamiento y/o forman parte del procesamiento que debe someterse antes del consumo. En Venezuela estos procesos presentan grandes desventajas inherentes a la poca tecnificación a nivel de pequeños y medianos productores, es por ello que el uso de tecnologías termosolares para la deshidratación de estos productos surge como una solución sustentable, ya que en Venezuela, por presentar un clima tropical, posee un potencial solar importante.

La búsqueda de una solución que abarque los procesos productivos de pequeños y medianos productores agrícolas es el objetivo principal de este proyecto de desarrollo de tecnología termosolar. Con lo cual se quiere fomentar la aplicación de sistemas de deshidratación solar energéticamente eficientes en comunidades agrícolas organizadas con mínimo impacto ambiental.

El uso de este tipo de tecnologías agroindustriales constituye uno de los objetivos en la investigación de tecnologías termosolares con el cual se puede lograr un desarrollo que permita la sustitución de la mayoría de los procesos de deshidratación a pequeña y mediana escala utilizados actualmente en Venezuela.

La mayoría de los procesos actuales presentan una dependencia total a los factores climatológicos, ya que el producto que se encuentra desprotegido, puede ser afectado por las lluvias y ataques por parte de aves e insectos. Para poder controlar el proceso y desarrollar un mejor y más eficiente método de deshidratación, es necesario

contar con modelos matemáticos predictivos que permitan conocer el desempeño de un deshidratador solar bajo ciertas condiciones climatológicas. Entre los factores que afectan el proceso están los rangos de temperatura, la irradiación solar de la región, las precipitaciones, la humedad relativa de la zona, el viento, entre otros. Cabe destacar, que el desarrollo de este modelo predictivo matemático, permitirá la optimización del proceso de deshidratación de diversos productos agrícolas y en diversas localidades, y obtener así el mejor dimensionamiento de un deshidratador solar que sea capaz de mejorar los problemas existentes bajo el método tradicional.

Por ser el cacao un producto agrícola estratégico para Venezuela, ya que representa no solo el sustento de muchas comunidades rurales, sino también aporta un producto de exportación cotizado a nivel mundial, se ha seleccionado este producto como objetivo para el desarrollo del presente trabajo.

1.2. ANTECEDENTES

El uso de la energía solar según relatos se remonta al año 212 A.C., cuando Arquímedes mediante mecanismos elaborados atacó con un rayo de luz a una flota romana, quemando algunas de sus naves. Desde ese entonces no se creyó que la energía solar se perfilaría como la fuente que sustentará a las generaciones futuras.

En el campo agrícola, se han utilizado invernaderos solares, secadores agrícolas, plantas de purificación o desalinización de agua de mar; los cuales se denominan sistemas de aprovechamiento térmico ya que el calor recogido en estos sistemas se recolecta y se destina a satisfacer numerosas necesidades.

Los colectores solares son dispositivos diseñados para captar la radiación solar, transformarla en energía térmica y así elevar la temperatura de un fluido. Esto facilita, por ejemplo, el calentamiento del aire para su aprovechamiento en la deshidratación de diversos productos agrícolas, de manera eficiente y económica. Es

por ello que el uso del colector solar con fines agrícola ha despertado el interés de diversos investigadores, enfocados en la comprensión y mejoramiento del deshidratador solar.

A continuación se presenta una breve revisión bibliográfica con la intención de ilustrar el trabajo que se ha desarrollado en materia de modelado de colectores y deshidratadores solares en diferentes partes del mundo.

En 1995 se presentó un modelo matemático teórico para predecir el comportamiento térmico de un colector solar plano, en el cual no se recurrió a las derivadas de ecuaciones complicadas. La solución matemática de este modelo implicaba realizar una inversión de la matriz de temperatura media, obtenida por las ecuaciones de energía. (Ong 1995).

En el 2004, se construyó un prototipo de calentador solar de aire en el que se midieron la temperatura de la placa de absorción, temperatura de la superficie selectiva, velocidad de entrada de aire al calentador solar por convección natural. Se desarrolló un modelo matemático del calentador solar de aire bajo los principios de convección natural para flujo de aire, con la finalidad de obtener una longitud óptima del mismo. Se diseñó un deshidratador de cacao el cual consta de un calentador solar de aire y una cámara de secado donde se realiza el proceso de disminución de humedad de las muestras de cacao. Según el diseño propuesto, en 0.9 m^2 mediante el uso del deshidratador indirecto de cacao se secan 10 Kg de cacao en 4 días (Larios 2004).

A mediados del 2004 se planteó un modelo transitorio de análisis para diferentes tipos de inclinación del calentador solar de aire incorporado con un almacenamiento térmico (Jain 2004). El funcionamiento de este dispositivo se evaluó para el secado de la cosecha de arroz. Se llevó a cabo un estudio paramétrico durante un día completo, en el cual se observó el efecto de cambio de ángulo de inclinación de longitud, la amplitud de una velocidad de flujo másico y la temperatura del grano.

Este modelo matemático es útil para evaluar el rendimiento térmico para el secado de granos, también es útil para predecir la cantidad de humedad en el grano, la humedad del aire y la velocidad de secado.

Luego en el 2006 se diseñó un secador de granos de cacao que funciona con energía solar mediante la implementación de un sistema de colectores solares planos que transforman la energía solar en energía térmica (Poveda 2006). Con el propósito de alcanzar una temperatura de secado de 50° C, los colectores solares poseen dos cubiertas transparentes. En ese trabajo se determinaron diversos factores de gran importancia que hay que tomar en cuenta al momento de procesar los granos de cacao:

a) Con temperaturas superiores a 60° C se corre el riesgo de generar cambios internos en el producto que tienden a disminuir su calidad como el aumento de la acidez.

b) En el proceso de secado la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción y convección. Debido a estos y otros factores, el diseño propuesto utiliza dos ventiladores que impulsan el aire a través de los colectores solares en donde aumentará su temperatura y con ello, lograr una convección forzada.

Posteriormente en el 2007 se presentó la construcción de un secador solar en el que se realizaron ensayos de secado de frutos tropicales y se desarrolló un modelo matemático simplificado del proceso (Costa 2007). Se empleó un sistema de adquisición de datos y control de temperatura de secador, usando energía solar y convección forzada de aire. El sistema es complementado, para emergencia, con resistencias eléctricas. Se realizaron experimentos de secado de cambur en rodajas, obteniéndose sus pesos y contenidos acuosos en función del tiempo. Se realizó el modelado matemático del proceso de secado, con la ecuación de transferencia de materia, obteniéndose la difusividad del agua en los frutos. Los valores obtenidos concuerdan con datos de la literatura y pueden ser empleados en el diseño preliminar

del secador. El sistema estudiado entrega información para calcular la cantidad de agua evaporada del alimento para una determinada temperatura promedio del secador solar, la potencia y el tiempo necesarios para el secado.

En el 2010, se presentó un modelo matemático unidimensional que describe el comportamiento de un colector solar de placas planas inclinadas para calentamiento de aire, basado en la simplificación y solución de la ecuación de conservación de energía, y de las relaciones de clausura necesarias para describir los fenómenos de transferencia de calor presentes durante la operación de estos equipos (Lammardo 2010). El modelo planteado permite conocer la distribución espacial y temporal de temperaturas en los elementos que componen un colector solar de placas planas inclinadas. La solución del modelo se obtuvo numéricamente mediante un método de diferencias finitas que llevó a resolver iterativamente un sistema de ecuaciones no lineales y así determinar predicciones razonables acerca del comportamiento de un colector solar de placas planas para el calentamiento de aire.

Luego en el 2011 se realizó una predicción de la distribución de temperatura en un calentador de aire solar con placa plana, este modelo viene presentado de manera adimensional y resuelto para una gran gama de condiciones de flujo turbulento (Baritto 2011). Se realiza un estudio paramétrico y la temperatura de salida se propone como una función de relaciones geométricas y del flujo másico. La ecuación propuesta muestra una buena aproximación con respecto a los datos experimentales. Este trabajo presenta una gran ventaja a la hora del proceso de diseño ya que permite evaluar cual configuración entre relación de aspecto y flujo de aire es el más eficiente.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático de un deshidratador solar para cacao.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica para precisar distintos modelos de colectores solares y cámaras de deshidratación.
2. Realizar una revisión bibliográfica para determinar modelos adecuados de distribución temporal de irradiación a partir de coordenadas geográficas, de transferencia de calor, de transferencia de masa y de efectos de la fricción viscosa.
3. Formular las ecuaciones de balance de masa y energía para cada elemento del sistema de deshidratación.
4. Resolver el modelo para distintos datos de características geométricas del sistema de deshidratación, condiciones meteorológicas y distribución temporal de irradiación solar típicos en zonas productoras de cacao en el país.
5. Validar el modelo con data experimental disponible.
6. Encontrar el consumo de potencia, humedad retirada y tasa de deshidratación instantánea, a partir de las características geométricas del sistema, condiciones meteorológicas del ambiente y distribución temporal de irradiación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. CACAO

El árbol del cacao, o cacaotero, es una planta perenne que rinde varias cosechas al año. El fruto de esta planta recibe el nombre científico de *Theobroma cacao* L. que significa "alimento de los dioses", y proviene del griego. Al *Theobromae* se le encuentra en los pisos inferiores de las selvas húmedas de América tropical, generalmente a una altura inferior a los 1.400 metros sobre el nivel del mar. Esta planta necesita, para su desarrollo, temperaturas medias anuales elevadas, una alta humedad relativa del aire y una cubierta arbórea que la proteja de la insolación directa y de la evaporación. Las semillas del *Theobroma* son ricas en almidón, proteínas, materias grasas y otros elementos que le confieren un valor nutritivo real. Su contenido de Theobromina 1,5 a 3,0%, unido a la presencia de cafeína, les da un sabor aromático particular (Reyes 2000).

Las semillas de la mayoría de las especies del género *Theobroma* pueden servir, al igual que *T. cacao* L., para la preparación de chocolate; y algunas de ellas proporcionan chocolates de muy buena calidad. La pulpa azucarada y acidulada que las rodea puede igualmente consumirse, y es utilizada para la preparación de bebidas naturales refrescantes y en dulcerías (Reyes 2000).

Entre las especies más conocidas y utilizadas se pueden nombrar:

T. bicolor: cultivado en muchos países de América tropical, desde el sur de México hasta Brasil; la pulpa de las semillas se usa en la preparación de bebidas

refrescantes; y cuando las almendras son mezcladas y procesadas con cacao dan origen a un chocolate aceptable, pero muy amargo.

T. angustifolium: cultivado en América Central, conocido como cacao silvestre, no tiene valor comercial.

T. grandifolium: cultivado en los estados de Pará y Marañón, en Brasil, y en Venezuela. Con su pulpa se prepara una bebida refrescante conocida como “cupuasú”.

T. gileri: existe en estado salvaje en el oeste de Colombia, oeste de Venezuela y norte de Ecuador.

T. glaucum: conocido como “cacao de monte”, presente en la Amazonia de Venezuela, Colombia, Brasil, Perú y Ecuador.

T. cirmolinae: se le ha encontrado en la vertiente pacífica de la Cordillera de los Andes, entre 800 y 1.300 m de altitud.

T. simiarum: reportado hasta ahora sólo en Costa Rica.

T. subincanum: presente en Brasil, Colombia y Venezuela.

A pesar de las veintidós especies conocidas de *Theobroma*, la única cultivada para la producción comercial de granos destinados a la preparación de chocolate o a la extracción de manteca de cacao, es la conocida como *Theobroma cacao* L. Frutos de varias especies pertenecientes a este género se muestra en la Figura 2.1.

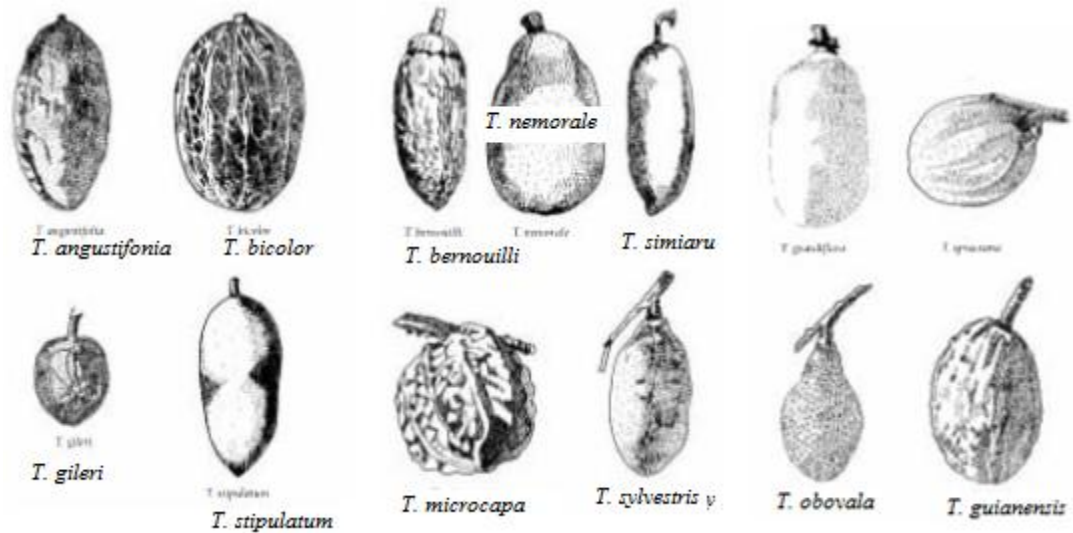


Figura 2.1. Frutos de varias especies del género *Theobroma* (Reyes 2000)

2.1.1. Características del fruto.

Llamado comúnmente mazorca, tiene una gran variedad de formas, desde alargadas hasta casi redondas; presenta surcos en su superficie, la cual puede cambiar desde muy rugosa hasta completamente lisa. El color puede variar entre el blanco, varios tonos de verdes y rojos cuando son jóvenes. Al madurar, la coloración varía entre el amarillo, rojo naranja y rojo oscuro. El fruto cuando es joven presenta cinco compartimientos rellenos de granos; pero al madurar, las paredes de las cámaras desaparecen, quedando una cavidad única repleta de granos cubiertos de una pulpa mucilaginosa. El número de semillas por fruto varía según las especies, desde 25/30 en los Criollos, hasta 60 o 70 en algunos Forasteros Amazónicos.

En la Figura 2.2 se muestra el corte longitudinal de la mazorca de cacao y las semillas cubiertas por pulpa mucilaginosa de color blanco.



Figura 2.2. Parte interna del cacao (Vivas 2005)

El período comprendido entre la fecundación y la madurez del fruto va desde los 5 hasta los 7 meses. El peso de una mazorca madura varía entre 150 g y 1.000 g, aunque el peso promedio es de 400 g, por lo general.

El índice de mazorca se refiere al número de frutos necesarios para obtener 1 kg de cacao seco. Los Criollos poseen un índice de mazorca de 9 frutos por kilo de cacao seco, mientras que algunos Amazónicos presentan un índice de 30-35 frutos/kg de cacao seco (Vivas 2005).

2.1.2. Características de la semilla.

Cada semilla se encuentra cubierta por una pulpa mucilaginosa de color blanco y de sabor agradable, su longitud puede variar de 15 a 30 mm, el ancho de 8 a 20 mm y el grosor de 5 a 15 mm. Se le denomina comúnmente "almendra". Constituye la materia prima fundamental para la elaboración del chocolate. El color

de los cotiledones frescos va desde el blanco en los Criollos hasta el morado intenso en los Forasteros Amazónicos (Vivas 2005).

2.2. ZONAS PRODUCTORAS DE CACAO EN VENEZUELA.

La producción cacaotera está concentrada en tres regiones, que involucran a su vez 12 entidades federales: región Nororiental (Sucre, Monagas y Delta Amacuro), región Centro-norte-costera (Miranda, Aragua, Carabobo y Yaracuy) y la región Suroccidental (Apure, Barinas, Táchira, Mérida y Zulia). Cada una de las regiones señaladas posee características específicas, así como particularidades referidas al material genético, manejo de las plantaciones, tenencia de la tierra y problemas fitosanitarios (Vivas 2005).

- **Región Nororiental:** comprende los estados Sucre, Monagas y Delta Amacuro, siendo el estado Sucre, el principal productor de esta región con 49% de producción, específicamente en la península de Paria (El Pilar, Yaguaraparo, Río Caribe, Irapa, Güiría y Carúpano. En Sucre se localizan unidades ecológicas de bosque húmedo tropical, mientras que en Monagas y Delta Amacuro las unidades ecológicas predominantes son el bosque seco tropical, con asociaciones edáficas húmedas y el bosque húmedo tropical, con suelos aluviales fértiles.

- **Región Centro-norte-costera:** esta región está integrada por los estados Miranda, Aragua, Carabobo y Yaracuy. El estado Miranda es el principal productor no sólo de esta región, si no del país, con 40% de la producción nacional. En cuanto a las unidades ecológicas se tiene que en el estado Aragua, fundamentalmente es el bosque seco tropical, con precipitación muy irregular; mientras que en los estados Carabobo y Yaracuy se encuentran el bosque húmedo tropical y el bosque seco

premontano, con precipitación media anual entre 550 y 1.000 mm, y con temperatura media anual entre 18 y 24°C.

- Región Sur Occidental: constituida por los estados Táchira, Apure, Barinas, Mérida y Zulia; si bien es la zona que menor cantidad produce (11% del total nacional). La importancia de esta zona radica en su gran potencial agroecológico y en la alta calidad de los cacaos que allí se cultivan, como el Porcelana y otros Criollos. Existen dos unidades ecológicas: el bosque seco tropical, (en localidades de estado Zulia, Santa Bárbara, El Vigía y orillas del río Catatumbo), y el bosque húmedo tropical, (en los estados Mérida y Táchira). Los suelos son aluviales mixtos, recientes, profundos y de gran fertilidad. (Vivas 2005).

2.3. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS.

La deshidratación de alimentos es el método más antiguo de conservación de los productos perecederos. La utilización del sol para reducir el contenido de agua de un producto, es el procedimiento más ancestral y menos costoso de conservación. Diversos autores indican que en el paleolítico, hace 400.000 años, se secaban al sol alimentos, carnes y pescados especialmente. Hoy todavía se utiliza en la deshidratación de frutas: higos, uvas, melocotones, etc. (Vanaclocha 2003).

En la actualidad existen numerosos métodos o procesos para deshidratar alimentos y estos pueden ser evaluados desde el punto de vista de eficiencia energética, tiempo de secado, calidad del producto terminado, entre otros, dependiendo de los requerimientos del mercado. El equilibrio entre estos factores es requerido para alcanzar el objetivo en los procedimientos de fabricación al tiempo que garantiza alimentos con los estándares de calidad que pide el consumidor final (Dong Chen 2008).

Con la deshidratación de un producto se consigue un incremento en las posibilidades de conservación y una gran reducción de peso, hasta una quinta parte, cuando se trata de raíces y tubérculos y hasta quince veces menor en vegetales de hoja. Estos son los factores más importantes que aconsejan el uso de este proceso, puesto que además de conseguir la conservación del alimento asegura una reducción sustancial de los costos de almacenamiento y/o transporte (Vanaclocha 2003).

La eliminación del agua de un alimento presenta dos problemas importantes: por una parte, el riesgo de alteración de la calidad nutricional y sobre todo organoléptica del producto tratado y por otra, un consumo notable de energía. La falta de selectividad de la eliminación de agua puede producir pérdidas de aromas, más volátiles que el agua, sobre todo si se realiza al vacío. (Vanaclocha 2003).

Todo producto alimenticio contiene simultáneamente varias formas de agua: agua libre, agua débilmente ligada y agua fuertemente ligada, estas últimas están retenidas a las moléculas de materia seca por fuerzas relativamente importantes (Camacho 2004).

Durante el proceso de deshidratación, inicialmente se eliminan las moléculas de agua menos ligadas, la fracción que se extrae en último lugar corresponde a las moléculas de agua de estructura, fuertemente ligadas por uniones electrostáticas a macromoléculas orgánicas del extracto seco. El agua libre se comporta como el agua pura, requiere por lo tanto para evaporarse relativamente poca energía (del orden de 2.400 kJ. kg⁻¹ de agua libre); por el contrario la evaporación del agua ligada es más difícil y requiere más energía. Por lo tanto, la cantidad de energía necesaria para evaporar la misma cantidad de agua aumenta durante el proceso de deshidratación, el último gramo de agua evaporada necesita más energía que el primero. (Vanaclocha 2003).

La gráfica que relaciona el contenido de humedad y la actividad de agua se conoce como *isoterma de equilibrio*. En la Figura 2.3 se muestran las isotermas tipo para almidón de yuca obtenidas por (Moreno 2008), en donde el contenido de humedad del almidón de yuca será menor a medida que las temperaturas aumenten.

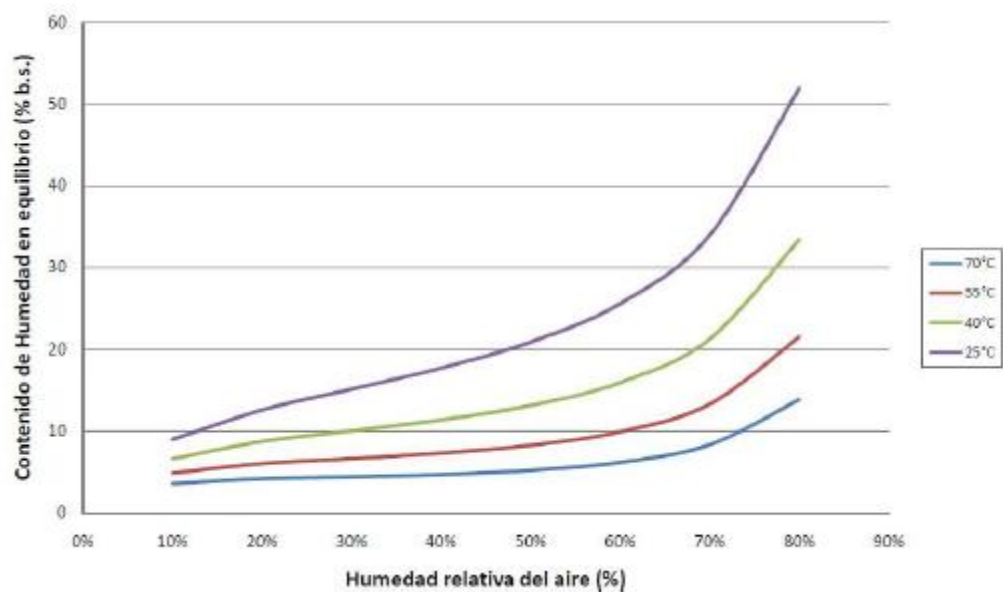


Figura 2.3. Isoterma de equilibrio de almidón de yuca (Moreno 2008)

2.3.1. Mecanismos de eliminación de agua.

La eliminación de agua en frutas o vegetales, se puede obtener por vía mecánica o vía térmica.

2.3.1.1. Eliminación del agua por vía mecánica.

La eliminación de agua por vía mecánica solo permite la separación de una parte del agua libre de los productos tratados. Ningún procedimiento mecánico

permite reducir la humedad de un producto más del 60%. Precisamente el hecho de que solo se elimine una fracción del agua no ligada, implica un menor consumo de energía en este tipo de procesos. Así mismo, con los procedimientos mecánicos no se elimina agua pura, sino que se trata de una dispersión o de una solución más o menos rica en extracto seco. (Vanaclocha 2003).

2.3.1.2. Eliminación del agua por vía térmica.

En este caso se trata esencialmente de una operación de transferencia de masa, que requiere una “activación” previa del agua por una cierta cantidad de energía aportada por una transferencia de calor. (Vanaclocha 2003).

Dentro de las técnicas de eliminación de agua por vía seca se tienen los métodos por ebullición y por arrastre. En el caso del método de eliminación de agua por ebullición se debe llevar el producto hasta una temperatura suficiente para que la presión de vapor del agua del producto sea igual a la presión ambiente. En este caso el calor se aporta al producto por conducción a través de una superficie caliente, por convección a partir de vapor de agua recalentado o por el uso de radiaciones. El agua evaporada del producto rodea la superficie del mismo en forma de una atmósfera de vapor de agua pura. (Vanaclocha 2003).

En el método de eliminación del agua por arrastre, la energía es aportada generalmente por aire caliente, cuya presión parcial de agua es inferior a la presión de vapor de agua en el producto.

Entre los procedimientos descritos el de eliminación del agua por ebullición es energéticamente menos costoso, pero los métodos de ebullición y arrastre, son los únicos que permiten una eliminación completa de agua sin alterar excesivamente la calidad del producto tratado. (Vanaclocha 2003).

2.3.2. Descripción del proceso de secado o deshidratación

El esquema básico de deshidratación en capa delgada se muestra en la Figura 2.4. Durante cada intervalo de tiempo, el aire pasa a través de una capa delgada de producto, originando una disminución del contenido de humedad del producto en y un aumento de la humedad del aire debido a la remoción de la humedad. Simultáneamente, la temperatura del producto aumenta y la temperatura del aire disminuye consecuencia del enfriamiento evaporativo y el calentamiento del producto. (Domínguez 1983).

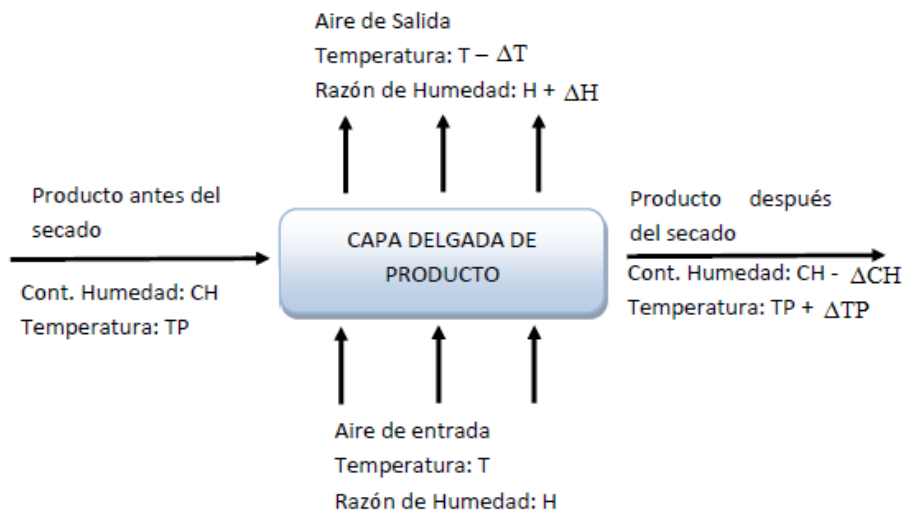


Figura 2.4. Esquema de deshidratación en capa delgada. (Domínguez 1983).

Los sistemas más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y el aire como vehículo de esta energía, por lo tanto la transferencia de calor dependerá, en este caso, de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión (Vanaclocha 2003).

El proceso de secado está normalmente dividido en tres fases: una fase inicial de precalentamiento, seguido de otra de velocidad de secado constante y una o más fases de velocidad de secado decreciente. En la Figura 2.5 se muestra la curva de secado obtenida cuando se representa el contenido de humedad contra el tiempo de secado (Vanaclocha 2003).

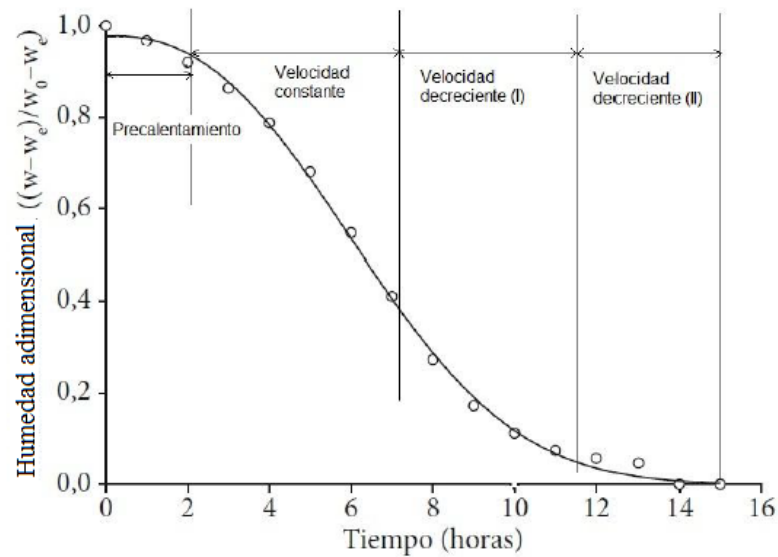


Figura 2.5. Curva de secado a 50°C de pulpa de cupuacu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas (Giraldo 2012).

2.3.2.1. Etapa de pre-calentamiento:

Esta etapa transcurre mientras el producto y el agua en él contenida se calientan ligeramente, hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo. El producto a secar al principio está frío, la presión de vapor es igualmente baja, por lo que la velocidad de transferencia de masa es muy lenta. El gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie fría del producto es elevado, por lo cual la transferencia de calor es alta. La cantidad de calor transferida a la superficie del producto es netamente superior a la cantidad de calor

arrastrada por la poca agua evaporada; existe un desequilibrio. El excedente de calor se utiliza entonces en calentar la superficie del producto, lo cual produce una disminución del gradiente de temperatura, que cesará cuando se alcance el equilibrio estacionario. Este periodo es muy corto en comparación con el tiempo total de secado. (Vanaclocha 2003).

2.3.2.2. Etapa de velocidad constante:

En esta etapa de velocidad constante durante el cual se produce una reducción importante del contenido de agua, el agua de imbibición se elimina con un flujo másico constante. La evaporación se efectúa en la superficie del producto, a temperatura constante, siendo ésta la de bulbo húmedo del aire. Durante este periodo, el flujo de calor intercambiado entre el aire y el producto se utiliza enteramente para la evaporación del agua. Este periodo continúa mientras que la superficie del producto esté alimentada por agua libre líquida desde el interior, fundamentalmente por capilaridad. En la mayoría de los casos esta etapa de velocidad de secado constante finalizará cuando el contenido medio de humedad del producto alcance el valor de la humedad crítica. Por lo tanto, en la curva de secado este periodo se deberá ajustar a una recta (la humedad crítica coincide con el punto en que la recta ajustada se separa de la curva de secado) (Figura 2.6).

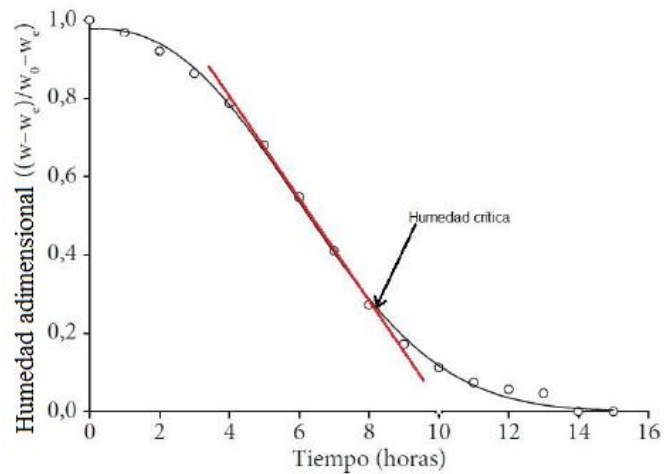


Figura 2.6. Etapa de velocidad de secado constante. Pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas a 50°C (Giraldo 2012).

La humedad crítica no es una propiedad del alimento, sino que depende del tamaño de partícula y de las condiciones del aire de secado. En el periodo de velocidad constante, el principal mecanismo de transporte de masa es el flujo capilar de agua líquida. El mecanismo interno de flujo de la humedad no afecta a la velocidad de secado en este periodo, es el entorno secante, el aire, el que impone la velocidad de secado, que se incrementa al hacerlo la temperatura (Figura 2.7). Lo mismo ocurre con la velocidad del aire de secado, cuanto mayor es ésta mayor es la velocidad del secado (Figura 2.8). (Vanaclocha 2003).

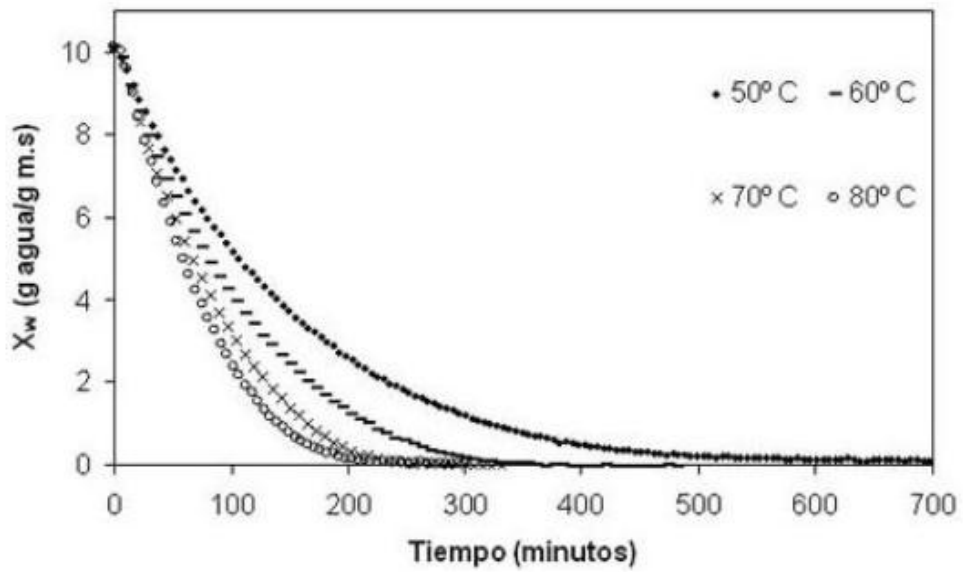


Figura 2.7. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado. Curvas de secado de pimienta roja a diferentes temperaturas (Vega 2005)

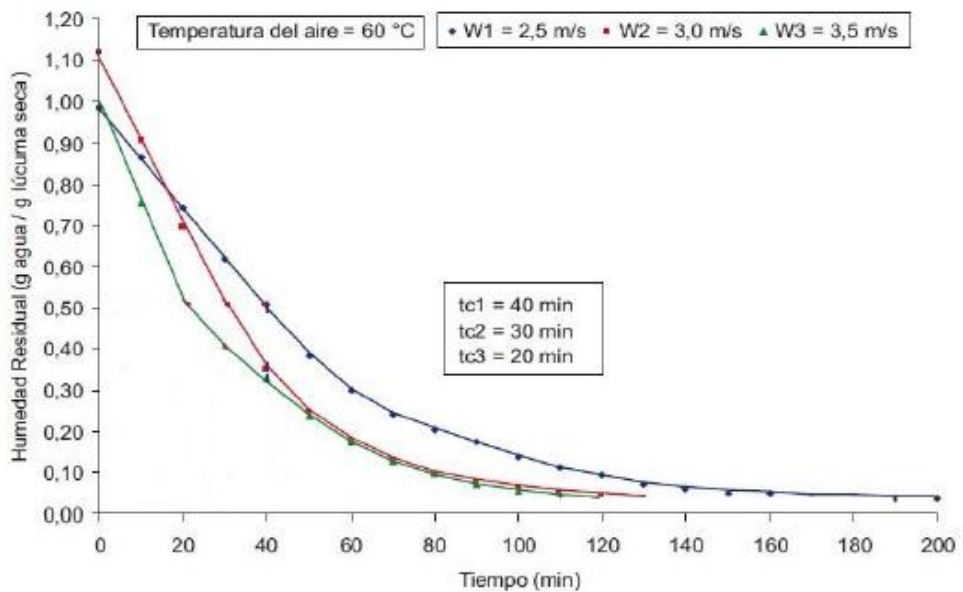


Figura 2.8. Influencia de la velocidad del aire en la velocidad de secado. Cinética del secado de Lúcumas. (Barrena 2009).

2.3.2.3. Etapa I de velocidad decreciente:

Comienza cuando la superficie del producto en contacto con el aire de secado alcanza el umbral de higroscopicidad (para los materiales higroscópicos). Desde el punto de vista macroscópico, esto corresponde a alcanzar la humedad crítica. La zona de evaporación o “frente de secado” que se encontraba en la superficie, se desplaza hacia el interior del producto. La brusca reducción de la superficie efectiva de transferencia, debida a una alimentación insuficiente de agua libre, es la causa de la disminución de la velocidad de secado. La migración del agua del interior del producto hacia su superficie es cada vez más difícil y como consecuencia la transferencia de masa se convierte en el factor limitante. Los depósitos de solutos obstruyen los poros, el agua ligada migra bajo forma de vapor y la distancia a recorrer por el frente de vapor es cada vez mayor; todos estos factores frenan rápidamente la transferencia interna de agua. En el primer periodo de velocidad decreciente, el mecanismo de transporte de masa que predomina es la difusión de vapor, desde la zona de evaporación hasta la superficie del producto. (Vanaclocha 2003).

2.3.2.4. Etapa II de velocidad decreciente:

Este periodo es llamado “periodo de velocidad final”. Este periodo sólo existe para los materiales higroscópicos. El flujo másico se reduce más rápidamente que en el periodo anterior. En este periodo, el conjunto del producto está en el dominio de la higroscopia. En el alimento no queda más que agua ligada que se evacua muy lentamente (difusión-adsorción). Esta fase se termina cuando el producto alcanza su humedad de equilibrio, que depende como es lógico, de las condiciones del aire de secado. (Vanaclocha 2003).

Los periodos de velocidad decreciente se aprecian claramente si se representa la velocidad de secado (dx/dt): variación de la humedad con respecto del tiempo) contra la humedad por encima del equilibrio (Figura 2.9). En dicha gráfica puede verse el tramo horizontal correspondiente a la velocidad constante y los tramos de velocidad decreciente. La humedad crítica coincide con el punto de intersección de la recta de velocidad constante con la del primer tramo de velocidad decreciente.

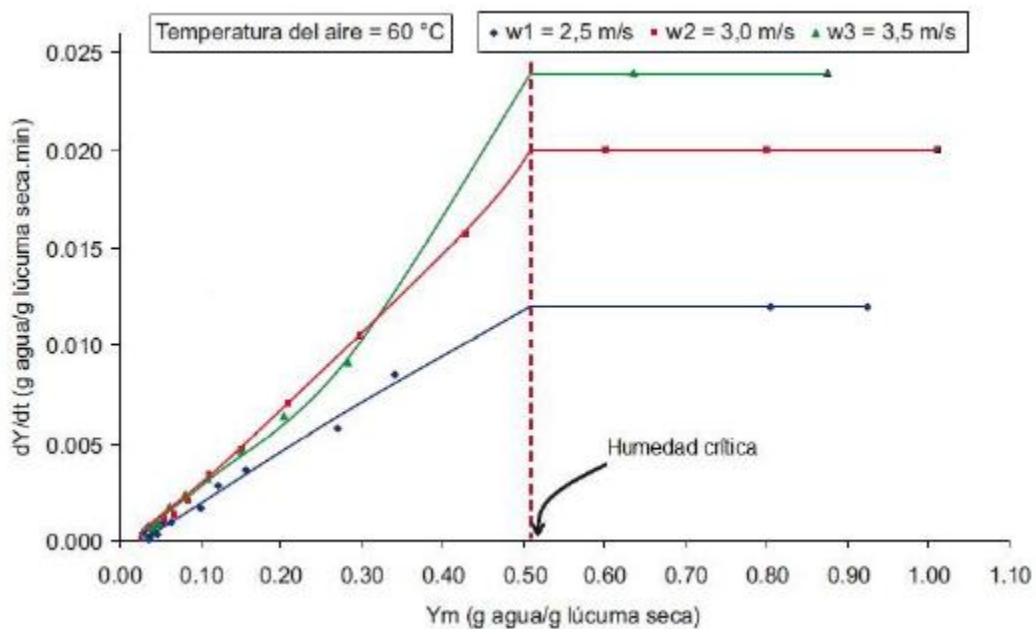


Figura 2.9. Periodos de velocidad decreciente para pulpa de Lúcum a 60°C y tres velocidades de aire (Barrena 2009).

2.4. ENERGÍA SOLAR

El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el ser humano ha utilizado desde los albores de la historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades si aprendemos cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos

cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia.

Durante el presente año, el Sol arrojará sobre la Tierra *cuatro mil veces* más energía que la que vamos a consumir. (Censolar 2012).

La actual situación eléctrica en Venezuela ha generado un intenso debate en toda la sociedad, por las grandes deficiencias del suministro eléctrico; esto ha generado propuestas alternativas nuevas de generación de energías, como son la solar y la eólica, fuentes que han tenido un gran auge en los últimos años. Actualmente en Venezuela existen varios proyectos para la implementación de este tipo de energía, en el Estado Nueva Esparta la empresa Fundaelmar tiene un proyecto para la instalación de un parque solar en las inmediaciones de la laguna de Las Marites, como un posible lugar para suministrar electricidad a toda la isla. (Periódico ecológico 2012).

Sería poco racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que pudiera liberar definitivamente a Venezuela de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

Es preciso, no obstante, señalar que existen algunos problemas que se deben afrontar y superar. Aparte de las dificultades que una política energética solar avanzada conllevaría por sí misma, hay que tener en cuenta que ésta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas.

Es de vital importancia proseguir con el desarrollo y perfeccionamiento de la todavía incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala planetaria. (Censolar 2012).

2.4.1. Uso de la energía solar

Básicamente, recogiendo de forma adecuada la radiación solar, podemos obtener calor y electricidad.

El calor se logra mediante los colectores solares, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ni en cuanto a su tecnología ni en su aplicación. (Censolar 2012).

En el sistema de aprovechamiento térmico, el calor recogido en los colectores puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades; por ejemplo, se puede obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial.

Las aplicaciones agrícolas son muy amplias. Con invernaderos solares pueden obtenerse mayores y más tempranas cosechas; los secaderos agrícolas consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar, y, por citar otro ejemplo, pueden funcionar plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible. (Censolar 2012). En la Figura 2.10 podemos observar el tamaño y la estructura que tiene uno de los modelos utilizados para calentar agua, dispositivos como este son utilizados como una solución para evitar seguir consumiendo algún tipo de combustible.



Figura 2.10. Calentador solar termosifónico con colector tipo caja plana y termotanque de almacenamiento. (Mundo Solar 2012).

Las celdas solares fotovoltaicas, dispuestas en paneles solares, ya producían electricidad en los primeros satélites espaciales. Actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas, pues, al carecer los paneles de partes móviles, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen ningún ruido en absoluto, no consumen combustible y no necesitan mantenimiento. Además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes.

La electricidad que así se obtiene puede usarse de manera directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico), o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. La electricidad fotovoltaica generada también se puede inyectar en la red general, obteniendo una buena rentabilidad económica, ya que cada vez más países priman tanto a los pequeños como a los grandes productores de electricidad fotovoltaica, dado el beneficio que aporta para el medio ambiente.

Si se consigue que el precio de los módulos solares siga disminuyendo, potenciándose su fabricación a gran escala, es muy probable que, para la tercera década del siglo, una buena parte de la electricidad consumida en los países ricos en sol tenga su origen en la conversión fotovoltaica. (Censolar 2012).

La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación. Así, un edificio bien aislado puede disponer de agua caliente y calefacción solares, con el apoyo de un sistema convencional a gas o eléctrico que únicamente funcionaría en los periodos sin sol. El coste de la energía convencional sería sólo una fracción del que alcanzaría sin la existencia de la instalación solar. (Censolar 2012).

2.4.2. Tipos de secador solar

En la actualidad, existen básicamente dos tipos de secador solar.

- Secador solar directo.
- Secador solar indirecto.

2.4.2.1. Secador solar directo

Son el tipo más sencillo de secador solar. Generalmente se utilizan para el secado de productos agrícolas, tales como frutas, forrajes y hortalizas.

En líneas generales constan de una superficie de secado cubierta por un material transparente, que protege al producto de la lluvia y favorece al efecto invernadero. El material a secar se extiende en una capa fina sobre un fondo y es expuesto directamente a la radiación solar. (Larios 2004). La Figura 2.11 muestra un secador solar directo en el cual se encuentran al mismo tiempo secando cuatro tipos diferentes de alimentos, este modelo es a pequeña escala, pero se ve claramente ejemplificado las virtudes de estos sistemas.



Figura 2.11. Secador solar directo

2.4.2.2. Secador solar indirecto

En este tipo de secador, la radiación solar no incide directamente sobre el producto a secar. El aire se calienta en un colector solar y es conducido a la cámara de secado para deshidratar el producto. El movimiento del aire a lo largo del colector solar se puede dar de dos formas. Una primera forma de movimiento del aire dentro del colector es producto de la diferencia de densidad entre el aire caliente y el aire aun sin calentar, en este caso, la transferencia de calor se produce por convección natural y se debe contar con un colector solar dispuesto de manera inclinada, de modo tal que el aire más caliente se desplace hacia la parte superior del colector, y el aire más frío permanezca en la parte inferior. Un esquema de este proceso se evidencia en la Figura 2.12.

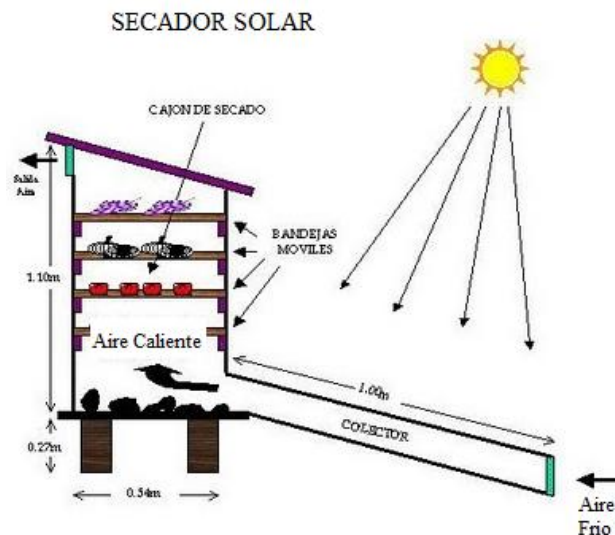


Figura 2.12. Secador solar indirecto de convección natural

La otra forma de que se produzca un caudal másico de aire dentro del colector es por medio de un ventilador, y la transferencia de calor es del tipo convección forzada

2.4.3. Colector solar plano

Un colector solar es una especie de intercambiador de calor que transforma la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido (agua o aire generalmente) que circula por los tubos o ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0,29 y 2,5 μm) y es por naturaleza variable con el tiempo. En condiciones óptimas podemos esperar como máximo, flujos de 1100 W/m². (Larios 2004).

Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares planos son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100 °C.

Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de frutas y granos. (Larios 2004).

2.4.3.1. Descripción general de un colector solar plano

La energía solar incidente, tiene que atravesar una o varias capas de vidrio o algún otro material transparente adecuado, antes de alcanzar la placa de absorción negra que es el elemento más importante del colector solar, al cual está unido el tubo o ducto. En esta placa, es donde la energía radiante es convertida en calor. Este calor, posteriormente es transferido por convección (si el fluido de trabajo es aire) o por conducción (si el fluido es agua), que es el que finalmente remueve la energía térmica del colector y la transfiere al tanque de almacenamiento térmico o al espacio o producto que va a ser calentado, según la aplicación que se le esté dando. El vidrio (superficie selectiva) o su equivalente, además de permitir la entrada de la radiación solar hasta la de absorción, sirve también para minimizar las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente por la parte superior del colector y logrando así, un efecto invernadero. (Larios 2004). En la figura 2.13 se puede apreciar un dibujo esquemático de un colector solar plano.

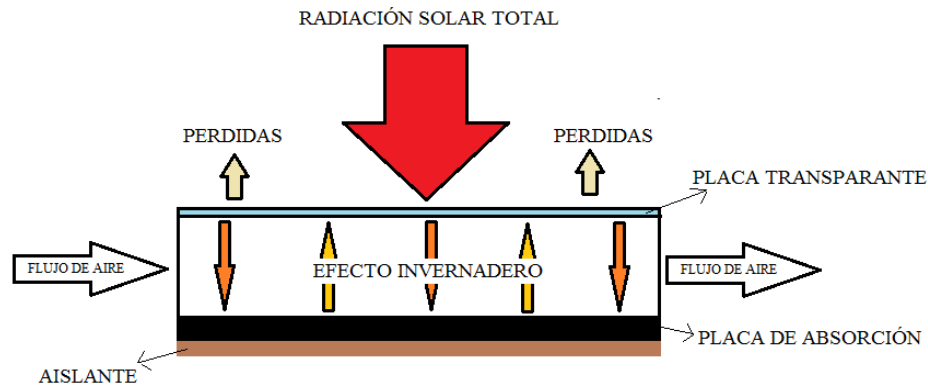


Figura 2.13. Dibujo esquemático de un colector solar plano

Por otra parte, un colector solar plano suele estar cubiertos de aislantes térmicos (espuma de poliuretano, poliestireno, lana de fibra de vidrio o algún otro) colocados en la parte posterior y lados del colector, disminuyendo también las pérdidas de calor hacia el medio ambiente en esas partes. Todas las partes mencionadas se encuentran dentro de una caja que sirve como parte estructural del colector y que puede ser hecha de diversos materiales como lámina metálica, madera o plástico. (Larios 2004).

2.4.3.2. Ventajas y desventajas de un colector solar plano para calentamiento de aire

Entre algunas de las ventajas del uso de colectores solares para calentar el aire se cuentan las siguientes. (Larios 2004).

- Su utilización para el secado de alimentos.
- No produce contaminación ni corrosión del sistema de distribución del aire y es fuente inagotable de energía.

- Las pérdidas de calor no constituye problema serio, puesto que los aumentos medios necesarios para el secado de granos son relativamente pequeños.
- El material y la tecnología de la construcción de colectores solares planos son generalmente sencillos.

Los principales inconvenientes son (Larios 2004).

- La disponibilidad de energía solar es variable y para el secado de granos se la puede aprovechar en pequeña escala solamente.
- Los coeficientes de transferencia de energía son bajos, debido a las limitaciones de la velocidad del aire. Si esta última fuese demasiado alta, habría grandes incrementos en la pérdida de carga del sistema y habría que emplear ductos de aire relativamente grandes en el colector solar.

CAPITULO III

MODELOS MATEMÁTICOS

En el presente capítulo se profundiza en cada uno de los sub-modelos que integran el modelo matemático de un deshidratador solar para cacao. Partiendo de un modelo que describe el comportamiento de la radiación solar, seguido de un modelo que describe el comportamiento de un colector solar de placa plana y finalizando con el modelo que describe el comportamiento de la cinética de secado del cacao dentro de una cámara de secado.

3.1. MODELO MATEMÁTICO DE RADIACIÓN SOLAR

3.1.1. Radiación Solar Extraterrestre

Se define como, la radiación solar diaria que recibe una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera. El valor de dicha radiación, se obtiene a partir de la constante solar, (constante de radiación sobre una superficie perpendicular a los rayos solares a una distancia media entre el Sol y la Tierra). La constante solar G_{SC} tiene como valor 1367 [W/m²]. (Duffie 1980).

Mediante la ecuación (3.1), se puede obtener el valor de la radiación solar extraterrestre para un intervalo determinado de tiempo.

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \left[\cos \theta \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi}{180} (\omega_2 - \omega_1) \sin \theta \sin \delta \right] \quad (3.1)$$

Donde:

- n es *número del día en estudio*, se refiere al valor numérico del día en estudio, variando desde 1 en el primer día del año, hasta 365 en el último día del año.
- θ es la *latitud* referida a la posición angular al sur o al norte del ecuador, siendo norte positiva $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.
- δ es la *declinación* se refiere a la posición del sol al medio día solar (cuando el sol se encuentra en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, siendo positiva una declinación sur $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

(Duffie 1980).

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \cdot \frac{284+n}{365} \right) \quad (3.2)$$

- ω es el *ángulo de desplazamiento del sol* de este a oeste en el meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje, siendo negativa en la mañana y positiva después del mediodía. Dicha rotación es de 15° por hora. (Duffie 1980).

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \theta \tan \delta) \quad (3.3)$$

- ω_1 y ω_2 son los ángulos inicial y final medidos en grados, correspondiente al desplazamiento del sol en un intervalo de tiempo determinado.

Siendo:

$$\omega_1 = 15 * \left((ns/2) - 12 \right) \quad (3.4)$$

$$\omega_2 = 15 * \left((ns/2) - 12 + \frac{ns}{\#in} \right) \quad (3.5)$$

- ns corresponde al número total de horas de luz solar teórico, el cual se determina mediante la ecuación (6)

$$ns = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \theta \tan \delta) \quad (3.6)$$

- n se refiere a la cantidad de intervalos de tiempo existentes a lo largo de todo un día en estudio. Cada intervalo de tiempo se define como el cociente del número de horas de luz solar “ n_s ” entre la cantidad de intervalos, en otras palabras, es la diferencia en tiempo, existente entre ω_1 y ω_2 .

3.1.2. Modelo de cielo isotrópico.

La radiación solar extraterrestre, luego de penetrar en la atmosfera, una parte de ella se ve afectada y distorsionada por partículas o moléculas esparcidas por toda la atmosfera terrestre, dando a lugar a la aparición de dos componentes de irradiación llamadas difusa y directa.

En 1963, Liu y Jordan, crearon un modelo matemático llamado “MODELO DE CIELO ISOTROPICO”. En este modelo se considera que la radiación sobre una superficie inclinada incluye tres componentes: Radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada desde los alrededores, donde la magnitud de cada componente es la misma en todas las direcciones de incidencia. (Duffie 1980). Dicho modelo se representa de la siguiente manera.

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.7)$$

Donde:

- R_b es la relación entre radiación global sobre una superficie inclinada y la radiación global sobre una superficie horizontal. (Duffie 1980).

$$R_b = \frac{I_T}{I_h} \quad (3.8)$$

- β es el **ángulo de la superficie**. Angulo entre la superficie en cuestión y el plano horizontal $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.
- ρ_g **factor de reflectividad** del suelo, dependerá del lugar donde se esté realizando la medición. Dicho valor, varía según la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Factor de reflectividad del suelo (Geosol 2012).

Pasto	0,25
Suelo desnudo	0,17
Pasto seco	0,28-0,32
Campo no cultivado	0,26
Macadam	0,18
Asfalto	0,15
Hormigón	0,30
Hormigón sucio	0,20
Hormigón limpio	0,55
Nieve fresca	0,80-0,90
Nieve vieja	0,45-0,70

- K_T **índice de claridad**, se define como la relación entre la irradiación global sobre una superficie horizontal y la irradiación extraterrestre.(Duffie 1980).

$$K_T = \frac{I_h}{I_o} \quad (3.9)$$

Debido a que el índice de claridad y la irradiación global dependen una de la otra, (Almorox 2008), desarrollaron un modelo de aproximación para el índice de la claridad en el territorio venezolano.

$$K_T = a + b \left(\frac{ns}{N} \right) \quad (3.10)$$

Donde las constantes a y b fueron determinadas mediante el uso de estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes ciudades del país. En la tabla 3.2 se encuentran los resultados de esas mediciones.

Tabla 3.2. Constantes para el cálculo del índice de claridad en diferentes estaciones de Venezuela (Almorox 2008).

Lugar de la estación	a	b
Coro	0.338	0.350
Maracaibo	0.253	0.263
Barquisimeto	0.260	0.376
Maracay	0.297	0.291
Caracas (La Carlota)	0.315	0.226
Barcelona	0.283	0.296
Mérida	0.300	0.343
Ciudad Bolívar	0.302	0.256
S. Fernando de Apure	0.308	0.279
Tumeremo	0.269	0.352
Puerto Ayacucho	0.289	0.215
Todas las estaciones	0.263	0.344

En la Tabla 3.2, en la última fila, se puede apreciar valores de a y b correspondiente a todas las estaciones. Dichos valores fueron usados para el cálculo del índice de claridad K_T en el presente modelo.

- N es el número de horas de luz solar obtenido empíricamente
- I_h **irradiación global sobre superficie horizontal**, se obtiene mediante la radiación extraterrestre y el índice de claridad " K_T ". Ecuación (3.9)
- I_d **irradiación difusa**, es la radiación que viniendo desde el Sol ha sido dispersada por moléculas y aerosoles en la atmósfera y llegan a incidir en el

colector. (Duffie 1980). La irradiación difusa se obtiene mediante el índice de claridad bajo la siguiente correlación. (Chandrasekaran 1994),

$$\frac{I_d}{I_h} = 0,9686 + 0,1325K_T + 1,4183K_T^2 - 10,186K_T^3 + 8,3733K_T^4 \quad (3.11)$$

Dicha correlación, es empleada en el presente modelo, ya que, fue planteada para Madras, India. (Latitud 12°N y Longitud 80°E), en la cual, la latitud y las condiciones climatológicas se asemejan a las del territorio venezolano.

- *I_b irradiación directa*, es la radiación que pasa en línea recta desde el sol a través de la atmosfera hasta el colector. Dicha irradiación se puede determinar mediante la ecuación (3.12), en la cual se puede evidenciar que la irradiación global sobre una superficie horizontal *I_h*, es igual a la suma de la irradiación difusa *I_d* mas la irradiación directa *I_b* (Duffie 1980).

$$I_h = I_b + I_d \quad (3.12)$$

3.1.3. Solución del modelo

Después de haber identificado cada componente presente en el modelo, se resolvió la ecuación (3.7) y se determino el valor de *I_T* en distintos instantes de tiempo a lo largo de *ns*.

3.2. MODELO MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR

El presente modelo se construyó basado en el balance de energía en cada uno de los componentes de un colector solar de placa plana, de un solo canal, sin elemento almacenador de energía; y sujeto a las siguientes consideraciones:

- El modelo consta de tres volúmenes de control, un volumen de control para la placa cubierta, otro para la placa de absorción y finalmente, un volumen de control para el aire.
- El colector solar opera en condiciones transitorias a lo largo del día en estudio, se desprecia la capacidad térmica de las placas por lo que las temperaturas de las mismas se consideran constantes en cada intervalo de tiempo.
- Se desprecia la conducción de calor a través de la placa cubierta.
- Se considera que el colector solar en los laterales está perfectamente aislado.
- Las temperaturas cambian solo en la dirección del flujo de aire
- Solo se considera el funcionamiento del colector para las horas en que se tenga luz solar.

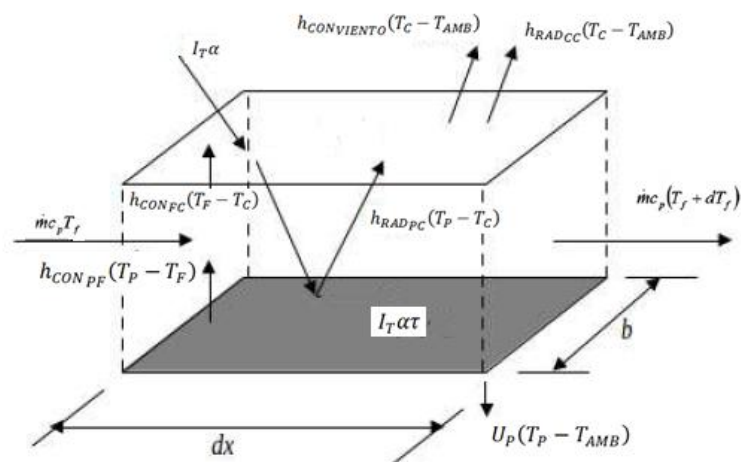


Figura 3.1. Colector solar de placa plana (Lammardo 2010).

3.2.1. Balance de energía (placa cubierta).

La placa cubierta es considerada una superficie transparente en la cual, el balance de energía se basa en el volumen de control mostrado en la Figura 3.2

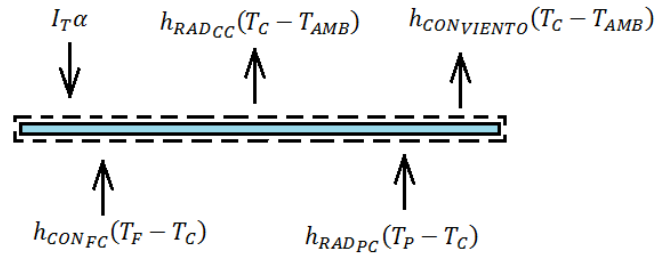


Figura 3.2. Balance de energía de la placa cubierta.

En el cual se puede evidenciar que la irradiación total “ I_T ” por la absorptividad de la placa “ α ”, junto con los términos que involucran a los coeficientes convectivo “ $h_{CON_{FC}}$ ” y radiativo “ $h_{RAD_{PC}}$ ” provenientes del flujo de aire y la placa de absorción respectivamente, forman parte de la energía total incidente sobre la placa cubierta; así como también, se puede apreciar que la energía saliente del volumen de control corresponde al término que incluye al coeficiente convectivo entre la placa cubierta y el viento “ $h_{CON_{VIENTO}}$ ”, y; al término que incluye al coeficiente radiativo entre la placa cubierta y el cielo “ $h_{RAD_{CC}}$ ”. Siendo el balance de energía el que se presenta a continuación.

$$I_T \alpha_c + h_{CON_{FC}}(T_F - T_C) + h_{RAD_{PC}}(T_P - T_C) = h_{RAD_{CC}}(T_C - T_{AMB}) + h_{CON_{VIENTO}}(T_C - T_{AMB}) \quad (3.13)$$

El coeficiente de radiación entre la placa de absorción y la placa cubierta “ $h_{RAD_{PC}}$ ” se calcula mediante la ecuación (3.14), considerando que ambas placas son opacas y grises a la radiación de longitud de onda larga. (Incropera 1999)

$$h_{RAD_{PC}} = \frac{\sigma(T_P^2 + T_C^2)(T_P + T_C)}{\frac{1}{\epsilon_P} + \frac{1}{\epsilon_C} - 1} \quad (3.14)$$

El coeficiente de radiación entre el cielo y la placa cubierta “ $h_{RAD_{CC}}$ ” se calcula mediante la ecuación (3.15), ya que el cielo se considera un cuerpo negro y la

superficie transparente como un cuerpo gris para radiación de longitud de onda larga. (Incropera 1999)

$$h_{RAD_{CC}} = \sigma \varepsilon_C (T_C^2 + T_{AMB}^2)(T_C + T_{AMB}) \quad (3.15)$$

El coeficiente convectivo entre el flujo de aire y la placa cubierta “ $h_{CON_{FC}}$ ” se muestra en la ecuación (3.16), y se calcula a partir de la correlación del número de Nusselt “ N_{UL} ” de convección forzada en conductos (Incropera 1999), conductividad térmica del aire “ K_f ” y el diámetro hidráulico “ D_H ”

$$h_{CON_{FC}} = \frac{N_{UL} \cdot K_f}{D_H} \quad (3.16)$$

El número de Nusselt para convección forzada se muestra en la ecuación (3.17) el cual depende del número de Prandtl Pr , el número de Reynolds Re , y un factor n igual a 0.4 correspondiente al calentamiento de fluidos. El número de Prandtl es de 0.7 para el aire, y el número de Reynolds se obtuvo mediante la ecuación (3.18)

$$N_{UL} = 0,023(Re)^{4/5}(Pr)^n \quad (3.17)$$

$$Re = 4 \cdot \frac{\dot{m}}{\pi \mu \cdot D_H} \quad (3.18)$$

Siendo ν la viscosidad del aire y D_H el diámetro hidráulico. Ambos factores se determinan mediante las ecuaciones (3.19) y (3.20) respectivamente.

$$\nu = \nu_c \cdot \rho \quad (3.19)$$

$$D_H = 2 \cdot \frac{A}{b+Y} \quad (3.20)$$

A su vez, ν_c y ρ representan la viscosidad cinemática y densidad del aire respectivamente para la ecuación (3.19). En la ecuación (3.20), se tiene que A

corresponde al área perpendicular al flujo de aire dentro del colector y b, Y representan el ancho del colector y la separación entre placas respectivamente.

En el presente modelo, se considera que las propiedades del aire dependen de la temperatura, por lo cual, se dio uso de las ecuaciones de (Tiwari 2002).

$$v_c = (0.1284 + 0.00105T_f) \cdot 10^{-4} \quad (3.21)$$

$$\rho = \frac{353,44}{T_F} \quad (3.22)$$

$$K_f = 0,0244 + (0,6773 \times 10^{-4})T_f \quad (3.23)$$

El coeficiente convectivo entre la placa cubierta y el aire ambiente, externo al colector solar “ $h_{CONVIENTO}$ ”, se determina a partir de la ecuación (3.24), desarrollada por (Watmuff 1977)

$$h_{CONVIENTO} = 2,8 + 3V_V \quad (3.24)$$

Donde V_V representa la velocidad del viento en [m/s].

3.2.2. Balance de energía (placa de absorción).

La placa de absorción, se define como una placa negra de absorptividad determinada α_p en la cual, se cumple el siguiente balance de energía.

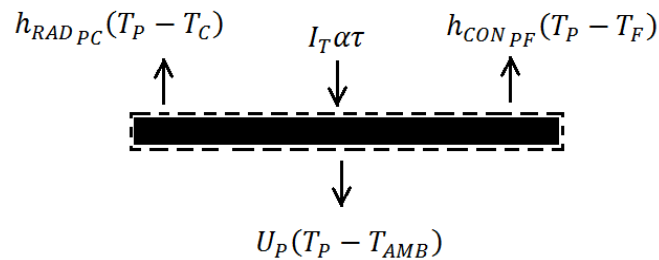


Figura 3.3. Balance de energía de la placa de absorción.

Donde, se puede evidenciar que la irradiación total I_T por la absorptividad de la placa negra α_p y la transmisividad de la placa transparente τ , forma parte de la energía total incidente sobre la placa de absorción; así como también, se puede apreciar que la energía saliente del volumen de control corresponde al coeficiente convectivo entre la placa de absorción y el flujo de aire $h_{CON_{PF}}$, el coeficiente radiativo entre la placa de absorción y la placa cubierta $h_{RAD_{PC}}$, y las pérdidas de calor a través de la placa de absorción U_p . Siendo el balance de energía el que se presenta a continuación.

$$I_T \alpha_p \tau = h_{RAD_{PC}}(T_P - T_C) + h_{CON_{PF}}(T_P - T_F) + U_p(T_P - T_{AMB}) \quad (3.25)$$

Donde se considera que.

$$h_{CON_{PF}} = h_{CON_{FC}} \quad (3.26)$$

Mediante el circuito equivalente mostrado en la Figura 3.4, se puede determinar el valor de U_p

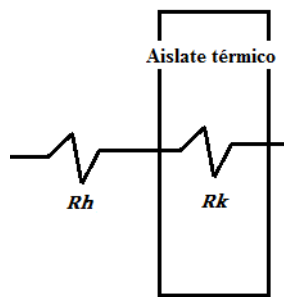


Figura 3.4. Circuito equivalente.

Donde, Rh y Rk , representan las resistencias a la convección y a la conducción respectivamente. Siendo U_p el coeficiente de transferencia equivalente.

$$Rk = \frac{\delta}{Ki} \quad (3.27)$$

$$Rh = \frac{1}{h_{CONPF}} \quad (3.28)$$

$$U_P = \left(\frac{\delta}{Ki} + \frac{1}{h_{CONP-A}} \right)^{-1} \quad (3.29)$$

Finalmente, δ representa el espesor del aislante térmico [m] y Ki la conductividad térmica [W/K.m].

3.2.3. Balance de energía (flujo másico del aire).

Para poder obtener el balance de energía a través del volumen de control en el flujo másico de aire, se toma en consideración un diferencial de longitud “ dx ”. El balance de energía se puede apreciar mediante la Figura 3.5.

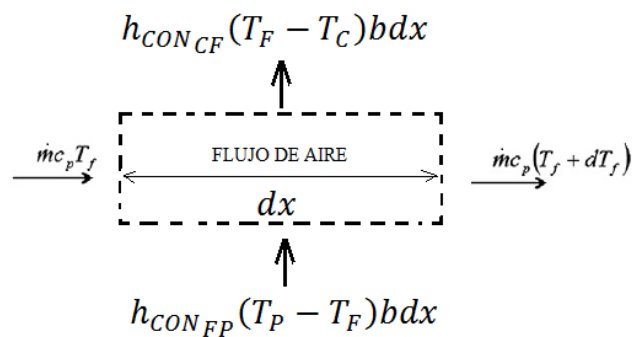


Figura 3.5. Balance de energía del flujo másico de aire.

Donde, “ $b dx$ ” representa el área de transferencia de calor y “ Cp_a ” es el calor específico del aire definido por (Tiwari 2002), bajo la siguiente expresión.

$$Cp_a = 999,2 + 0,1434T_F + (1,101 \cdot 10^{-4})T_F^2 - (6,7581 \cdot 10^{-8})T_F^3 \quad (3.30)$$

Por medio del balance de energía mostrado en la figura 3.5, se obtuvo la ecuación (31)

$$h_{CON_{FP}}(T_P - T_F)bdx - h_{CON_{CF}}(T_F - T_C)bdx = \dot{m} Cp_a \frac{dT_F}{dx} dx \quad (3.31)$$

3.2.4. Solución del modelo

El modelo matemático está compuesto por las ecuaciones (3.13), (3.25) y (3.31), que constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales-algebraicas para T_C , T_F y T_P . En el método de solución del sistema se consideró que el colector está dividido en secciones de igual longitud en la dirección del flujo de aire, en donde cada sección recibe aire caliente de la sección previa y entrega aire a mayor temperatura a la siguiente sección (Figura 3.6). En cada sección ambas superficies se consideran isotérmicas y la derivada de la temperatura se aproxima como diferencias finitas según. (Lammardo 2010).

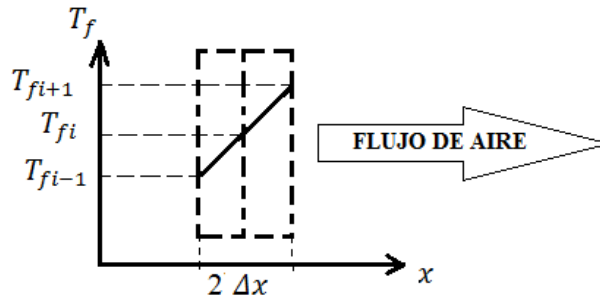


Figura 3.6. Esquema representativo del comportamiento de la temperatura del aire.

$$\frac{dT_{fi}}{dx} = \frac{T_{fi+1} - T_{fi}}{\Delta x} \quad (3.32)$$

De esta manera, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas que debe resolverse para cada división ‘ Δx ’. Dicho sistema se considera de la forma $AX=b$, donde la matriz A representa los coeficientes de convección, radiación y el término de pérdidas de calor en el colector, los cuales dependen directamente de la temperatura del aire y de las superficies, por lo que se llevó a cabo un proceso iterativo para resolver el sistema. En ese sentido, en la i -ésima sección se asigna un valor de temperatura a las superficies transparente y de absorción, y un valor de temperatura del aire a la salida de la sección, mientras que la temperatura del aire a la entrada corresponde a la temperatura del aire a la salida de la sección $(i-1)$ ésima. Con estos valores de temperaturas se calcula la matriz de coeficientes y de pérdida de calor del sistema de ecuaciones y se resuelve el mismo, comparándose la solución con los valores supuestos. Si no se satisface cierta tolerancia al error, se repite el procedimiento con nuevos valores supuestos. La metodología se repite en cada sección hasta completar la totalidad del colector. (Lammardo 2010).

3.3. MODELO MATEMÁTICO DE LA CAMARA DE SECADO

Este modelo se basa en el balance de masa y de energía dentro de un volumen de control descrito como un lecho de capa fina de semillas de cacao. Un esquema del volumen de control se presenta a continuación mediante la Figura 3.7.

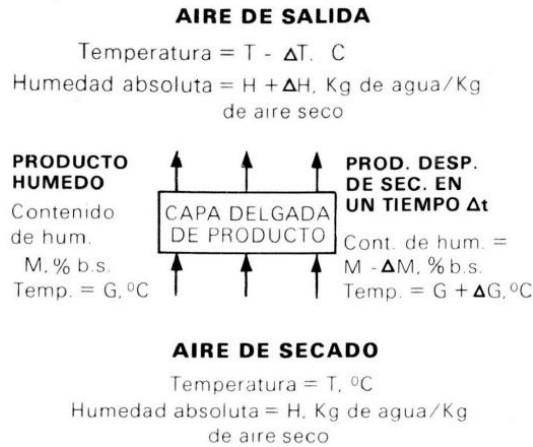


Figura 3.7. Representación esquemática de secado de una capa delgada de cacao. (Villamizar 1989).

Como se puede apreciar en la Figura 3.7, durante el proceso de secado existe una transferencia de masa de agua desde las almendras húmedas de cacao, hacia el flujo másico de aire. Debido a esto, es importante establecer el balance de masa entre la entrada y la salida del volumen de control como se presenta a continuación.

$$\dot{m}_{v1} - \dot{m}_{v2} = \dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2) = -\frac{\partial m_l}{\partial t} \quad (3.33)$$

Donde, para este modelo “ ω_1 ” y “ ω_2 ” representan la humedad absoluta del aire a la entrada y a la salida del volumen de control, que luego de ser multiplicadas por el flujo másico de aire seco, las humedades absolutas se convierten en el flujo másico de vapor a la entrada y a la salida del volumen de control. La diferencia entre las masas de vapor en un instante de tiempo, nos permite conocer la velocidad de pérdida de agua de las almendras de cacao - $\frac{\partial m_l}{\partial t}$.

La humedad absoluta se relaciona con la humedad relativa, presión de saturación del vapor de agua y la presión total del aire húmedo, mediante la siguiente expresión. (Van Wylen 2007).

$$\omega = 0,622 \left[\frac{\phi \cdot P_{SAT}}{P_o - \phi \cdot P_{SAT}} \right] \quad (3.34)$$

Donde la humedad relativa ϕ se define como el cociente de la presión parcial de vapor de agua a una determinada temperatura, entre la presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura. Dicho valor nunca podrá ser mayor a uno

En la Figura 3.7, también se puede evidenciar que existe un intercambio de energía, ya que las temperaturas tanto de las semillas de cacao como del aire, se ven afectadas luego de que el flujo de aire atraviesa dicho volumen de control. El balance de energía se puede expresar mediante la ecuación (3.35)

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial E_{CACAO}}{\partial t}_{VC} + \Delta \dot{H}_{1-2} \quad (3.35)$$

Donde se considera que no existe trabajo realizado y se desprecia la transferencia de calor desde el volumen de control hacia los alrededores.

El cambio de energía en el lecho de cacao se presenta a continuación.

$$\frac{\partial E_{CACAO}}{\partial t}_{VC} = \frac{\partial}{\partial t} [U_s + U_l + W_{evap}] = m_s C p_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + m_l C p_l \frac{\partial T_l}{\partial t} + h_{fg} \frac{\partial m_l}{\partial t} \quad (3.36)$$

Los términos $C p_s$ y $C p_l$ corresponden al calor específico del cacao seco y del agua respectivamente. En el presente modelo, se hace uso de un término global de calor específico “ $C p_p$ ”, propuesto por (Villamizar 1989), el cual se determina de la siguiente manera.

$$C p_p = \frac{m_l}{m_l + m_s} C p_l + \frac{m_s}{m_l + m_s} C p_s \quad (3.37)$$

Luego, el cambio de energía relacionado al aire se expresa de la siguiente manera.

$$\Delta H_{1-2} = \dot{m}_a [C p_a (T_{F2} - T_{F1}) + (\omega_2 h_{g2} - \omega_1 h_{g1})] \quad (3.38)$$

Por otra parte, y con fines de modificar convenientemente las ecuaciones (3.36) y (3.38), se realizaron las siguientes consideraciones.

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad ; \quad m_a \omega_2 = m_{v2} = m_{v1} + \frac{\partial m_l}{\partial t}$$

Finalmente, la ecuación (3.35) queda de la siguiente forma.

$$0 = C p_p (m_s + m_l) \frac{\partial T_p}{\partial t} + h_{fg} \frac{\partial m_l}{\partial t} + m_a C p_a (T_{F2} - T_{F1}) + \left(m_{v1} + \frac{\partial m_l}{\partial t} \right) h_{g2} - m_{v1} h_{g1} \quad (3.39)$$

Existe una correlación entre el calor específico del cacao húmedo “ $C p_p$ ” y la humedad base seca del cacao “ M ”, propuesta por (Villamizar 1989), la cual se presenta como.

$$C p_p = 0,4156 + 0,430M \quad (3.40)$$

Luego, para los valores de h_{fg} y de h_g se realizaron ajustes de curvas sobre los datos arrojados por las tablas termodinámicas del (Van Wylen 2007), y se obtuvieron las siguientes funciones dependientes de T_F

$$h_{fg} = -0,0015T_F^2 - 2,2803T_F + 2499,8 \quad [\text{KJ/kg}] \quad (3.41)$$

$$h_g = -0,0013T_F^2 + 1,8899T_F + 2500,2 \quad [\text{KJ/kg}] \quad (3.42)$$

Para poder determinar la velocidad de extracción de agua en las semillas de cacao $\frac{\partial m_l}{\partial t}$, es necesario conocer la cinética de secado del producto. En el proyecto realizado por (Villamizar 1989), se plantea la ecuación (3.43), la cual es capaz de predecir la humedad del cacao base seca “ M ”, después de un intervalo de tiempo determinado.

$$MR = \frac{M-M_e}{M_o-M_e} = e^{[-0,038637(P_{SAT}-P_V)^{0,34864} t^{0,60719}]} \quad (3.43)$$

Donde, M_e representa la humedad de equilibrio del cacao, la cual dependerá de la humedad relativa y de la temperatura del aire a la entrada del volumen de control. M_o representa la humedad inicial de la semilla de cacao en base seca. P_{SAT} se refiere a la presión de saturación de vapor de agua. P_V es la denotación que (Villamizar 1989), otorga a la presión de vapor en el producto. t es el tiempo transcurrido medido en horas

La humedad de equilibrio se obtiene mediante la siguiente expresión. (Villamizar 1989),

$$M_e = (0,01087324 + 0,23758842\phi - 0,63848052\phi^2 + 0,56197989\phi^3) \cdot e^{[(0,02965424 - 0,33506858\phi + 0,95779665\phi^2 - 1,27182954\phi^3 + 0,573953345\phi^4) \cdot (T_{F1} - 57,2913401)]} \quad (3.44)$$

La presión de saturación de vapor de agua, se obtuvo mediante el mismo procedimiento empleado en las ecuaciones (3.41) y (3.42), siendo la función resultante la que se muestra a continuación.

$$P_{SAT} = 1 \cdot 10^{-6}T_F^4 - 3 \cdot 10^5T_F^3 + 0,0036T_F^2 + 0,0157T_F + 0,6749 \quad (3.45)$$

La presión de vapor del producto se relaciona con la presión de saturación del vapor de agua, la entalpia de vaporización y, lo que (Villamizar 1989) denota como calor latente del producto ‘ L ’, de la siguiente forma.

$$P_V = P_{SAT} \left(\frac{L}{h_{fg}} \right) \quad (3.46)$$

Donde:

$$L = (597,6 - 0,57T_p) [1 + 0,4062e^{(-0,2365M)}] \quad (3.47)$$

Finalmente, para poder determinar la velocidad de extracción de agua en las semillas de cacao, es necesario hacer uso de la ecuación (3.48).

$$m_s \cdot \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial m_l}{\partial t} \quad (3.48)$$

Donde m_s se refiere a la masa de cacao seco y el término $\frac{\partial M}{\partial t}$ se obtuvo de la derivada parcial de la ecuación (3.43). Dicha derivada se obtuvo mediante el uso de un software de análisis simbólico que facilitó la obtención de la misma.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\frac{-0,02346000003(V_1)^{0,34864}}{t^{0,39281}} + \frac{1}{(V_1)^{0,65136}}(V_2) \left(-\frac{0,57(1+0,4062e^{-0,2365M})}{h_{fg}} \right) \ln(P_{SAT})}{\frac{1}{M-Me} + \left(\frac{1}{(V_1)^{0,65136}}(V_2)^{0,1092630(597,6-0,57t)e^{-0,2365M}} \ln(P_{SAT}) \right)} \quad (3.49)$$

Siendo V_1 y V_2 como se muestra a continuación.

$$V_1 = P_{SAT} - P_{SAT} \left(\frac{(597,6-0,57T) \cdot [1+0,4062e^{-0,2365M}]}{h_{fg}} \right)$$

$$V_2 = 0,01347040368 \cdot t^{0,60719} \cdot P_{SAT} \left(\frac{(597,6-0,57T) \cdot [1+0,4062e^{-0,2365M}]}{h_{fg}} \right)$$

3.4. PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN EL SECADOR SOLAR

Las pérdidas de presión dentro del secador solar, se puede determinar sumando las pérdidas en el colector más las pérdidas por bandeja dentro de la cámara de secado. Es de gran importancia el conocimiento de las pérdidas ya que con dicha información se puede determinar la potencia requerida por un ventilador para que el aire entrante en el colector solar, pueda atravesar dicho colector y la cámara de secado sin que ocurra estancamiento, así como también, se puede conocer la presión total del sistema en distintos puntos del secador solar

3.4.1 Pérdidas de presión en el colector solar

Las pérdidas de presión dentro del colector solar “ H_c ” presente en este modelo, se deben principalmente a los efectos turbulentos. Una expresión para el cálculo de este tipo de perdidas, se muestra en la ecuación (3.50) obtenida de (Potter 2002).

$$H_c = \frac{f \cdot L \cdot (\dot{m}_a / \rho \cdot A)^2}{2 \cdot D_H \cdot g} \quad (3.50)$$

Donde el factor de fricción f depende del número de Reynolds “ Re ”, la rugosidad del material (medida en metros) y el diámetro hidráulico D_H . En la ecuación (3.51), se puede apreciar del factor de fricción expuesto por (Levenspiel 1998), para números de Reynolds mayor a 4000. Cabe destacar que se usó esta expresión, ya que, los números de Reynolds usados en el presente modelo son superiores a 4000.

$$f = \left(\frac{1}{-4 \log \left(\frac{1}{3.7 D_H} + \left(\frac{6.81}{Re} \right)^{0.9} \right)} \right)^{1/2} \quad \text{para } Re > 4000 \quad (3.51)$$

En la ecuación (3.50), la expresión $(\dot{m}_a/\rho \cdot A)^2$ representa la velocidad del flujo de aire elevado al cuadrado dentro del colector solar, D_H y g , representan al diámetro hidráulico y la aceleración de la gravedad respectivamente y por último, “ L ” representa la longitud total del colector.

Las pérdidas en el colector calculadas con la ecuación (3.50), se expresan en unidades de metros [m], es por ello, que se debe realizar un cálculo adicional, para obtener unidades de presión [Pa].

$$Pc = Hc \cdot \rho \cdot g \quad (3.52)$$

Siendo ρ la densidad del aire, g la aceleración de la gravedad y Pc corresponde a las pérdidas de presión en el colector en unidades de presión.

3.4.2 Pérdidas de presión en la cámara de secado.

La pérdida ficcional para flujo a través de lechos rellenos puede ser expresada como

$$HCS = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu v l}{g_c \varepsilon^3 D p^2 \rho} + \frac{1.75(1-\varepsilon) v^2 l}{g_c \varepsilon^3 D p} \quad [J/kg] \quad (3.53)$$

La ecuación (3.53) fue obtenida mediante (Levenspiel 1998). Esta expresión de dos términos, toma en cuenta las pérdidas por efectos viscosos y las pérdidas por efectos turbulentos. Siendo en este caso “ ε ” la fracción de huecos presente en el lecho, el cual se obtiene mediante la Figura 3.8 mostrada a continuación.

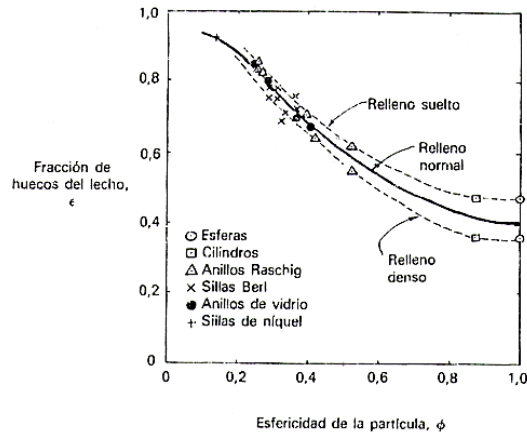


Figura 3.8. Gráfico para determinar la fracción de huecos del lecho, en función de la esfericidad de la partícula ϕ (Levenspiel 1998).

La esfericidad de la partícula ϕ se puede obtener mediante la Figura 3.9 que se muestra a continuación.

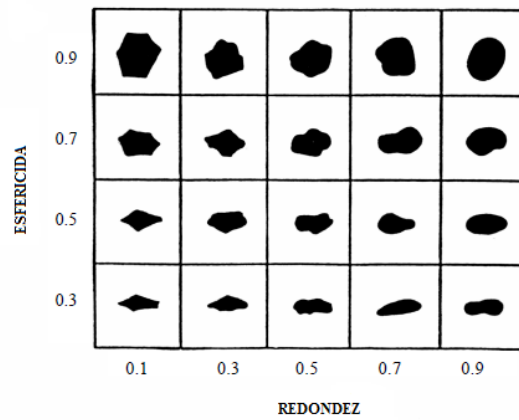


Figura 3.9. Tabla para determinar la esfericidad y redondez de una partícula. (Santamarina 2004).

Por otra parte, D_p representa el diámetro equivalente de la partícula y se obtiene mediante la ecuación (3.54). (Levenspiel 1998)

$$D_p = \phi \cdot \left(6 \cdot \frac{V_p}{\pi}\right)^{1/3} \quad (3.54)$$

Siendo V_p el volumen de la semilla de cacao el cual tiene por valor $1,18 \cdot 10^{-6}$ [m³] según (Villamizar 1989).

Finalmente, la pérdida total en la cámara de secado, se determina mediante la ecuación (3.53), multiplicándola por el número de bandejas dentro de la cámara. Dicho valor de pérdida H_{cs} se muestra en unidades de [J/kg], es por ello que se debe hacer un cálculo adicional para determinar dicho valor de pérdida en unidades de presión.

$$P_{cs} = H_{cs} \cdot \rho \quad [\text{Pa}] \quad (3.55)$$

3.5. PRESIÓN DEL AIRE DENTRO DEL SISTEMA

La presión en el sistema dependerá del instante de estudio es decir P_o cambiara dependiendo de en que posición se quiera calcular la presión, es la suma entre la presión parcial de vapor de agua y la presión de aire seco, dicha presión debe ser lo suficientemente alta de modo tal que sea capaz de vencer las pérdidas de presión existentes en el colector y la cámara de secado. Para poder garantizar esto, se generó la ecuación (3.56), en la cual, a la presión atmosférica P_{atm} se le añade una presión de ventilador P_{ven} necesaria para poder vencer las pérdidas en el secador solar.

$$P_o = P_{atm} + P_{ven} - (P_c + Nb \cdot P_{cs}) \quad (3.56)$$

Siendo P_c y P_{cs} las pérdidas de presión en el colector y la cámara de secado respectivamente y Nb el numero de bandejas en la cámara de secado. Para poder determinar la presión de ventilador mínima que se le debe agregar a la presión atmosférica para poder vencer las perdidas, se emplea la siguiente ecuación.

$$P_{ven} = P_c + Nb \cdot P_{cs} \quad (3.57)$$

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA PROGRAMACIÓN

El modelo de un deshidratador solar para cacao propuesto se programó a partir de tres modelos matemáticos independientes, vinculados entre sí, de manera tal que ciertas variables de salida corresponden a las variables de entrada del siguiente módulo.

En la Figura 4.1 se presenta un esquema básico del funcionamiento del programa. Al iniciar procede a definir las variables de entrada correspondientes al lugar geográfico, condiciones meteorológicas de la región y las características geométricas del colector y del secador, las cuales han sido previamente establecidos en un archivo de texto. A continuación, se incorporan las variables de entrada a cada uno de los módulos.

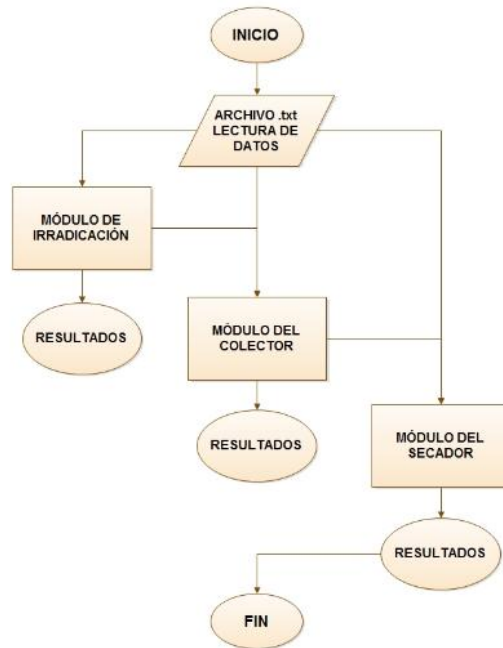


Figura 4. 1. Esquema general de la programación.

El módulo de irradiación es el primero en ejecutarse, este calcula la distribución temporal de irradiación en intervalos aproximados a 30 minutos, luego se ejecuta el módulo del colector solar el cual tiene como variables de entrada la irradiación temporal sobre el colector solar y la información proporcionada por el archivo de texto, dicho módulo es el encargado de determinar las temperaturas del fluido a la salida del colector solar, la temperatura de la placa cubierta y la temperatura de la placa de absorción, así como también, calcula las pérdidas de presión existente dentro del mismo. Por último, y ya conocida la temperatura del flujo de aire a la salida del colector solar, se ejecuta el módulo de la cámara de secado el cual tiene como función estimar la humedad retirada en el cacao, la tasa de deshidratación instantánea y las pérdidas de presión que sufre el flujo de aire a lo largo de la cámara de secado. Adicionalmente, cada uno de los módulos arroja en pantalla los resultados obtenidos, de modo tal que pueda ser observado por el usuario.

4.1. MÓDULO DE IRRADIACIÓN

El módulo de irradiación consiste en la aproximación de la radiación solar total sobre una superficie horizontal o inclinada, a lo largo del ciclo de luz solar del día en estudio, en intervalos de 30 minutos. Un esquema de esta programación se puede evidenciar en la Figura 4.2.

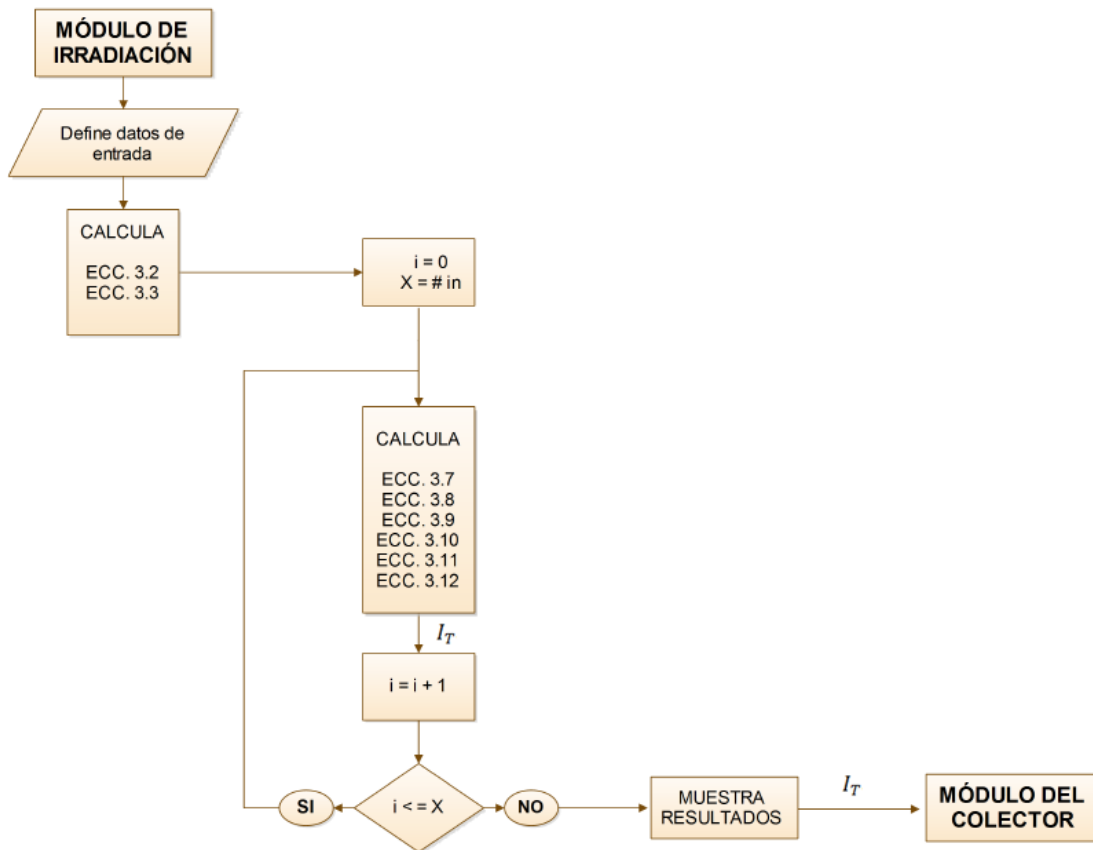


Figura 4.2. Esquema de la programación aplicada al modelo de Irradiación solar sobre una superficie.

Lista de proceso:

- Se definen variables de entrada. En la Figura 4.3 se puede observar los datos de entrada necesarios para este módulo.

```
LATITUD_ [°]: 10.5
LONGITUD_ [°]: 66.9
REFLECTIVIDAD_DEL_SUELO: 0.3
TEMPERATURA_AMBIENTE (promedio) [°K]: 298
VELOCIDAD_DEL_VIENTO (promedio) [m/s]: 0.586
PRESION_AMBIENTE (promedio) [KPa]: 101.325
HUMEDAD_RELATIVA_AIRE [%]: 60.38

MES_DEL_AÑOS_ [1_Y_12]: 10
DIA_DEL_MES_ [1_Y_31]: 26
NUMERO_DE_HORAS_SOLAR_MEDIDAS: 12
```

Figura 4.3. Esquema de la programación aplicada al modelo de Irradiación solar sobre una superficie.

- Calcula declinación y ángulo horario total para todo el día, a través de las ecuaciones (3.2) y (3.3).
- Mediante la ecuación (3.6) se determina el número de horas de luz solar, con el cual se calcula la variable “X”, que representa el número de intervalos (igual a 30 min).

La variable “X” sirve para realizar el ciclo correspondiente al cálculo de irradiación en cada intervalo de tiempo, éste se determina por medio de un contador que va de uno en uno hasta que alcanza el valor de la variable, y va guardando los valores de irradiación total en un vector denominado I_T .

- El vector I_T se genera por medio el cálculo de las ecuaciones (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12).

- Una vez finalizado el ciclo, el vector se transmite al módulo del colector como variable de entrada y a su vez se presenta en pantalla como resultado.

4.2. MÓDULO DEL COLECTOR SOLAR

El módulo del colector solar consiste en un balance de energía en cada elemento que lo compone, estos balances de energía generan una matriz cuyas incógnitas son la temperatura de la placa de absorción, la temperatura de la cubierta transparente y la temperatura del fluido. En la Figura 4.4 se observa un esquema del proceso que se realiza en el módulo del colector solar.

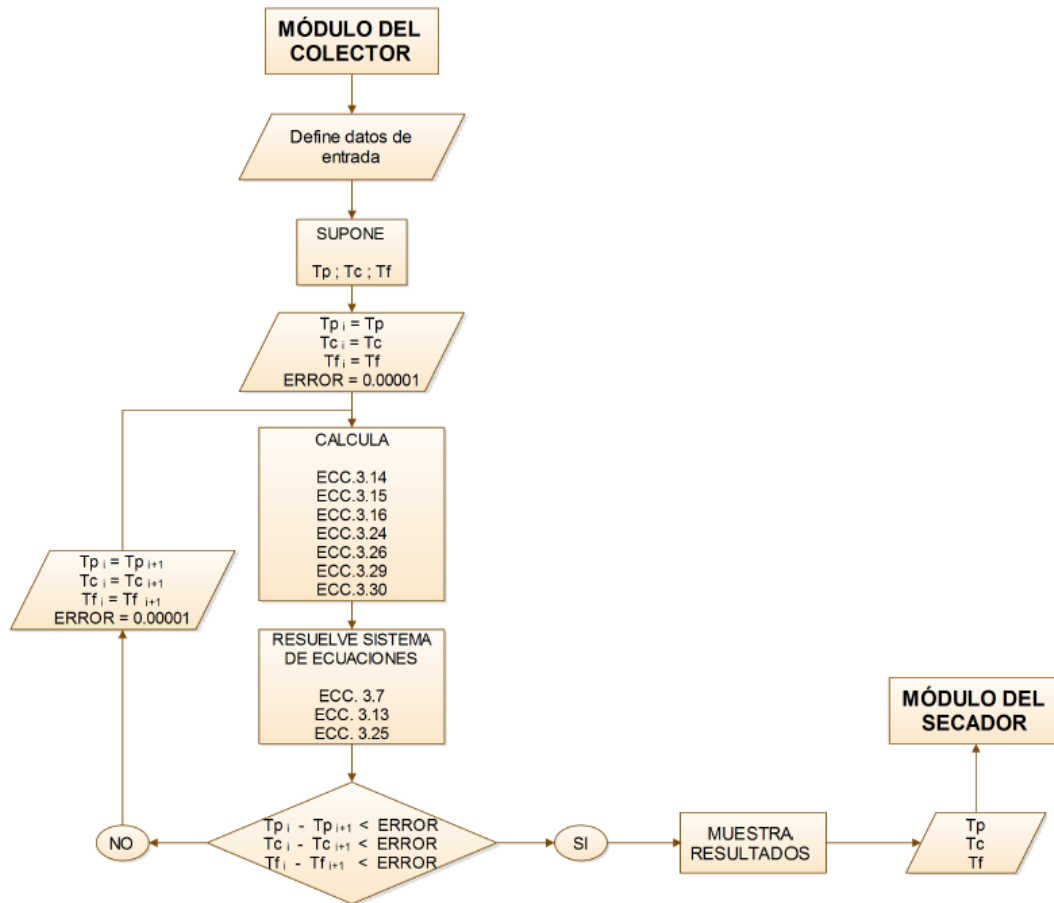


Figura 4.4. Esquema de la programación aplicada al modelo del Colector solar.

Lista de proceso:

- Se definen las variables de entrada. En la Figura 4.5 se observa que datos son necesarios para este módulo.

```

ANGULO_DE_INCLINACION_DE_LA_SUPERFICIE[°] (-NORTE_+SUR) : 10
SEPARACION_ENTRE_LAS_PLACAS[m] : 0.02
LONGITUD_DEL_COLECTOR[m] : 20
ANCHO_DEL_COLECTOR[m] : 0.5
NUMERO_DE_DIVISIONES : 200
EMISIVIDAD_DE_LA_CUBIERTA : 0.89
EMISIVIDAD_DE_LA_PLACA : 0.96
ABSORTIVIDAD_SOLAR_DE_LA_CUBIERTA : 0.08
ABSORTIVIDAD_SOLAR_DE_LA_PLACA : 0.96
TRANSMISIVIDAD_SOLAR_DE_LA_CUBIERTA : 0.78
FLUJO_MASICO[Kg/s] : 0.2
ESPESOR_AISLANTE[m] : 0.05
CONDUCTIVIDAD_TERMICA_DEL_AISLANTE[W/mK] : 0.036
RUGOSIDAD_DUCTOR[m] : 0.000046

```

Figura 4.5. Datos de entrada-módulo del colector solar, formato txt.

- Se establecen los valores semilla para las temperaturas a calcular.
- Cálculos de las ecuaciones (3.14), (3.15), (3.16), (3.24), (3.26), (3.29), (3.30), los cuales representan los componentes de la matriz.
- Calcula las temperaturas y éstas se comparan con los respectivos valores semilla y se determina el error absoluto.

El error absoluto debe ser menor o igual a un valor de tolerancia de 0.000001, de no cumplirse esta condición el módulo realiza un ciclo donde los nuevos valores semilla serán los resultados de las temperaturas obtenidas en los cálculos anteriores.

Todos los cálculos del módulo son realizados en diferenciales de longitud del colector, a medida que se aumenta el número de diferenciales se obtiene un mejor aproximación de los resultados.

4.3. MÓDULO DE LA CAMARA DE SECADO

Este modelo se basa en el balance de masa y de energía dentro de un volumen de control el cual es descrito como un lecho de capa fina de semillas de cacao. El esquema que expone la programación de este modelo se aprecia en la Figura 4.6.

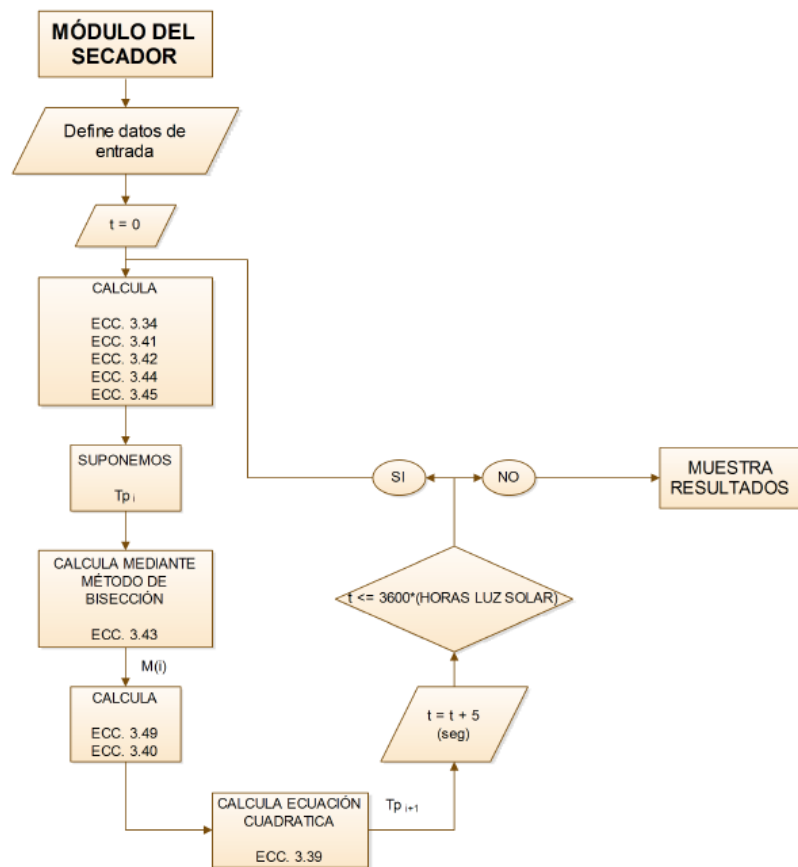


Figura 4.6. Esquema de la programación, aplicada al modelo de Cámara de secado.

Lista de proceso:

- Se define las variables de entrada. En la Figura 4.7 se observa que datos son necesarios para este módulo.

```
NUMERO_DE_BANDEJAS: 5
ESPESOR_DEL_LECHO_DE_CACAO[m]: 0.08
ANCHO_BANDEJA[m]: 0.9
LARGO_BANDEJA[m]: 0.7
HUMEDAD_BASE_HUMEDA_CACAO[%]: 80
PESO_POR_BANDEJA_DEL_CACAO[Kg]: 10
```

Figura 4.7. Datos de entrada-módulo cámara de secado, formato txt.

- Inicializa el tiempo en cero ($t=0$) y calcula las ecuaciones (3.34), (3.41), (3.42), (3.44), (3.45), que servirán para definir todo el estado inicial.
- Supone la temperatura del producto en el estado inicial.
- Se calcula la ecuación (3.43) para determinar la humedad en un instante de tiempo en el cacao, mediante el método de bisección.
- Calcula las ecuaciones (3.49) y (3.40) con las cuales se obtiene la velocidad de secado y calor específico del cacao respectivamente.
- Se sustituye todo lo calculado anteriormente en la ecuación (3.39) del balance de energía y se obtiene la temperatura de salida del aire.

Este proceso se repite en cada bandeja para el mismo tiempo y los datos de salida de la bandeja anterior serán los de entrada para la bandeja siguiente.

- Se aumenta el tiempo en 5 segundos y se repite el proceso hasta que el tiempo alcance el tiempo total de luz solar.

Se muestran resultados para cada bandeja cada 5 segundos los cuales son guardados en un archivo .txt

CAPITULO V

VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. VALIDACION- MODELO DE IRRADIACIÓN

Para poder validar el presente modelo, se realizaron mediciones de irradiación solar en la azotea de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV (Latitud: $10^{\circ} 30' 0''$; Longitud: $66^{\circ} 54' 0''$; 920msnm), a tiempo completo durante dos días 24 y 26 de octubre de 2012, a fin de determinar el comportamiento generado por el modelo de irradiación predictivo. Al comparar los resultados experimentales con los del modelo predictivo (Figura 5.1 y Figura 5.3) se puede observar que la aproximación del modelo de Liu-Jordan combinado con la estimación de los índices de claridad para Venezuela propuestos por (Almorox 2008). Se acerca al comportamiento real, con algunos puntos de discrepancia, los cuales se pueden atribuir a factores meteorológicos.

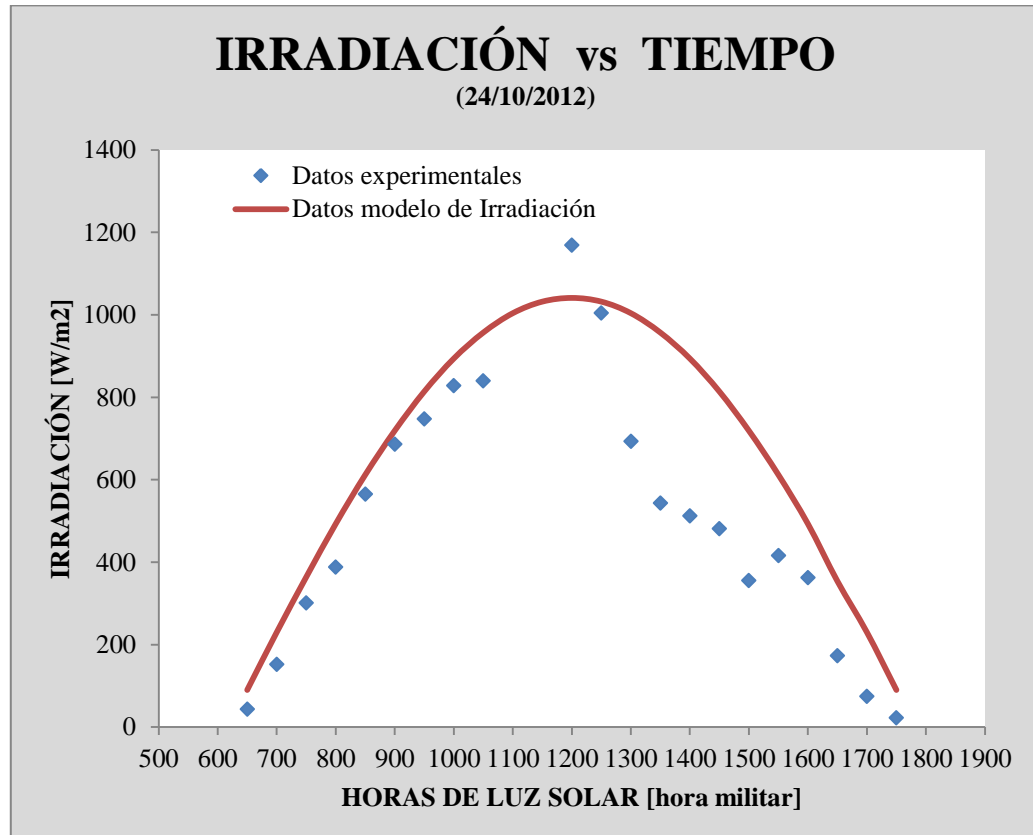


Figura 5.1. Irradiación solar (Latitud: $10^{\circ} 30' 0''$; Longitud: $66^{\circ} 54' 0''$; 920msnm).
Fecha: 24/10/2012.

En las Figuras 5.2 a y b, se pueden apreciar dos fotos del cielo que fueron tomadas a las 9:00 am y 1:00 pm respectivamente, en ellas se puede observar y determinar que los resultados experimentales obtenidos a esas horas se asemejan o discrepan de los calculados mediante el modelo de Liu-Jordan. Aunque el modelo de irradiación se encuentra sujeto a una aproximación para el índice de claridad, este no es del todo adecuado, ya que se emplea una aproximación para todo el territorio venezolano.



Figura 5.2. a) Foto 24/10/2012 9:00 a.m. b) Foto 24/10/2012 1:00 p.m.

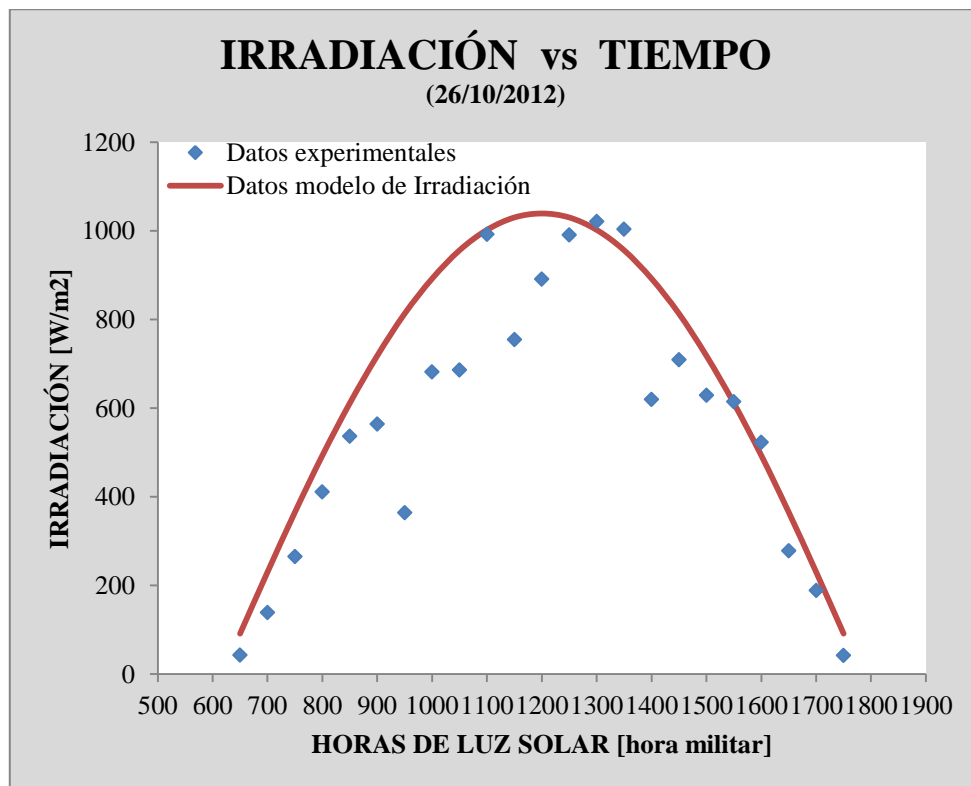


Figura 5.3. Irradiación solar (Latitud: $10^{\circ} 30' 0''$; Longitud: $66^{\circ} 54' 0''$; 920msnm).
Fecha: 26/10/2012

En las Figuras 5.4 a y b, se muestran las fotos tomadas el día 26/10/2012 a las 9:30 am y 11:00 am, respectivamente. En ellas se observa el mismo comportamiento obtenido el día 24/10/2012, a medida que el cielo se despeja, se obtenían unas mejores aproximaciones con el modelo matemático y en los instantes en que el cielo se mostraba con nubosidad, los datos obtenidos con el piranómetro se alejaban del modelo matemático.



Figura 5.4. a) Foto 26/10/2012 9:00 a.m. b) Foto 26/10/2012 11:00 a.m.

Las mediciones se recolectaron mediante el piranómetro marca DAVIS INSTRUMENTS modelo VANTAGE PRO2PLUS, el cual proporciona datos tales como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, presión, irradiación solar, entre otros. En la Tabla 5.1 se muestran los datos obtenidos de manera experimental el día 24/10/2012 y los generados a partir del modelo matemático. Los datos de las 11:00 am y 11:30 am, no se lograron recolectar debido a inconvenientes con la batería de la laptop que se utilizó para almacenar los datos. En la Tabla 5.2 están los datos generados para el día 26/10/2012, en éstos si se encuentran mediciones sin interrupciones a los largo de todo el día. En la última fila de ambas tablas se

encuentran los promedios de temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa; esto se debe a que el modelo matemático que se utilizó, está programado para trabajar con valores promedios y no con valores instantáneos.

Tabla 5.1. Datos piranómetro del día (24/10/2012)

HORA	TEMPERATURA AMBIENTE [°C]	HUMEDAD RELATIVA [%]	VELOCIDAD VIENTO [m/s]	IRRADIACIÓN (experimental) [W/m ²]	IRRADIACIÓN (modelo) [W/m ²]
6:30	23,1	79	0,4	43	90
7:00	24,2	74	0,9	152	230
7:30	25,1	69	0,9	301	364
8:00	25,3	68	1,3	388	493
8:30	26,1	63	1,8	565	612
9:00	26,6	63	2,2	686	719
9:30	26,9	60	1,8	747	814
10:00	27,2	58	2,2	828	894
10:30	27,3	57	2,2	840	957
11:00					1004
11:30					1032
12:00	29,4	51	0,9	1169	1041
12:30	28,8	53	1,3	1004	1032
13:00	28,4	51	1,3	693	1004
13:30	28,1	54	1,3	543	957
14:00	28,2	54	1,3	512	894
14:30	27,8	56	1,3	481	814
15:00	27,6	59	0,9	355	719
15:30	28,3	55	0,4	416	612
16:00	28,6	55	0,4	362	493
16:30	28	57	0,4	173	354
17:00	27	61	0,4	74	230
17:30	26,3	64	0,4	22	90
PROMEDIOS	27,062	60,048	1,143		

Tabla 5.2. Datos piranómetro del día (26/10/2012)

HORA	TEMPERATURA AMBIENTE [°C]	HUMEDAD RELATIVA [%]	VELOCIDAD VIENTO [m/s]	IRRADIACIÓN (experimental) [W/m2]	IRRADIACIÓN (modelo) [W/m2]
6:30	21,3	83	0	43	91
7:00	22,2	80	0	139	230
7:30	23,5	76	0	265	365
8:00	24,6	73	0	411	493
8:30	27,1	66	0,4	537	611
9:00	27,4	63	0,4	564	718
9:30	28	60	0,4	364	813
10:00	29	58	0,4	682	892
10:30	29,1	54	0,4	686	956
11:00	29,7	54	0,9	992	1002
11:30	29,7	52	0,4	755	1030
12:00	29,3	52	0,9	891	1039
12:30	29,9	54	0,9	991	1030
13:00	30,3	50	0,9	1021	1002
13:30	30,5	51	0,9	1004	956
14:00	29,6	53	0,9	620	892
14:30	30	53	0,9	709	813
15:00	30,1	51	0,9	629	718
15:30	30,1	52	0,9	615	611
16:00	29,7	54	0,9	523	493
16:30	29,3	55	0,4	278	365
17:00	27,9	63	0,9	189	230
17:30	25,9	67	0,9	42	91
PROMEDIOS	27,848	60,381	0,586		

5.2. VALIDACIÓN-MODELO DEL COLECTOR

Luego de haber establecido y resuelto las ecuaciones mencionadas en el CAPÍTULO III referentes al colector solar, se procedió a una comparación y validación de resultados con data experimental existente. Para poder hacer dicha comparación, se modificaron algunas de las variables de entrada del modelo matemático, a fin de evaluar bajo las mismas condiciones climáticas y geométricas del colector en las que se obtuvo la data experimental. Las variables a comparar son: temperatura de la placa cubierta, temperatura de la placa de absorción y la temperatura del aire a la salida del colector. Para el modelo matemático se estableció una determinada irradiación y flujo másico, con unas dimensiones del colector de: 0.92m de largo, 0.54m de ancho y 0.02m de separación entre placas. La temperatura ambiente evaluada fue de 25 °C y se considero un aislante de fibra de vidrio de espesor 0.05 m (Shobhana 2012).

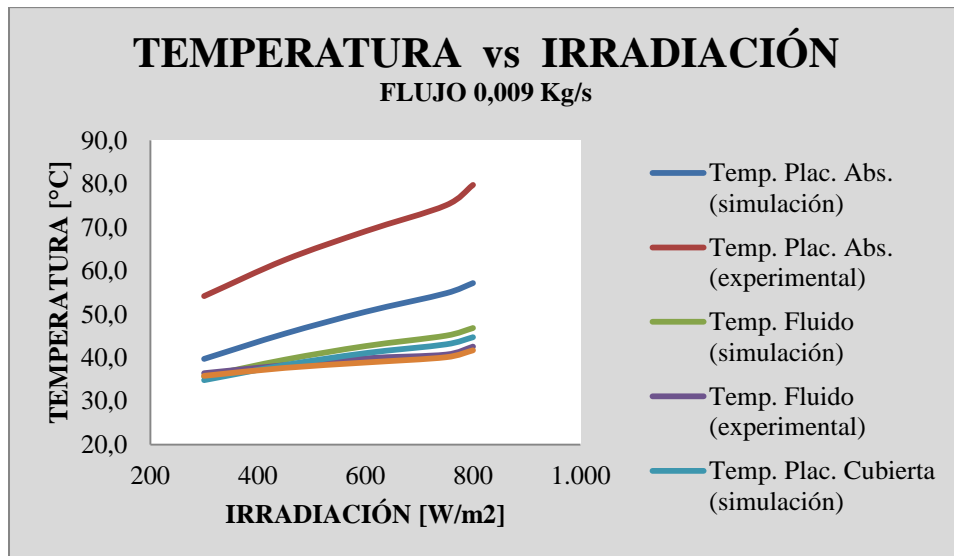


Figura 5.5. Flujo másico de 0.009 [kg/seg].

En la Figura 5.5 se puede notar que las temperaturas de la placa de absorción obtenidas experimentalmente son superiores a las temperaturas generadas por el modelo matemático, obteniéndose un error absoluto que varía entre el 26.6% y el 28.3%. Por otra parte, se puede observar que el error absoluto de las temperaturas del aire y de la placa cubierta son relativamente pequeñas, teniendo un rango de 2.1% - 9.1% y de 1.6% - 6.8% respectivamente

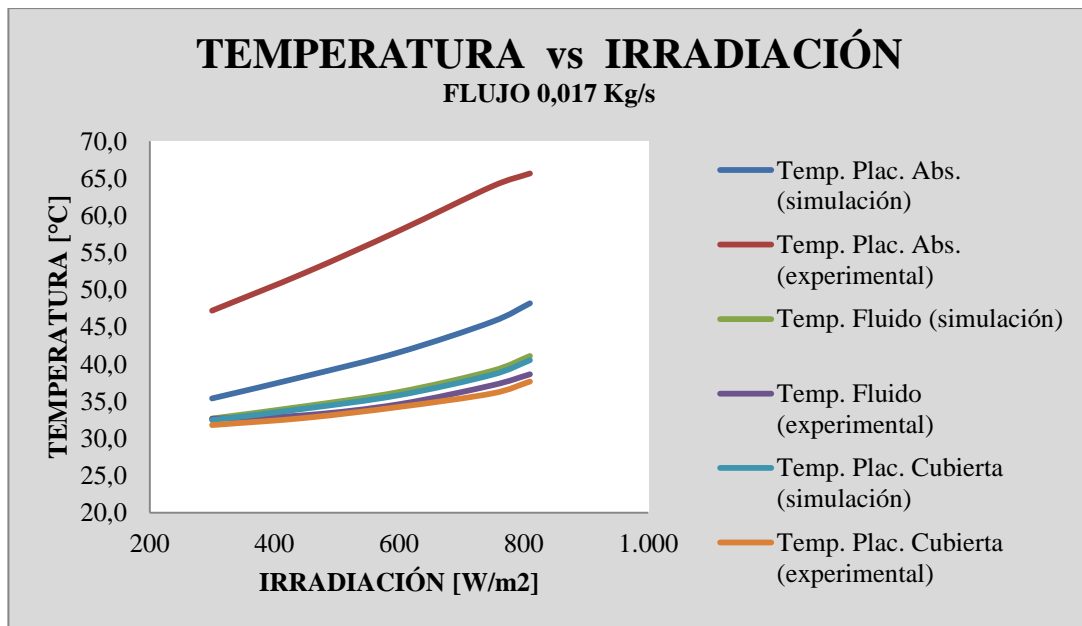


Figura 5.6. Flujo másico de 0.017 [kg/seg].

Con el aumento del flujo másico (Figura 5.6), se puede notar que las temperaturas de la placa de absorción obtenidas experimentalmente continúan siendo superiores a las temperaturas del modelo matemático, alcanzándose un error absoluto que varía entre el 25.03% y el 28.5%. Por otra parte, se observa que las variaciones entre las temperaturas del aire y de la placa cubierta siguen siendo relativamente

pequeñas, con un error entre un rango de 0.1% - 5.9% para la temperatura del aire a la salida del colector y de 2.04% - 7.08% para la placa cubierta.

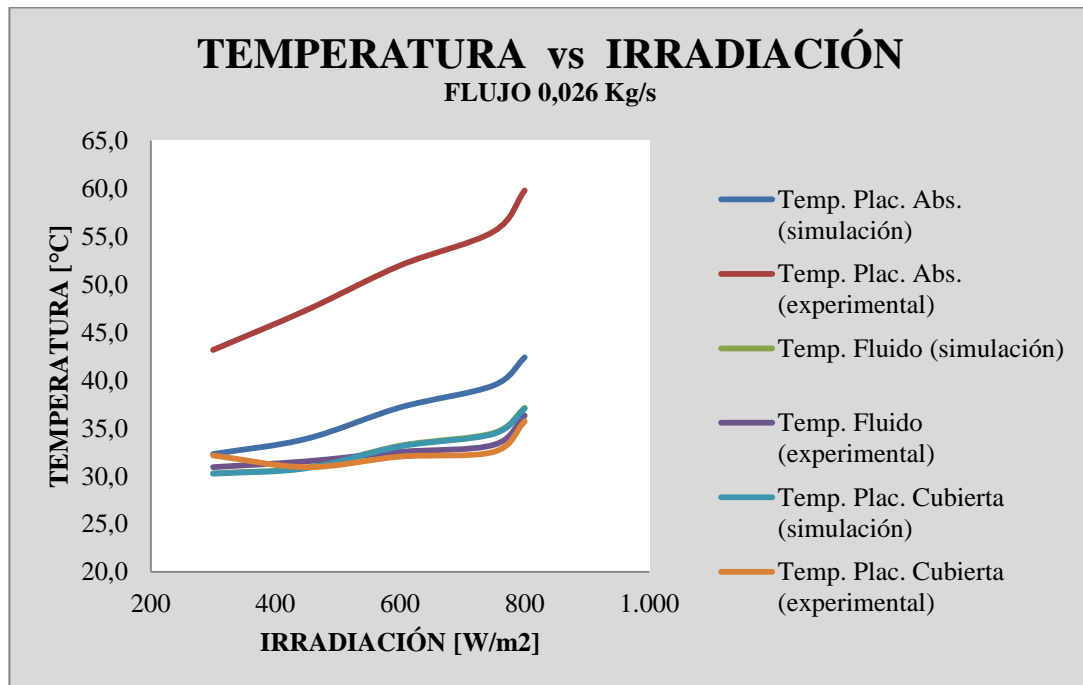


Figura 5.7. Flujo másico de 0.026 [kg/seg].

Por último, se realizó un aumento en el flujo másico estableciéndose en 0.026 [kg/seg] (Figura 5.7); con esto se observa que las temperaturas de la placa de absorción obtenidas experimentalmente se mantienen superiores a las temperaturas de la simulación matemática, obteniéndose un error absoluto que varía entre el 25.15% y el 29.1%. Por otra parte, e igual que en los casos anteriores, el error absoluto entre las temperaturas del aire y de la placa cubierta son considerablemente pequeñas, siendo el rango de 1.9% - 3.5% para la temperatura del aire a la salida del colector y de 0.3%- 5.9% para la placa cubierta.

Por último, los valores obtenidos numéricamente y experimentalmente, tienen una diferencia significativa a lo que temperatura de placa de absorción se refiere.

Dicha diferencia se puede deber a que las condiciones de aislamiento de la placa de absorción con el medio ambiente no se encuentren debidamente programadas dentro del modelo matemático del colector solar, producto de falta de información por parte de la data experimental.

5.3. VALIDACIÓN-MODELO DE LA CÁMARA DE SECADO

El presente modelo matemático se fundamenta en el trabajo realizado por (Villamizar 1989), en el cual presentan una expresión numérica capaz de determinar el contenido de humedad de las semillas de cacao en un tiempo determinado y para un amplio rango de temperatura. En la figura 5.8, se puede apreciar las curvas obtenidas por (Villamizar 1989), comparando isothermas experimentales de humedad de equilibrio con las teóricas calculadas mediante la ecuación (3.44).

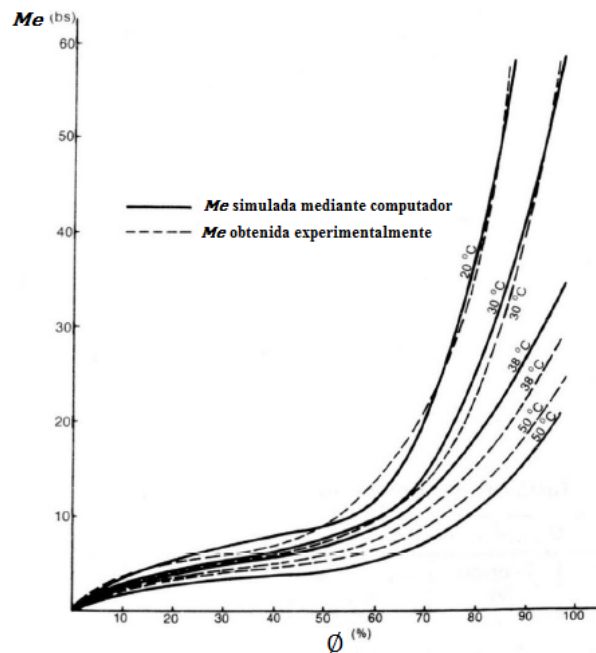


Figura 5.8. Comparación de isothermas experimentales con las obtenidas numéricamente. Ec. (3.44). (Villamizar 1989).

Luego de la programación del modelo propuesto por (Villamizar 1989), se construyó una gráfica de humedad de equilibrio versus humedad relativa con los mismos valores de temperatura de entrada usados por (Villamizar 1989), a fin de validar dicha expresión. En la Figura 5.9 se puede apreciar el resultado obtenido

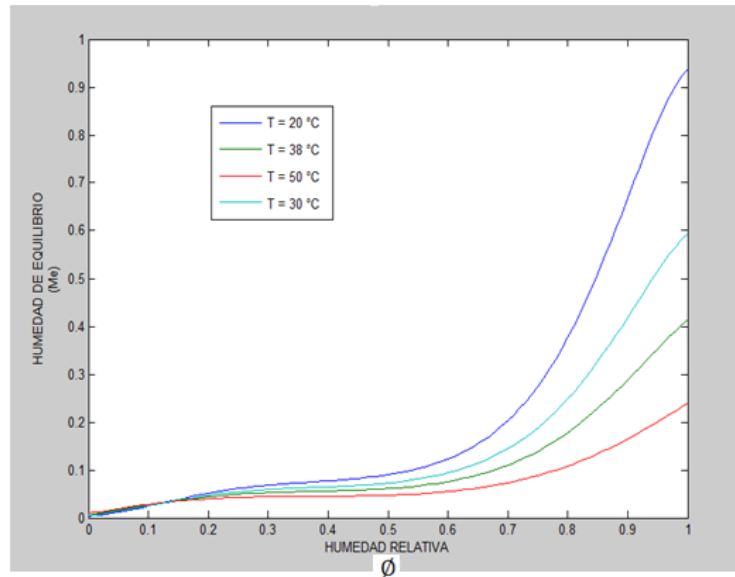


Figura 5.9. Validación de la ecuación (3.44).

Posteriormente, se realizó la validación de la ecuación (3.43). Para este caso, se compararon las gráficas de razón de humedad promedio MR versus el tiempo. En la figura 5.10, se puede apreciar la gráfica obtenida por (Villamizar 1989).

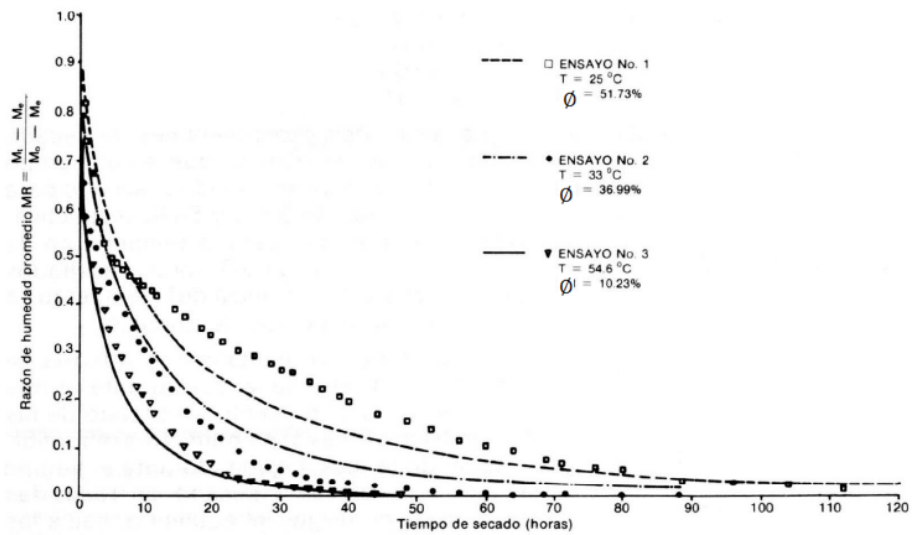


Figura 5.10. Comparación de isotermas experimentales con las obtenidas numéricamente. Ec. (3.43). (Villamizar 1989).

Igual que en el caso anterior, luego de la programación de la ecuación (3.43), se construyó una gráfica con los mismos valores de entrada referidos a la humedad relativa y la temperatura. En la Figura 5.11 se puede apreciar el resultado obtenido.

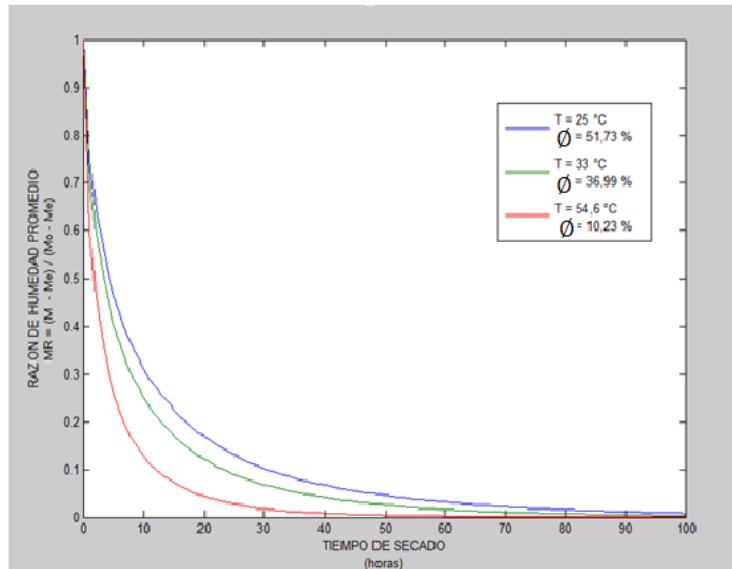


Figura 5.11. Validación de la ecuación (3.43).

Mediante las Figuras 5.9 y 5.11, se puede notar que la programación de las ecuaciones (3.44) y (3.43) tienen el mismo comportamiento que las gráficas obtenidas por (Villamizar 1989), lo cual permitió proseguir con la construcción del modelo.

Posteriormente, el modelo creado para el secador solar fue usado en la estimación de secado de cacao usando los datos de irradiación solar recolectados el día 26/10/2012 en la azotea de la escuela de ingeniería mecánica y comparándolo con el modelo del secador solar usando los valores de irradiación total obtenido por Liu-Jordan. La información inicial que requiere el programa para realizar dicha estimación, se presenta en la Tabla 5.3, donde se encuentra dividida la información en cuatro grupos, comenzando por la información del lugar geográfico, seguido por datos de la fecha de estudio, luego datos sobre las características del colector y por último características de la cámara de secado.

Tabla 5.3. Datos de entrada del secador solar

LATITUD_[°]:	10,5
LONGITUD_[°]:	66,9
REFLECTIVIDAD_DEL_SUELO:	0,3
TEMPERATURA_AMBIENTE(promedio)[°K]:	298
VELOCIDAD_DEL_VIENTO(promedio)[m/s]:	0,586
PRESION_AMBIENTE(promedio)[KPa]:	101,325
HUMEDAD_RELATIVA_AIRE[%]:	60,38
MES_DEL_AÑOS_[1_Y_12]:	10
DIA_DEL_MES_[1_Y_31]:	26
NUMERO_DE_HORAS_SOLAR_MEDIDAS:	12
ANGULO_DE_INCLINACION_DE_LA_SUPERFICIE[°](-NORTE_+SUR):	10
SEPARACION_ENTRE_LAS_PLACAS[m]:	0,05
LONGITUD_DEL_COLECTOR[m]:	5
ANCHO_DEL_COLECTOR[m]:	1
NUMERO_DE_DIVISIONES:	200
EMISIVIDAD_DE_LA_CUBIERTA:	0,89
EMISIVIDAD_DE_LA_PLACA:	0,96
ABSORTIVIDAD_SOLAR_DE_LA_CUBIERTA:	0,08
ABSORTIVIDAD_SOLAR_DE_LA_PLACA:	0,96
TRANSMISIVIDAD_SOLAR_DE_LA_CUBIERTA:	0,78
FLUJO_MASICO[Kg/s]:	0,1
ESPESOR_AISLANTE[m]:	0,05
CONDUCTIVIDAD_TERMICA_DEL_AISLANTE[W/mK]:	0,036
RUGOSIDAD_DUCTOR[m]:	0,000046
NUMERO_DE_BANDEJAS:	5
ESPESOR_DEL_LECHO_DE_CACAO[m]:	0,08
ANCHO_BANDEJA[m]:	0,9
LARGO_BANDEJA[m]:	0,7
HUMEDAD_BASE_HUMEDA_CACAO[%]:	80
PESO_POR_BANDEJA_DEL_CACAO[Kg]:	10

Con los resultados obtenidos se generaron las siguientes gráficas.

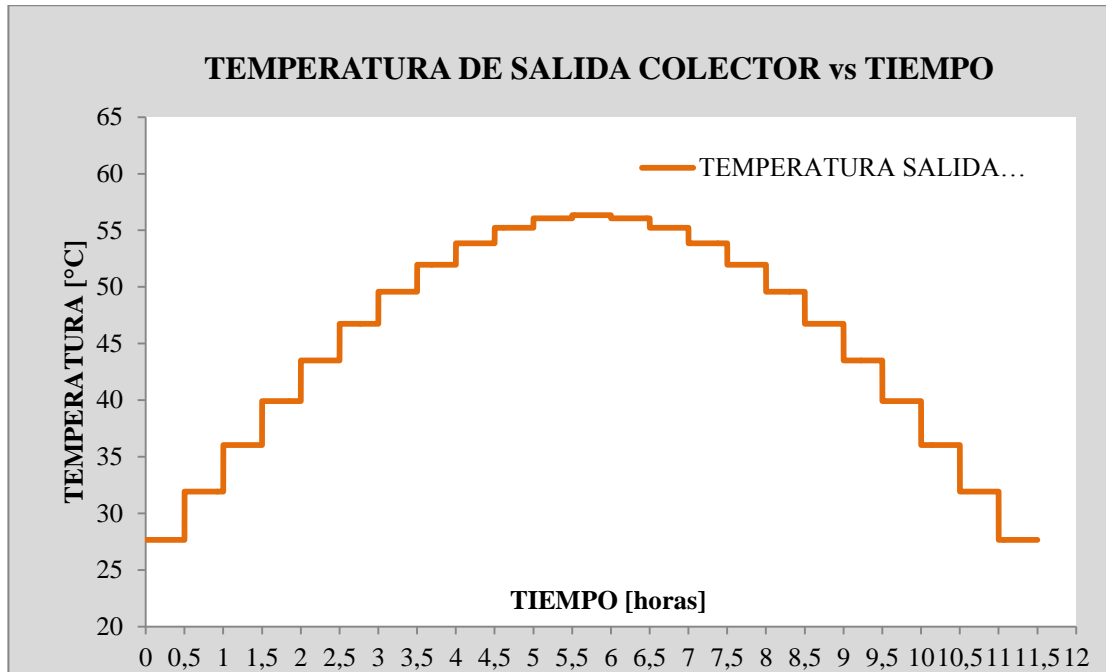


Figura 5.12. Temperatura del aire a la salida del colector.

En la Figura 5.12. se puede observar los valores de la temperatura a la salida del colector solar, estos valores de temperatura son constantes en intervalos de media hora, ya que las aproximaciones de irradiación fueron estimadas en ese mismo intervalo de tiempo. Siendo el valor máximo de temperatura 56,33 °C para el valor máximo de irradiación, y su valor mínimo de 27,65 °C al comienzo y final del día de estudio, correspondientes a la mínima irradiación solar.

Cabe destacar que las gráficas que se presentan a continuación, muestran los resultados con las bandejas intercaladas debido a que si se colocaban el número total de bandejas, sería muy difícil la comprensión de las mismas.

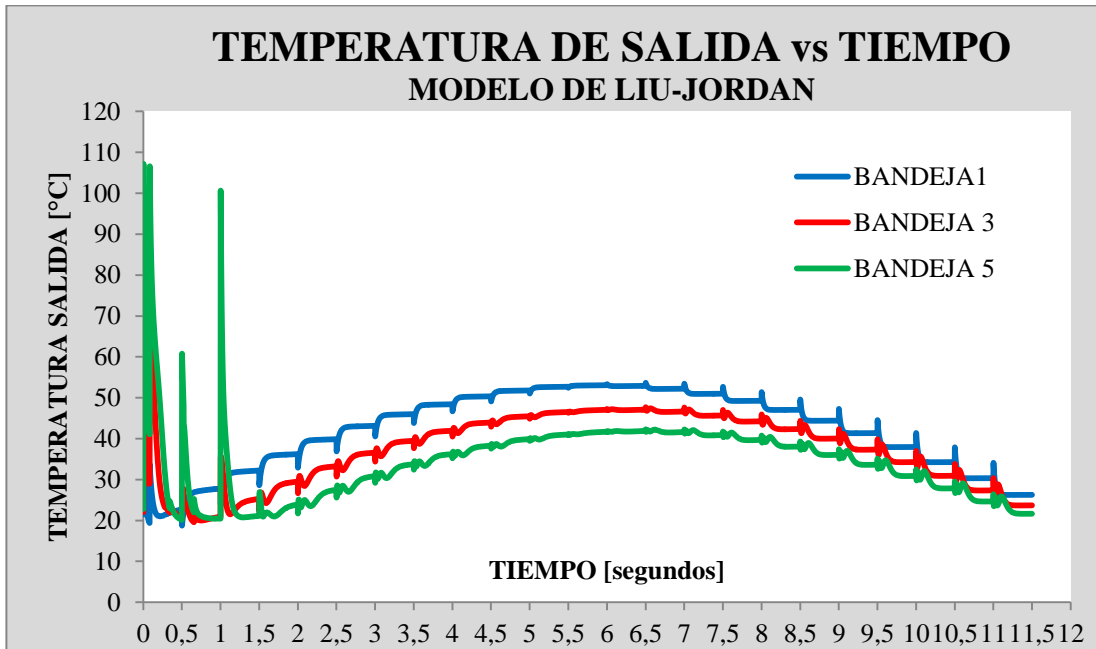


Figura 5. 13. Temperatura del aire a la salida de las bandejas, Liu-Jordan.

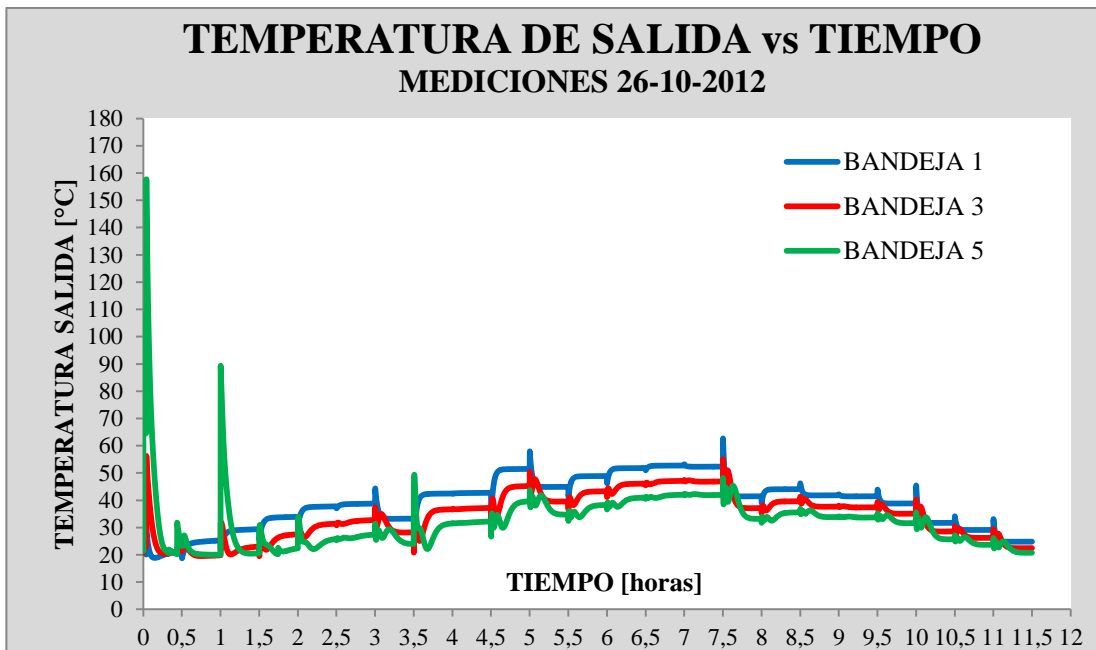


Figura 5. 14. Temperaturas del aire a la salida de las bandejas, datos reales de irradiación.

Las Figuras 5.13 y 5.14, muestran las gráficas referentes a la temperatura de salida del aire en las bandejas 1, 3 y 5, dentro de la cámara de secado. Mediante estas gráficas se puede notar un comportamiento similar dentro de la cámara de secado, entre los valores obtenidos usando el modelo de Liu-Jordan para la estimación de la irradiación solar y los valores de irradiación experimental. Además se puede observar una irregularidad en los valores comprendidos en el intervalo de tiempo de 0 a 1,5 horas. Obviando las irregularidades en el intervalo de 0 a 1,5 horas, se observa que dichas gráficas muestran un comportamiento esperado, ya que, a medida que el aire atraviesa los lechos de cacao va disminuyendo su temperatura, así como también, se puede notar que el pico de más alta temperatura, corresponde al valor más alto de irradiación solar sobre el colector.

Los picos que se observan cada media hora en la Figura 5.15 se deben a la aproximación utilizada para la temperatura final del cacao, el cual es el valor medio entre la temperatura de entrada y salida del aire en la bandeja. Ya que cada media hora ocurre un salto de temperatura producto del cambio de irradiación solar, la temperatura de entrada del aire al lecho de cacao aumenta, por lo cual la temperatura de salida del aire decae de manera repentina de modo tal que la temperatura de cacao permanezca en el punto medio de ambas temperaturas, lo mismo ocurre pero de manera inversa después del mediodía cuando la temperatura de entrada del aire comienza a disminuir.

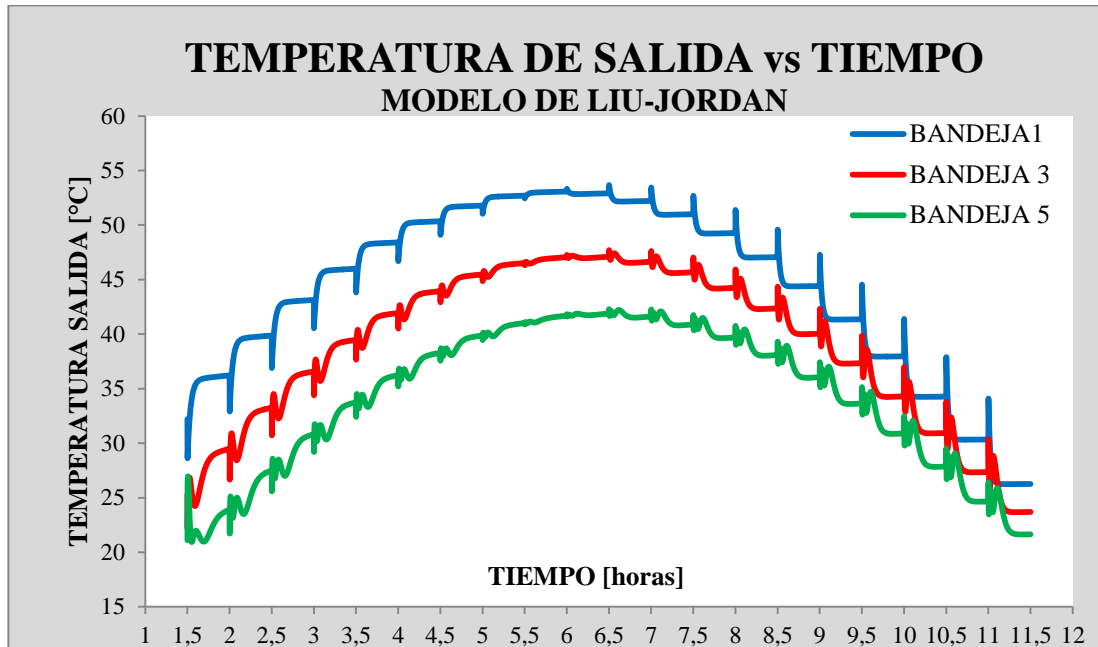


Figura 5. 15. Temperatura de salida del aire en las bandejas obviando periodo irregular.

En las Figuras 5.16 y 5.17, se encuentra la humedad relativa del aire para cada instante de tiempo a la salida de las bandejas, mostrando que a medida que la temperatura del aire aumenta su humedad relativa disminuye, y a su vez, la humedad relativa del aire siempre será mayor a medida que atraviere cada bandeja, producto de la transferencia de masa de agua del cacao hacia el aire.

Por otra parte se puede notar que en las primeras dos horas aproximadamente la humedad relativa del aire alcanza su valor máximo, debido a las bajas temperaturas del aire a la entrada de la cámara de secado en dicho intervalo de tiempo.

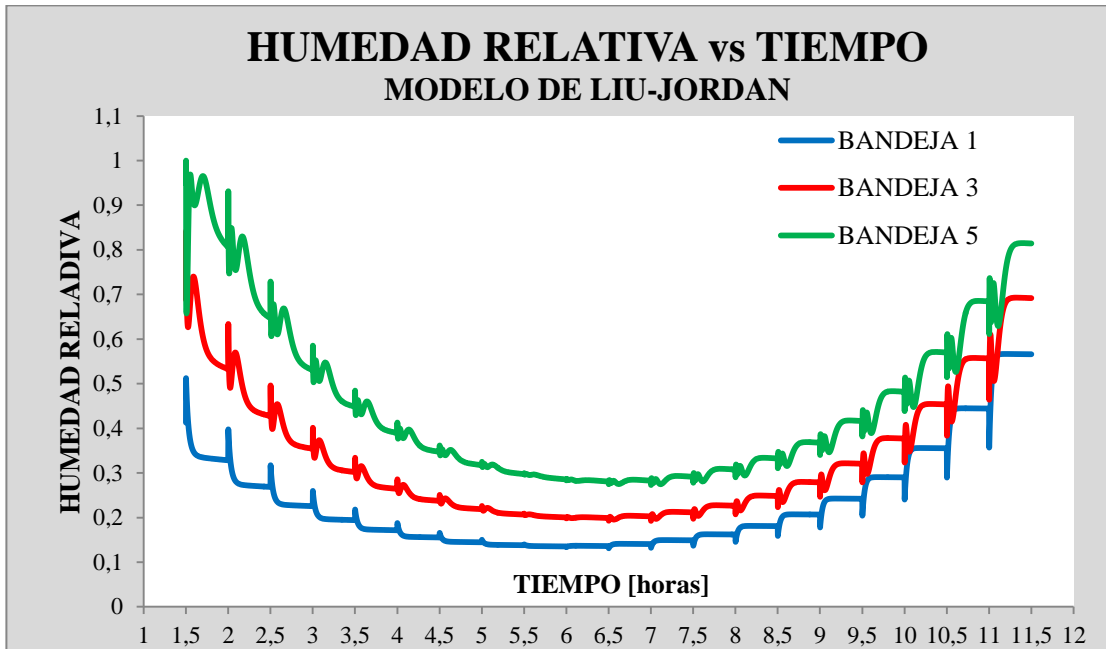


Figura 5.16. Humedad relativa del aire a la salida de cada bandeja, Liu-Jordan.

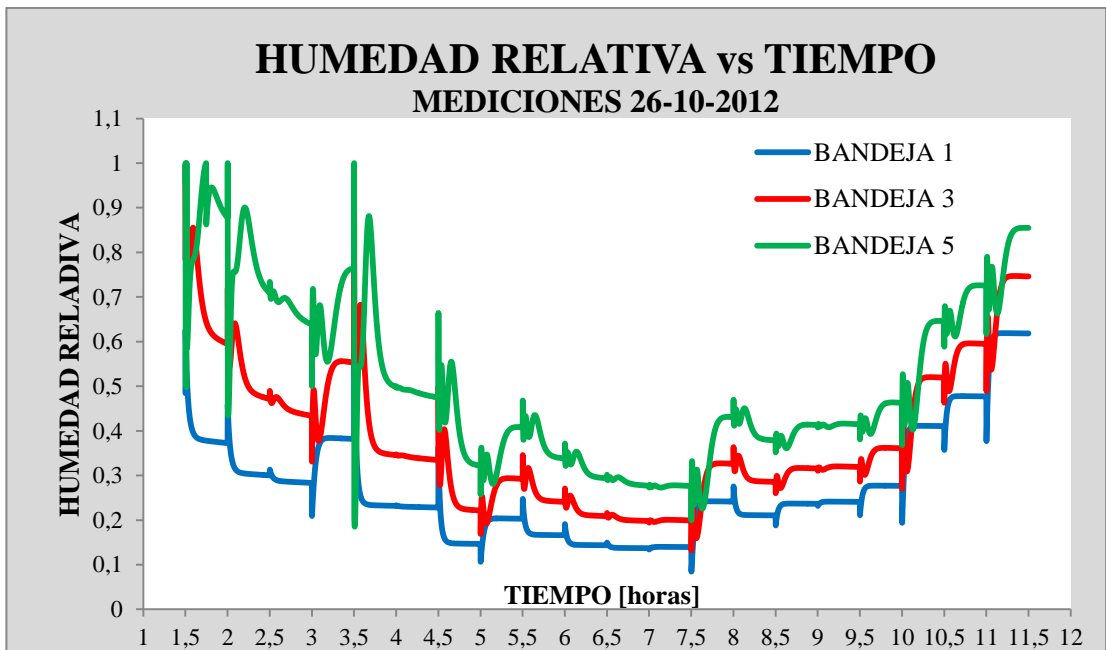


Figura 5.17. Humedad relativa del aire a la salida de cada bandeja, datos reales de irradiación.

Las Figuras 5.18 y 5.19, muestran las gráficas referentes a la pérdida de humedad del cacao en el transcurso del día, en las bandejas 1, 3 y 5. Con estas gráficas se observa el comportamiento esperado en el proceso de deshidratación, ya que a medida que el flujo de aire va pasando por las bandejas, va perdiendo su capacidad de remover agua del cacao. En los primeros instantes de tiempo se observa que en las bandejas 3 y 5 hay un incremento de humedad en el cacao, que inicialmente estaba en 0,8, esto se debe a que la temperatura del aire es muy baja y la humedad relativa cercana a su valor máximo, lo cual genera que en vez de haber transferencia de masa de agua del cacao al aire, ocurre lo contrario.

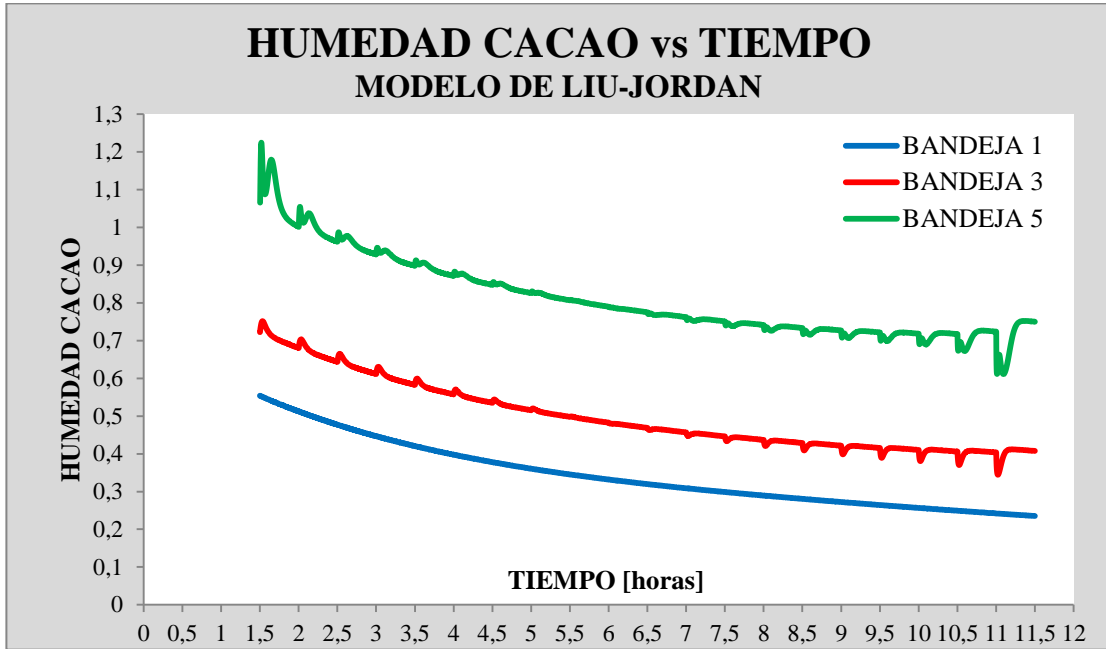


Figura 5.18. Humedad del cacao en cada instante de tiempo, Liu-Jordan.

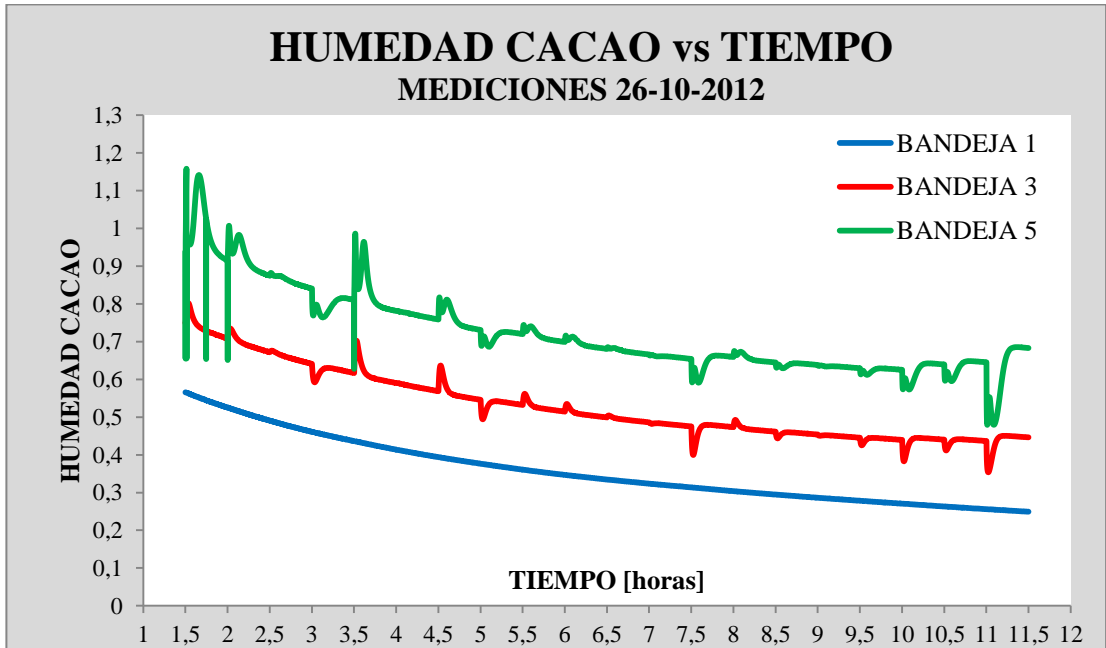


Figura 5.19. Humedad del cacao en cada instante de tiempo, datos reales de irradiación.

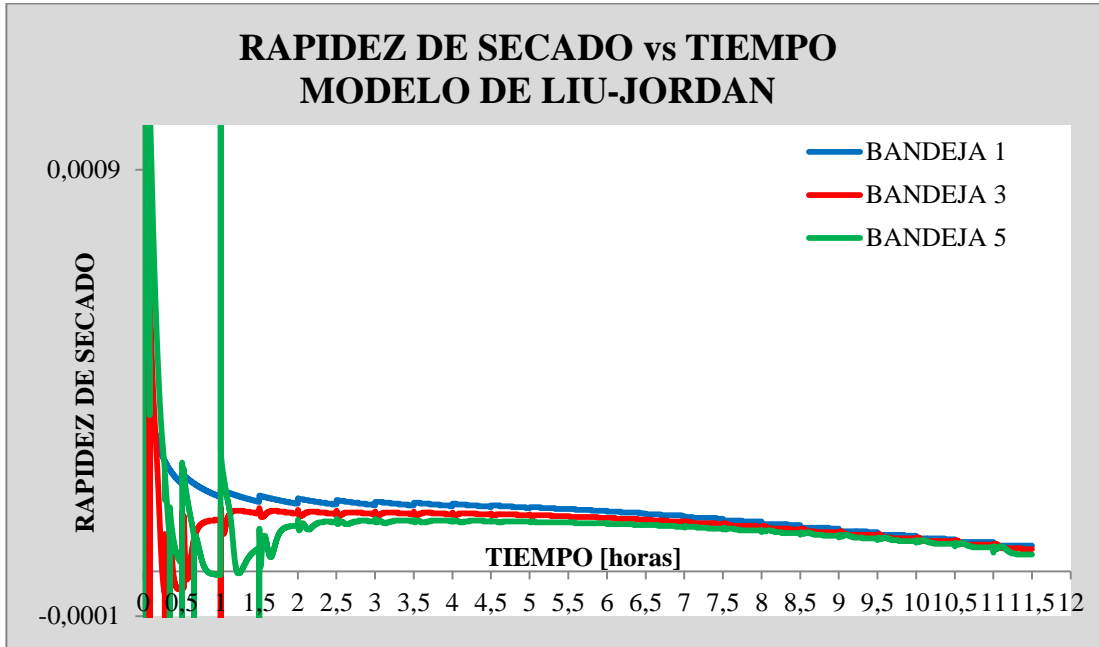


Figura 5.20. Rapidez de secado para cada bandeja, Liu-Jordan.

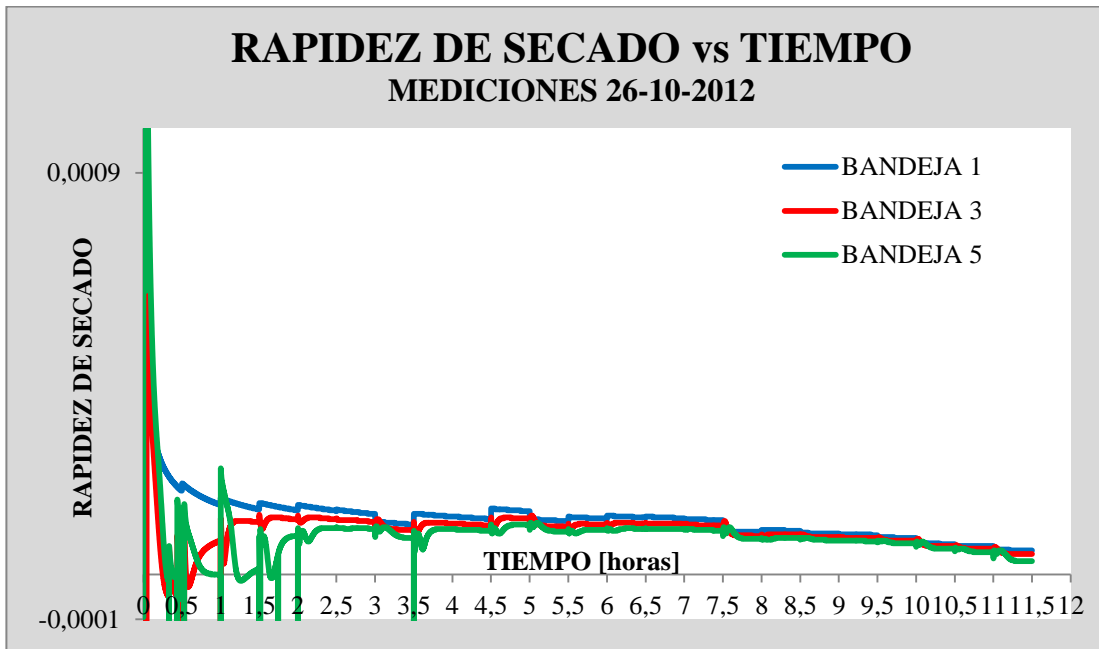


Figura 5.21. Rapidez de secado para cada bandeja, datos reales de irradiación.

En las Figuras 5.20 y 5.21 se muestra la rapidez de secado en el cacao, aparte de observar similitudes entre ambas graficas, podemos ver que la velocidad de secado es mayor al inicio del proceso de secado y luego se estabiliza a medida que el tiempo transcurre, esto debido a que, la semilla de cacao no sede con tanta facilidad el agua que contiene, en el momento que esta se aproxima a su humedad de equilibrio. También podemos notar que la velocidad mayor de secado, ocurre en la bandeja 1 y la velocidad mas lenta en la bandeja 5, comportamiento esperado debido a como se encuentra conformada la cámara de secado, ya que a medida que el aire atraviesa los lechos de cacao va perdiendo temperatura y ganando humedad relativa.

Como análisis final, bajo las características introducidas sobre la localización del colector solar, características del mismo, día de estudio y características de la cámara de secado, el proceso de secado no concluyo en ninguna de las bandejas, seria necesario de por lo menos algunas horas más para alcanzar la humedad deseada en el cacao, que por lo general son valores inferiores al 10%. Siendo los valores humedad obtenidos en cada bandeja los siguientes. En la bandeja 1 se alcanzó una humedad de 0,23, para la bandeja 3 de 0,40 y en la bandeja 5 de 0,75, para el estudio de todo un día de proceso de secado.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de haber realizado el modelado de la operación transitoria de un deshidratador solar para secado de cacao y posteriormente, haber validado cada uno de los sub modelos que lo componen, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

6.1. MODELO DE IRRADIACIÓN

6.1.1. Conclusiones.

- El modelo de Liu-Jordan propuesto en 1963, puede ser usado en el estudio del comportamiento de la radiación solar, ya que los valores arrojados con dicho modelo se ajustan bastante bien a los valores de irradiación obtenidos mediante un piranómetro.
- El índice de claridad propuestos por (Almorox 2008) no representa la ocurrencia de nubosidad en horas del mediodía solar, en la ubicación dónde se realizaron las mediciones, ajustándose en mejor medida en horas de la mañana y de la tarde.
- La programación del modelo matemático propuesto por Liu-Jordan es de gran ayuda en el estudio de la radiación solar, ya que permite conocer la irradiación solar sobre una superficie horizontal o inclinada en cualquier parte y a lo largo de todo un día en estudio, arrojando valores de irradiación cada media hora.

6.1.2. Recomendaciones.

- Realizar la validación del modelo propuesto por Liu-Jordan, en distintos meses del año.
- Realizar ajustes en el índice de claridad propuesto por (Almorox 2008).

6.2. MODELO DEL COLECTOR SOLAR

6.2.1. Conclusiones.

- Se puede concluir que el modelo matemático del colector solar propuesto por Lammardo A., Baritto M., en el 2010, se puede usar perfectamente para el estudio del calentamiento de un fluido.
- Por otra parte, se puede concluir que la programación del modelo matemático del colector solar unido con la programación del modelo de radiación solar, es de gran ayuda para el conocimiento de la operación transitoria de un colector solar a lo largo de todo un día en estudio
- Se puede concluir que la programación del modelo matemático del colector solar, puede ser de gran ayuda a la hora de diseñar este tipo de tecnología, ya que se pueden determinar las variables de salida del colector solar, como lo son, las temperaturas de la placa cubierta, placa de absorción y temperatura del aire a la salida del colector, así como también las pérdidas de presión del aire dentro del mismo, modificando las variables de entra como lo son, las características geométricas (largo, ancho y espesor) del colector solar y la potencia del ventilador.

6.2.2. Recomendaciones.

- Realizar un banco de pruebas donde se pueda variar los parámetros geométricos y la irradiación incidente sobre el colector, a fines de crear una herramienta de apoyo al modelo matemático aquí propuesto, y poder brindar una mejora en este tipo de tecnología que pueda ser de gran provecho para algunos poblados venezolanos.

6.3. MODELO CÁMARA DE SECADO

6.3.1. Conclusiones

- Se puede concluir que el modelo de la cámara de secado puede ser usado para la obtención de datos referenciales sobre la cinética de secado, ya que es necesario comparar dichos datos con información experimental
- El uso del secador solar es favorable para la deshidratación de cacao.
- El modelo generado muestra irregularidad en los valores calculados dentro de aproximadamente las dos primeras horas.

6.3.2. Recomendaciones

- Realizar mediciones referentes a la cinética de secado del cacao, en zonas productoras.
- Realizar un modelo matemático de cinética de secado que tenga en cuenta los cambios de temperatura del flujo de aire a lo largo de todo el proceso.
- Realizar una validación numérica de la cinética de secado del cacao con data experimental de zonas productoras

NOMENCLATURA

MODELO MATEMÁTICO DE RADIACIÓN SOLAR

β Ángulo de inclinación de la superficie [°]

ρ_g Reflectividad del suelo.

R_b Relación entre radiación global sobre una superficie inclinada y la radiación global sobre una superficie horizontal.

I_h Irradiación global sobre una superficie horizontal. [W/m²].

I_d Irradiación difusa. [W/m²].

I_b Irradiación directa. [W/m²].

I_T Irradiación global sobre una superficie inclinada [W/m²].

K_T Índice de claridad

#*in* Número de intervalos

MODELO MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR

τ Transmisividad de la placa cubierta

σ Constante de Stefan Boltzman y es igual a 5.67×10^{-8} [W/m².K⁴]

dx Diferencial de longitud [m]

b Ancho de la placa de absorción y la placa cubierta [m]

Y Separación entre placas [m]

A Área dentro del colector perpendicular al flujo de aire [m²].

\dot{m} Flujo másico [kg/s]

ϵ_P, ϵ_C Emisividad térmica de la placa de absorción y la placa cubierta respectivamente

α_P Absortividad de la placa de absorción

α_C Absortividad de la placa cubierta

V_V Velocidad del viento [m/s]

U_P Perdida de calor a través de la placa de absorción hacia el medio ambiente [W/K.m²]

T_F, T_C, T_P Temperaturas del flujo de aire, placa cubierta y placa de absorción respectivamente [K]

T_{AMB} Temperatura ambiente [K]

N_{UL} Numero de Nusselt propuesto por Dittus-Boelter

K_f Conductividad térmica del aire

I_T Irradiación global sobre una superficie [W/m²]

D_H Diámetro hidráulico de la sección transversal en el colector solar [m]

Cp_a Calor específico del aire [J/kg.K]

$h_{RAD_{PC}}$ Coeficiente radiactivo entre la placa de absorción y la placa cubierta [W/K.m²]

$h_{RAD_{CC}}$ Coeficiente radiativo entre la placa cubierta y el cielo [W/K.m²]

$h_{CONVIENTO}$ Coeficiente convectivo entre la placa cubierta y el viento [W/K.m²]

h_{CONPF} Coeficiente convectivo entre el flujo de aire y la placa de absorción [W/K.m²]

h_{CONFC} Coeficiente convectivo entre el flujo de aire y la placa cubierta [W/K.m²]

MODELO MATEMÁTICO DE LA CAMARA DE SECADO

t Tiempo medido en segundos [horas]

MR Razón de humedad promedio

M Humedad base seca del cacao

L Calor latente del producto [J/kg]

\emptyset Humedad relativa del aire

$\frac{\partial m_l}{\partial t}$ Diferencial de masa de líquido respecto al tiempo dentro del volumen de control

ω_1, ω_2 Humedad absoluta del aire a la entrada y a la salida del volumen de control respectivamente

m_{v1}, m_{v2} Flujo másico de vapor a la entrada y a la salida del volumen de control respectivamente [kg/s]

m_l, m_s Masa de agua y la masa de cacao seco respectivamente [kg]

h_g Entalpia del vapor de agua [J/kg]

h_{fg} Entalpia de vaporización del agua en el cacao [J/kg]

T_a Temperatura del aire [K]

P_V Presión de vapor del producto [Pa]

P_{SAT} Presión de saturación del agua [Pa]

M_o Humedad inicial

M_e Humedad de equilibrio

Cp_p Calor específico de la semilla de cacao húmedo (valor obtenido empíricamente en función de la humedad del cacao) [J/Kg.K]

$\frac{\partial T_p}{\partial t}$ Diferencial de temperatura del cacao respecto del tiempo

\dot{m}_a Flujo másico del aire seco [kg/s]

PÉRDIDAS EN EL SECADOR SOLAR

ρ Densidad del aire [K/m³]

μ Viscosidad [N.s/m²]

ε Fracción de hueco

v Velocidad del aire en ausencia del lecho de cacao [m/s]

l Espesor del lecho de cacao [m]

g Aceleración de la gravedad = 9.8 [m/s²]

f Factor de fricción

e Rugosidad del material [m]

V_p Volumen de la partícula = $1,18 \cdot 10^{-6}$ [m³] (Villamizar 1989)

Re Numero de Reynolds

P_{ven} Presión del ventilador [Pa]

P_o Presión del aire dentro del sistema [Pa]

P_{cs} Pérdidas en la cámara de secado [Pa]

P_c Perdidas en el colector solar [Pa]

P_{atm} Presión atmosférica [Pa]

N_b Número de bandejas

L Longitud del colector [m]

H_{cs} Pérdidas en la cámara de secado [m]

H_c Perdidas en el colector [m]

D_p Diámetro equivalente de la partícula [m]

A Área perpendicular al flujo de aire en el colector solar [m²]

g_c Constante de conversión de unidades = 1 [kg.m/s².N]

D_H Diámetro hidráulico [m]

BIBLIOGRAFÍA

- Almorox J., Benito M., Hontoria C., (2008). *Estimación de la radiación solar global en Venezuela*. Interciencia. Vol. 33, No 4.
- Baritto, M., Bracamonte, J., (2011). A dimensionless model for the outlet temperature of a nonisothermal flat plate solar collector for air heating. *Solar energy*. Extraído el 19 de abril del 2012 desde <http://www.elsevier.com/locate/solener>
- Barrena M., Maicelo J., Gamarra O. (2009). *Drying kinetics of eggfruit (Pouteria lucuma L.)*. Aporte Santiaguino. [online]. July/dec., vol.2, no.2 [cited 18 July 2011], p.271-282. Available from World Wide Web: http://revistas.concytec.gob.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2070-836X2009000200006&lng=en&nrm=iso. ISSN 2070-836X
- Camacho, Guillermo. (2004). *Procesamiento y Conservación de Frutas*. Curso Virtual ofrecido por el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos ICTA. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- CENSOLAR (2012). *La energía solar*. Recuperado de <http://www.censolar.es/menu2.htm>
- Chandrasekaran J., Kumar S., (1994). *Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location* . Solar Energy. Vol. 53, No 6, pp. 505-510
- Costa, Antonio R. S., Ferreira, Sebastião R. (2007). Sistema de secado solar para frutos tropicales. *Información tecnológica*. Vol. 18(5), 49-58. Brasil.
- Domínguez, J. (1983). *Simulación matemática y optimización del secado de productos agropecuarios con aire natural y energía solar* En: Revista Ingeniería e Investigación V. 2 No. 3: 57-62.
- Dong Chen, X. (2008). *Mujumdar A. Drying technologies in food processing*. Editorial Blackwell Publishing. Reino Unido. 2008

- Duffie, J., Beckman, W., (1980). *Solar Engineering Thermal Processes*. Madison, Wisconsin
- Geosol (2012). Software libre
- Giraldo Z., Abraham D., (2012). *Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (Theobroma grandiflorum) en rodajas*. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* [online]. vol.30, n.1, pp. 179-182. ISSN 0101-2061.
- Incropera F., De Witt D., (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. 4ª. Ed. Mexico: Prentice Hall.
- Jain, D., Jain, R.. (2004). Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application. *Journal of food engineering*. Extraído el 19 de abril del 2012 desde <http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>
- Lammardo A., Baritto M., (2010). Modelo matemático del comportamiento térmico de un colector solar de placas planas inclinadas para calentamiento de aire. *Revista Ingeniería UC*. Vol. 17, No 3, 19-27. Venezuela.
- Larios, L., Texeira, J. (2004). *Diseño y construcción de un deshidratador indirecto de cacao mediante uso de aire calentado por energía solar*. Trabajo especial de grado. Pre grado. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.
- Levenspiel O., (1998). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. México: Reverté.
- Moreno M., Fabián L. (2008). *Determinación de los Parámetros para la Simulación Matemática del Secado de Almidón de Yuca*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. P. 176.
- MUNDO SOLAR (2012). *Descripción y Funcionamiento de un Calentador solar para uso Residencial*. Recuperado de <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/descripcion-y-funcionamiento-de-un-calentador-solar-para-uso-residencial/>

- Ong, K. (1995). Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure. *Solar Energy*. Vol. 55, No 2. Malaysia.
- Periodico ecológico. (2012). *Venezuela: La energía solar es una realidad en la isla de Margarita*. Recuperado de <http://noticias.masverdedigital.com/2011/venezuela-la-energia-solar-es-una-realidad-en-la-isla-de-margarita/>
- Potter M., Wiggert D. (2002). *Mecánica de fluidos*. 3era ed. México: MacGraw-Hill.
- Poveda M., Juan P. (2006). *Diseño y simulación de un secador de granos de cacao con colectores solares planos mediante convección forzada para una capacidad de 500 Kg*. Trabajo especial de grado. Pre grado. Escuela politécnica del ejército. Ecuador.
- Reyes, H., L. (2000). Capriles de Reyes. “*El cacao en Venezuela. Moderna Tecnología para su cultivo*”. Editorial Chocolates el Rey. C.A. Caracas, Venezuela.
- Santamarina J., Cho G., (2004). *Soil Behavior: The role of particle shape*. Extraído el 20 de octubre del 2012 desde http://pmrl.ce.gatech.edu/tools/santamarina_cho_2004.pdf
- Shobhana, S., Subodh, K., (2012). *Testing method for thermal performance based rating of various solar dryer designs*. *Solar Energy*. Vol. 86, No 1, 87-98. India.
- Tiwari, G. N. (2002). “*Solar Energy Fundamentals, Design, Modelling and Applications*”. Narosa Publishing House, N_ 247
- Vanaclocha, A. C. (2003). *Procesos de conservación de alimentos*, Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 2003
- Van Wylen. (2007). *Fundamentos de termodinámica*. 2a. ed. Mexico: Limusa Wiley

- Vega A., ANDRES A., FITO P. (2005). *Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (Capsicum annuum L. cv Lamuyo)*. Inf. tecnol. [online], vol.16, n.6, pp. 3-11.
- Villamizar, F., Hernandez, J., (1989). *Determinación de parámetros y simulación matemática del proceso de secado del cacao (Theobroma cacao)*. Universidad de Colombia, Colombia
- Vivas, J. (2005). *Cacao, cosecha, fermentación y secado*. Editorial CESVI. Caracas, Julio 2005.
- Watmuff, J. H., Charters, W. W. S., Proctor, D. (1977).